

**Evaluación de un humedal artificial de flujo Subsuperficial
(Hafss) utilizando Typha para el tratamiento de residuos peligrosos generados en el
laboratorio de aguas de empresas públicas de la Ceja E.S.P.**

**Cridayana Bedoya
Hermes Yesid Betancur**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente
Ingeniería Ambiental
Medellín (Antioquia) 2020**

**Evaluación de un humedal artificial de flujo Subsuperficial
(Hafss) utilizando Typha para el tratamiento de residuos peligrosos generados en el
laboratorio de aguas de empresas públicas de la Ceja E.S.P.**

**Cridayana Bedoya
Hermes Yesid Betancur**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Ambiental

**Director:
Kevin Alberto Berthi Mantilla MSC
Ingeniería Ambiental**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente
Ingeniería Ambiental
Medellín (Antioquia) 2020**

Agradecimientos

En primer lugar dar gracias a nuestro creador Dios quien nos acompañó durante el desarrollo de la carrera, nos brindó apoyo en los momentos de debilidades en el trayecto de este ciclo de aprendizajes.

A nuestros padres que son y serán siempre la base primordial para el desarrollo de nuestras vidas educativas, gracias a su apoyo y esfuerzo por hacer de nosotros personas de bien, con proyecciones y metas para ser parte de una sociedad donde hay miles de profesionales con la capacidad de a la brindar soluciones y oportunidades ante las problemáticas actuales.

A nuestros hermanos, que nos motivan a hacer todo por ellos

También agradecemos a nuestras parejas, por el apoyo psicológico y afectivo que nos permitió seguir en momentos difíciles con el proyecto.

Además, agradecemos el apoyo, la confianza y la dedicación que nos brindó nuestro tutor Kevin Berthi Mantilla, quien siempre se caracterizó por su profesionalismo para que este trabajo fuera impecable, y pudiéramos mostrar a los demás que se pueden implementar proyectos para mitigar y minimizar de manera directa los impactos ambientales ocasionados por los procesos de las industrias.

No obstante dar Gracias a la Universidad Nacional Abierta y A Distancia Unad y a todo su equipo de tutores quienes fueron la base esencial para adquirir los conocimientos que vamos a poner en marcha como Profesionales.

Los procesos de purificación empleados en las plantas de tratamiento de agua potable generan residuos cuyo vertido causan un impacto negativo sobre el medioambiente y la salud de poblaciones aledañas. Ésta problemática se viene presentando en las Empresas Públicas de La Ceja E.S.P. El objetivo del proyecto es evaluar un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial HAFSS utilizando *Typha* para el tratamiento de residuos peligrosos generados en procesos de potabilización de agua en el Laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P. En una primera etapa del proyecto se diseñará el sistema de tratamiento, en la segunda se determinarán las mejores condiciones de operación del sistema basados en las cargas hidráulicas aplicadas al sistema con plantas, y en la tercera se evaluó la eficiencia del sistema mediante medición de parámetros a la entrada y salida del HAFSS, obteniendo los siguientes resultados de remoción: 69.71% Demanda Química de Oxígeno DQO , 99.73% de fosforo total, 99.73% de Ortofosfatos, 54.34% de Nitratos y 54.34% de turbiedad. El diseño experimental, se basa en la ecuación de pistón, la cual ha sido evaluada en los comportamientos de los humedales. Al término del proyecto se espera obtener las mejores condiciones de operación del sistema de tratamiento con las plantas escogidas.

Palabras clave: Agua residual, humedal subsuperficial de flujo horizontal, *Typha*, *Sparganium Americanum*, tratamiento.

The purification processes used in drinking water treatment plants generate waste, the discharge of which causes a negative impact on the environment and the health of neighboring populations. This problem has been presented in the Public Companies of La Ceja E.S.P. The objective of the project is to evaluate a HAFSS subsurface flow artificial wetland system using *Typha* for the treatment of hazardous waste generated in water purification processes in the Public Ceramic Water Laboratory of La Ceja E.S.P. In a first stage of the project, the treatment system will be designed, in the second the best operating conditions of the system will be determined based on the hydraulic loads applied to the system with plants, and in the third, the efficiency of the system will be evaluated by measuring parameters at the entrance and exit of HAFSS, obtaining the following removal results: 69.71% Chemical Demand for COD Oxygen, 99.73% of total phosphorus, 99.73% of Orthophosphates, 54.34% of Nitrates and 54.34% of turbidity. The experimental design is based on the piston equation, which has been evaluated on the behavior of wetlands. At the end of the project it is expected to obtain the best operating conditions for the treatment system with the selected plants.

Keywords: Wastewater, Subsurface horizontal flow wetland, *Typha*, *Sparganium Americanum* treatment.

Tabla de Contenidos

1	Introducción.....	1
2	Planteamiento del problema	2
3	Justificación	5
4	Objetivos.....	6
4.1	General.....	6
4.2	Específicos	6
5	Marco teórico y conceptual	7
5.1	Parámetros del agua	7
5.1.1	Parámetros Físicos	7
5.1.2	Parámetros químicos.....	7
5.1.3	Parámetros biológicos.....	10
5.2	Residuos líquidos químicos	10
5.2.1	Residuos no peligrosos o inertes.....	11
5.2.2	Residuos Peligrosos	11
5.2.3	Residuos Químicos	11
5.3	Fitorremediación.....	11
5.4	Humedales artificiales HA.....	12
5.4.1	Humedales Artificiales de Flujo Superficial HAFS.....	13
5.4.2	Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial HAFSS.....	13
5.4.3	Funcionamiento.....	13
5.4.4	Diseño de humedal.....	13
5.5	Planta <i>Sparganium Americanum</i>	14
6	Metodología.....	15
6.1	Zona de estudio	15
6.2	Caracterización previa de residuos químicos peligrosos	15
6.3	Diseño y montaje del sistema HAFSS portátil a escala laboratorio.....	16
6.4	Muestreo	16
6.5	Determinar las condiciones de operación del HAFSS	17

	vi
7 Resultados y Análisis	19
7.1 Diseño y construcción del humedal artificial a escala laboratorio.	19
7.2 Caracterización previa de residuos líquidos químicos peligrosos	19
7.3 Cálculos del diseño del Humedal.....	23
7.4 Evaluación de la eficiencia del HAFSS	30
8 Conclusiones	36
9 Recomendaciones	37
10 Lista de referencias	38

Apéndice

Lista de tablas

Tabla 1. Cantidad de residuos líquidos generados según los procedimientos	19
Tabla 2. Resultados de las concentraciones de los parámetros analizados en los residuos líquidos caracterizados.....	22
Tabla 3. Parámetros propuestos para el proyecto y ubicación del análisis	22
Tabla 4. Resultados de concentración final aplicando la ecuación 1, de un reactor de flujo de pistón.	23
Tabla 5. Flujo y dimensiones del HAFSS.....	25
Tabla 6. Valores de Seguimiento de Conductividad en la Etapa de Estabilización del Humedal Artificial en unidades de $\mu\text{S}/\text{cm}$	29
Tabla 7. Parámetros analizados y la remoción de entrada y salida.....	31
Tabla 8. Parámetros analizados cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015	35

Lista de figuras

ix

Figura 1. Recolección de residuos líquidos en recipientes plásticos. Fuente propia	17
Figura 2. Mapa de Procesos del Sistema de Tratamiento HAFSS.....	18
Figura 3. Ubicación geográfica. Fuente: Google Earth.	26
Figura 4. Humedal natural de Sparganium Americanum en la vereda Abreu del municipio de Rionegro, Antioquia. Fuente Propia	26
Figura 5. Recolección de Sparganium Americanum. Fuente propia	27
Figura 6. HAFSS conformado con Sparganium Americanum. Fuente propia	27
Figura 7. Esquema de funcionamiento del HAFSS conformado con Sparganium Americanum. Fuente propia.	28
Figura 8. Ajuste de caudal en el sistema, entrada y salida. Fuente propia.....	28
Figura 9. Recolección de muestras, entrada y salida. Fuente propia.	30

Lista de Gráficas

x

Gráfica 1. Comportamiento en la etapa de estabilización del Humedal	29
Gráfica 2. Salida y entrada de DQO Fósforo total y Nitratos	32
Gráfica 3. Salida y entrada de Turbidez.....	33
Gráfica 4. Salida y entrada de pH	34

1 Introducción

En la mayoría de los municipios de Colombia se han venido implementando Plantas de potabilización de agua para consumo humano y así abastecer las necesidades de cada población, para la potabilización del agua se requieren una serie de procedimientos químicos y físicos los cuales son ejecutados en un laboratorio. Estos procedimientos, generan residuos químicos, los cuales requieren un tratamiento especial antes de su disposición final, o según su peligrosidad son recogidos por una entidad competente para realizar desecharlos adecuadamente. Dicha problemática se está presentando en el Laboratorio de la Planta de Agua Potable de Empresas Públicas de La Ceja, puesto que, darles un final adecuado a estos residuos genera pérdida de tiempo y dinero, además las descargas al alcantarillado pueden causar deterioro a cuerpos de agua y suelo lo cual generaría un problema mucho mayor al ambiente y a la misma salud humana. Por lo tanto, para buscar una solución a dicha problemática en el laboratorio, se optó por proponer la implementación de un Humedal Artificial.

Los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos (Remtavares, 2013).

Los humedales de flujo de agua subsuperficial suelen ser de menor costo, con la ventaja de que su mantenimiento y operación es poco complejo, y a su vez proporcionan un tratamiento efectivo en forma pasiva para la remoción de DQO con un tiempo razonable de retención (Sanabria, 2006). Para el diseño de estos humedales es primordial la implementación de macrófitas emergentes, en este caso se utilizó la planta de especie *Sparganium Americanum* una junca que ocasionalmente se encuentra creciendo en pantanos, hamacas húmedas y en los bordes de estanques y arroyos.

Este proyecto evaluó un humedal artificial de flujo subsuperficial a escala laboratorio, con la implementación de uno construido con características idóneas, para lograr un tratamiento alternativo a los residuos líquidos químicos peligrosos generados en procesos de potabilización de agua en el Laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P.

2 Planteamiento del problema

Actualmente en el mundo hay una diversidad de empresas enfocadas a desarrollar nuevos procesos y productos para el bienestar y comodidad de los seres humanos. Sin darse cuenta éstas compañías están generando una gran problemática por las actividades que realizan, originando un remanente, bien sea, material para ser reutilizado o aprovechado, o en caso de ser un residuo peligroso para dar una adecuada disposición final.

De los residuos peligrosos generados existen dos variedades, sólidos que se encuentran en menor cantidad y líquidos que han sido la mayor problemática para las fuentes hídricas y suelos por los componentes y características que poseen, además por la falta de conciencia y de sostenibilidad ambiental terminan haciendo un daño irreversible a los recursos naturales esenciales para la vida.

Existen muchos recursos naturales disponibles en el planeta tierra, pero hay uno fundamental para los seres vivos, el agua, por fortuna se puede encontrar en varios estados como son líquido, sólido y gaseoso, además, tienen varias funcionalidades según el estado que lo encontremos. De todo esto lo más importante es que este recurso se vuelve esencial para todos los seres humanos, que lo utilizan para el diario vivir tanto para la limpieza en general como para el consumo, del mismo modo, se debe tener en cuenta que el recurso debe tener unas características físicas y químicas para ser aptas para el consumo, pero dependiendo la procedencia también se puede tener certeza del uso o disposición que se debe hacer, ya que lastimosamente los seres humanos no han sabido aprovechar o darle un manejo adecuado, desperdiciando y en el peor de los casos contaminando este gran valor como lo es el agua. En pro a la protección del agua se han tomado medidas transitorias para mantener y preservar dicho recurso, se han generado actividades y se han implementado una serie de tecnologías con el fin de crear conciencia y darle valor a este recurso.

En algunos municipios de Colombia con la finalidad de avanzar en la cobertura de servicio del recurso han implementado plantas de potabilización de agua, al igual que las redes de acueducto y plantas de tratamiento de agua, sin embargo, en muchos lugares, el recurso agua es escaso, por lo cual las personas son privadas de poseer este privilegio, entonces

optan por recorrer kilómetros para poder adquirirlo, y al no poderlo hacer, se generan muchas enfermedades y muertes a raíz de ingerir aguas contaminadas¹.

La Ceja es uno de los municipios de Antioquia que cuenta con una amplia cobertura hidrográfica y con la finalidad de cubrir las necesidades de la población por medio del acuerdo 032 de 1996², creó en noviembre 22 de 1996 la Empresa de Servicios Públicos y desde entonces ha sido uno de los municipios pioneros en Colombia en tener servicios integrales para toda la comunidad; es claro que las empresas de servicios públicos a nivel nacional prestan un servicio fundamental a las comunidades y se encargan de proveer agua potable, servicio de alcantarillado y tratamiento a las aguas residuales generadas por la sociedad, además de la recolección y disposición de los residuos sólidos generados. Sin embargo, estas empresas también generan residuos tanto sólidos como líquidos debido a sus procesos internos en el desarrollo de la prestación del servicio.

En Europa desde la década de 1980 se han venido implementando procedimientos para la eliminación de residuos líquidos generados en los laboratorios (Gadea Carrera & Guardino Solá, 1991) además se creó El Convenio de Basilea para el control de los traslados transfronterizos de residuos peligrosos y su eliminación, éste fue adoptado en 1989 y entró en vigencia en 1992. Es el acuerdo ambiental mundial más completo en materia de residuos peligrosos y otros residuos (Basil, 1989). Por otro lado, Colombia con la Ley 9 de 1979, la cual fue creada para proteger el medio ambiente y se dictan medidas sanitarias, permitió ir incursionando a la creación de normatividades como el decreto 1594 de 1984, la cual regulaba los vertimientos a cuerpos de agua y alcantarillado. En la actualidad, la resolución 631 del 2015, se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones (MADS, 2015). El laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P, como empresa de servicios públicos por ley deben realizar el análisis de calidad fisicoquímico y microbiológico de

¹ OMS. (2019). Agua. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

² EEPP de La Ceja. (1996). ¿Quiénes somos?. Obtenido de: https://www.eppdelaceja.gov.co/?page_id=4954

aguas para consumo humano, sin embargo, en los procedimientos de análisis de Dureza, Sulfato, Alcalinidad, Cloro Libre, Cloro residual, Nitritos y Hierro residual³, generan residuos líquidos químicos peligrosos no solo para el agua sino también para el suelo y los seres vivos que se abastecen de éstos. Estos residuos líquidos debido a la diversidad de compuestos químicos y reactivos generan una alta complejidad a la hora de tratarlos, a diferencia de los residuos líquidos industriales y las aguas residuales domésticas los cuales se les realiza un tratamiento más sencillo. Los residuos líquidos generados en el laboratorio, se les da un manejo de acuerdo a su peligrosidad, los menos peligrosos se neutralizan y se disponen por el sistema de alcantarillado, los cuales pueden generar un impacto significativo al ambiente, además puede aumentar la carga contaminante que es procesada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales; y los residuos de mayor complejidad son entregados a un gestor ambiental para su disposición final. Dentro de la visión del laboratorio, se encuentra la certificación del mismo, por lo cual deben dar cumplimiento a la legislación ambiental buscando alternativas bajo costo y amigable con el medio ambiente que les permita mitigar los impactos causados por los residuos generados por cada procedimiento.

³ Laboratorio de aguas. (2018). Procedimientos de tratamiento de aguas para consumo humano. Obtenidos físicamente.

3 Justificación

Los humedales artificiales construidos son excelentes sistemas de tratamiento de aguas, utilizados comúnmente para el tratamiento de aguas residuales, son viables económicamente porque no requieren de mantenimiento continuo, ni personal vigilando y mucho menos un consumo de energía eléctrica, además se ha comprobado una capacidad para la remoción de contaminantes. Son reconocidos como sistemas apropiados para la eliminación de materia orgánica como DBO_5 y SS del 92% al 95%, y de nutrientes entre 74% a 79%. (Sanabria, 2006). La utilización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domesticas tienen menor costo y es un método sofisticado en cuanto a condiciones de operación y mantenimiento en comparación a los sistemas de tratamientos convencionales. También, se han implementado para tratar aguas de diferentes tipos, como residuos de colorantes textiles, aguas con compuestos cancerígenos y lixiviados generados en rellenos sanitarios. (Gutiérrez Elejalde, 2017)

En el 2014 se realizó la segunda conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua, realizada en Morelia, Michoacán, México, en donde se publicaron estudios con humedales y los residuos líquidos productos de diferentes actividades, en el proyecto “Humedales subsuperficiales de flujo horizontal plantados con *Zantedeschia aethiopica* e *Iris sibirica* para la remoción de arsénico de aguas para consumo humano.” Se evidenció una remoción de arsénico en un $94.42\% \pm 0.54\%$ al tercer día de retención hidráulica. (Paredes Cuervo & Rivas Hernández, 2014). Estos resultados encontrados en la conferencia dan soporte para usar un humedal artificial como tratamiento de los residuos líquidos generados en el laboratorio de empresas Públicas de la Ceja.

En el presente estudio, se pretende diseñar y construir a escala laboratorio un sistema de HAFSS, evaluando la eficiencia del método, buscando generar una alternativa de solución en el tema del tratamiento de los residuos líquidos peligrosos y disminuyendo el impacto que éstos producen. Además, se busca generar conocimiento en el diseño, construcción, manejo, operación y viabilidad de implementación del sistema de HAFSS a escala laboratorio tanto en la comunidad educativa de la UNAD como en la empresa de servicios

públicos de la ceja, aportando en la apropiación del conocimiento científico y buscando alternativas ambientalmente sostenibles para la región.

4 Objetivos

4.1 General

Evaluar un humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS) utilizando *Typha* para el tratamiento de residuos líquidos químicos peligrosos generados por los procedimientos de potabilización de agua en el Laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P.

4.2 Específicos

- Diseñar y construir un humedal artificial a escala laboratorio para el tratamiento de los residuos químicos generados por los procedimientos de potabilización de agua en el laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P.
- Determinar las mejores condiciones de operación del HAFSS usando como afluente los residuos químicos generados por los procedimientos de potabilización de agua en el Laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P.
- Evaluar la eficiencia del HAFSS para aguas contaminadas con residuos químicos generados por los procedimientos de potabilización.

5 Marco teórico y conceptual

5.1 Parámetros del agua

Son variables que permiten determinar la calidad del agua según una normatividad, los parámetros pueden ser físicos, químicos y biológicos.

5.1.1 Parámetros Físicos

Son las características del agua que pueden ser definidos por cuatro de los cinco sentidos, los cuales son el olfato, que permite determinar si el agua tiene olor desagradable; la vista, puesto que el agua no tiene color, al poseer un color determinamos que no es de buena calidad; el tacto, permite determinar su textura; y el gusto, nos permite determinar si tiene buen sabor para consumirla. Dentro de los parámetros que evalúan la calidad del agua sin usar los sentidos podemos encontrar la turbidez, sabor, olor y conductividad.

5.1.1.1 Turbidez

Éste parámetro indica la existencia de partículas suspendidas en el agua, las cuales pueden ser microorganismos, compuestos orgánicos, pesticidas y metales pesados, para medir la turbidez se utiliza un equipo llamado turbidímetro el cual hace pasar luz por el agua turbia y después mide la luz dispersada. Las unidades de medida son Unidades Nefelométricas de Turbidez NTU. (Marcó, Azario, Metzler, & García, 2004)

5.1.1.2 Sabor y olor

El agua se caracteriza por ser inodora e insípida, lo que significa que no debería tener olor ni sabor, sin embargo con los tratamientos que permiten volverla apta para consumo humano pueden realizar pequeños cambios en su sabor. Pero si se encuentra olor y sabores muy pronunciados en el agua de consumo es indicativo que puede tener algo que la esté afectando. (Heraldo, 2017)

5.1.2 Parámetros químicos

Son parámetros con los cuales se identifica si ha sido contaminada el agua con residuos químicos y también la posible proveniencia de éstos residuos. Dentro de los parámetros

químicos encontramos los siguientes: pH, dureza, Sólidos Suspendidos SS, Sólidos Disueltos Sd, Demanda Química de Oxígeno DQO, Oxígeno Disuelto OD, Sulfatos, Alcalinidad, Fósforo P, Nitrógeno total (Nitritos y Nitratos), Cloruros, Hierro Fe, Cromo Cr, entre otros.

5.1.2.1 Potencial de Hidrógeno pH

Es la cantidad de Hidrógeno que puede darse o recibirse en una reacción química, existe una escala de 0 a 14, en donde se definen que tipo de pH poseen, generalmente las sustancias ácidas el pH va desde 0 a 7, las neutrales de 7 y las básicas de 7 a 14. (García Bello, 2019)

5.1.2.2 Dureza

Se refiere a la cantidad de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua. Estos minerales tienen su origen en las formaciones rocosas calcáreas, y pueden ser encontrados, en mayor o menor grado, en la mayoría de las aguas naturales. (Rodríguez, 2010)

5.1.2.3 Sólidos Suspendidos SS

Son todos los sólidos que se quedan retenidos en los filtros, en su gran mayoría son de origen orgánico y son sedimentables y coloidales. Principales responsables de la turbiedad en el agua. (España, Quintero, & Reyes, 2017)

5.1.2.4 Sólidos Disueltos Sd

Son los sólidos que pasan a través del filtro más homogéneo y clasificable, los sólidos disueltos son en su mayoría son sales inorgánicas y de éstas, las mayoritarias son sales como los cloruros, sulfatos, sodio y calcio. (España, Quintero, & Reyes, 2017)

5.1.2.5 Demanda Química de Oxígeno DQO

Representa una medida de toda la materia orgánica e inorgánica presente en disolución y suspendida que puede ser químicamente oxidada, por la acción de agentes oxidantes, bajo condiciones ácidas y se mide como miligramos de oxígeno equivalentes a la fracción

orgánica disuelta y suspendida por litro de disolución, agua residual. (Ramírez Burgos, 2008)

5.1.2.6 Oxígeno Disuelto OD

Es la cantidad de oxígeno que esta disuelta en el agua, nos indica que tan contaminada con Materia Orgánica está el agua, hallar una concentración de OD es indicativo de vida vegetal o animal en el de agua. (Peña Pulla, 2007)

5.1.2.7 Sulfatos

Los sulfatos son minerales cuya unidad estructural fundamental son los grupos $(SO_4)^{-2}$, pudiendo estar enlazados entre sí por cationes de aluminio, sodio, calcio, potasio, magnesio y hierro. Son bastante comunes en la corteza terrestre y entre ellos destaca la anhidrita y el yeso. (Moreno Ramón, Ibáñez Asensio, & Gisbert Blanquer, 2007)

5.1.2.8 Alcalinidad

Hace referencia a la capacidad del agua para neutralizar ácidos, y puede definirse rigurosamente, como el nombre de moles de protones equivalentes al exceso de aceptores de protones. (Fernández, 2012)

5.1.2.9 Fósforo P

Nutriente esencial para los organismos vivientes; es considerado como un parámetro crítico en la calidad de aguas debido a su influencia en el proceso de eutropificación, de ahí la importancia de disponer de las técnicas analíticas y de muestreo adecuadas para la determinación de la concentración de las diferentes especies que pueden estar disueltas en el agua, adsorbidas sobre partículas o asociadas con organismos acuáticos. (Sánchez de Fuentes, 2001)

5.1.2.10 Nitrógeno total (Nitritos y Nitratos)

Los nitritos se forman por la oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno en el medio acuático o terrestre, o por la reducción bacteriana del nitrato.

Los nitratos se derivan de la descomposición natural, por microorganismos, de materiales nitrogenados orgánicos como las proteínas de las plantas, animales y excretas de animales. (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2003)

5.1.2.11 Cloruros

Son sales del suelo que se disuelven en el agua, siendo escasa su presencia en concentraciones altas en aguas superficiales, excepto en aquellas fuentes provenientes de terrenos salinos o de acuíferos con influencia de corrientes marinas. (Fernández Valle, 2012)

5.1.2.12 Metales pesados

Son componentes de la corteza terrestre, actúan en los organismos en sus funciones bioquímica y fisiológica, algunos son imprescindibles para el mantenimiento de los sistemas bioquímicos de los seres vivos, puede actuar también como potentes tóxicos, para los seres humanos y los ecosistemas. (Ferré, 2007)

5.1.3 Parámetros biológicos

Son los parámetros que permiten identificar si existe contaminación por agentes biológicos u orgánicos. Dentro de los parámetros biológicos podemos encontrar la Demanda Biológica de Oxígeno DBO.

5.2 Residuos líquidos químicos

Los residuos líquidos químicos son generados por actividades y procesos en donde utilicen elementos y sustancias químicas, entre éstos, los laboratorios de aguas. Estos residuos líquidos pueden causar un impacto negativo el medio ambiente y a la salud de las personas. (Benítez, Ruiz, Obando, Miranda, & Gil, 2013).

En la organización de todo laboratorio la gestión de los residuos líquidos químicos es un aspecto imprescindible, porque incluye un adecuado control, tratamiento y disposición de los residuos generados. El tipo de tratamiento o disposición depende, de las características y peligrosidad de los mismos, así como de la oportunidad de recuperación, de reutilización

o de reciclarlo. De acuerdo a las características de los residuos anteriormente descritas, estos se pueden clasificar en:

5.2.1 Residuos no peligrosos o inertes

Son aquellos residuos que por su composición no reaccionan químicamente y no presentan riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

5.2.2 Residuos Peligrosos

Son aquellos residuos producidos con alguna de las siguientes características: infecciosos, combustibles, inflamables, explosivos, reactivos, radiactivos, volátiles, corrosivos y tóxicos; los cuales pueden causar daño a la salud humana y al medio ambiente.

5.2.3 Residuos Químicos

Son los restos de sustancias químicas que dependiendo de su concentración y tiempo de exposición tienen el potencial para causar la muerte, lesiones graves o efectos adversos a la salud y el medio ambiente. (Loayza Pérez, 2007)

5.3 Fitorremediación

Uso del metabolismo de las plantas y los microorganismos que la rodean para neutralizar, eliminar o descomponer residuos peligrosos y metales pesados generados por diferentes actividades que afectan el agua o el suelo, y así mismo, puede causar efectos adversos al medio ambiente o la salud. Los diferentes tipos de Fitorremediación, (Perdomo, 2018) nos dice: “son según el tipo de contaminante, el grado de contaminación del lugar y el nivel de remoción o descontaminación que se necesite, las técnicas de Fitorremediación se utilizan como mecanismo de contención de contaminantes (técnicas de fitoestabilización, rizofiltración), o como mecanismo de eliminación (técnicas de fitoextracción, fitodegradación y fitovolatilización).”

Entre las más comunes está la Fitoestabilización en la cual la planta absorbe el contaminante y lo bloquea en su interior, impidiendo que esté disponible para el medio ambiente. Otra es la Rizofiltración, sucede cuando en las raíces de las plantas se reproducen microorganismos que ayudan a descomponer compuestos peligrosos y después ser metabolizados por la planta. También encontramos la Fitoextracción en donde las plantas capturan o atrapan el contaminante, pero al final se debe disponer la planta incinerándola y ubicándola en celdas de seguridad o también usando una técnica donde se aprovecha por

ejemplo los metales y se denomina fitominería. Así mismo encontramos la Fitodegradación donde la planta posee un sistema enzimático el cual descompone, oxida o mineraliza los compuestos con más complejidad a menos complejidad. Se emplea, para degradar pesticidas e hidrocarburos. Por último, tenemos la Fitovolatilización, en donde la planta absorbe un contaminante y lo expulsa en su forma gaseosa.

5.4 Humedales artificiales HA

Los humedales artificiales son sistemas de Rizofiltración y están compuestos de sustrato, vegetación y agua, construidos por el hombre para utilizar una de sus propiedades, depuración de aguas residuales (Remtavares, 2013). Muchos investigadores en el transcurso de los años han comprobado los beneficios de estos sistemas en el tratamiento de aguas y residuos líquidos en general. Comúnmente se clasifican en dos tipos, Humedales Artificiales de Flujo Superficial HAFS y Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial HAFSS.

El humedal artificial de flujo subsuperficial está diseñado especialmente para el manejo y el tratamiento de diferentes tipos de agua residual, o durante la fase final de un tratamiento que implique cambios o contaminación de las características naturales del agua antes de ser vertidas a cuerpos de aguas; está compuesto típicamente en forma de lecho o canal con un medio adecuado y el nivel de agua, por diseño, debe encontrarse por debajo de la superficie del medio.

Están fundamentados en principios básicos tales como, la actividad bioquímica de microorganismos, aporte de oxígeno por parte de los vegetales en el transcurso del día y el apoyo físico que brinda el lecho como un soporte para las plantas, aparte de cumplir la función de filtro.

Todos los elementos que forman el lecho o canal eliminan los materiales disueltos y suspendidos en el agua residual, biodegradan toda la materia orgánica por medio de bacterias que hacen uso de la superficie del lecho filtrante para adherirse y crecer, creando una capa bacteriana lo que garantiza una estabilidad en la población y sin permitir que estas sean arrastradas hasta la salida. (Torres et. Al., 2012)

5.4.1 Humedales Artificiales de Flujo Superficial HAFS

Son humedales caracterizados por ser en forma de canal de poca profundidad en donde se arraigan la vegetación y el paso del agua está en contacto con el aire, permitiendo el crecimiento de plantas flotantes y sumergidas las cuales facilitan la eliminación de microorganismos y contaminantes. Es usada en restauración de ecosistemas.

5.4.2 Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial HAFSS

Se caracterizan por tener un lecho poroso de grava o tierra, en donde se crea una película microbiana la cual ayuda a descomponer la materia, además se divide en dos según su flujo, vertical u horizontal.

5.4.3 Funcionamiento

Consiste en el ingreso de un volumen de residuo líquido en un tiempo determinado al humedal, y este volumen tiene un tiempo de retención para ser depurado, además, también debe haber un volumen de salida igual al ingresado para mantener el nivel o la profundidad efectiva.

5.4.4 Diseño de humedal

El diseño del HAFSS, incluye básicamente los aspectos de dimensionamiento del volumen que va a contener las plantas, altura, ancho y largo, además, de otras especificaciones físicas como es el caudal o flujo, concentración y tiempo de retención, también se tiene en cuenta la ecuación de flujo de pistón, ver numeral 7.3, la cual nos permite determinar el funcionamiento del humedal.

5.4.4.1 Concentración (C)

Es la cantidad de soluto en una solución (García, 2002), en el caso del humedal los contaminantes están en unidades de masa sobre volumen.

5.4.4.2 Volumen (V)

Corresponde al espacio que ocupa un cuerpo (TPL Químico, 2015), y sus unidades de medida puede ser, litros y metros cúbicos.

5.4.4.3 Caudal (Q)

Es la cantidad de fluido que pasa por determinado espacio en un determinado tiempo (Pérez Porto & Merino, 2010).

5.4.4.4 Tiempo de retención

Es el tiempo que debe permanecer el volumen de residuo líquido para permitir una depuración por las plantas.

5.5 Planta *Sparganium Americanum*

Pertencene al reino *Plantae*, de división *Magnoliophyta*, de clase *Liliopsida*, en el orden *Poales*, en la familia *Typhaceae*, y de género *Sparganium*.

Es una planta acuática y también semiterrestre, su tallo puede crecer hasta un metro, sus raíces son fibrosas, sus hojas son planas con una vena en el centro y una base en forma de vaina. Las flores son esféricas de color amarillo o blanco, además es unisexual, con su parte femenina abajo y la masculina arriba. Posee un fruto seco, el cual atrae aves acuáticas.

(Staff, 2015)

6 Metodología

El tipo de estudio empleado es experimental, partiendo de la exploración de tipo cuantitativo y cualitativo, en la cual se realizó la búsqueda de información primaria y secundaria, como fuentes primarias del laboratorio tenemos el tipo de residuos que se generaban de las actividades básicas de este, y su disposición final; y la búsqueda en análisis de estos residuos en un laboratorio certificado que arroja resultados correctos y de allí tener una base que genere una mejor confiabilidad para dar comienzo al diseño y al tipo de residuos que se pretendían remover con la implementación del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal. Para el desarrollo experimental de la investigación se trabajó un estudio cuantitativo en el cual se realizaron ensayos de degradación de la Materia orgánica presente en el agua residual.

6.1 Zona de estudio

Se realiza el estudio en Laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P., en donde se ejecutan pruebas de la calidad del agua para consumo y se generan los residuos líquidos en los procedimientos de análisis de Dureza, Sulfato, Alcalinidad, Cloro Libre, Cloro residual, Nitritos y Hierro residual, esos residuos líquidos son utilizados para el HAFSS. La ubicación del laboratorio es en las coordenadas 6°1'58.49"N y 75°26'21.08"O. La Ceja se caracteriza por poseer clima frío con una temperatura media de 18 grados Celsius y una altura sobre de 2,143 m.s.n.m., lo cual indica que esas van a ser las condiciones de presión atmosférica y de temperatura a la que es acondicionado el humedal.

6.2 Caracterización previa de residuos químicos peligrosos

Se realizó la caracterización de los residuos Líquidos por medio de una visita preliminar al laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja, en la cual se logra la recolección de información tanto de los procesos químicos realizados en el laboratorio como del tipo de residuos y del manejo de la disposición final de estos.

63 Diseño y montaje del sistema HAFSS portátil a escala laboratorio

Se realizó una recopilación y análisis de la información existente referente al funcionamiento de los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) utilizados para el tratamiento de aguas residuales. A partir de la información recolectada y analizada, se identificó el tipo de planta con la cual se pretendía trabajar, así mismo si se encontraba en un humedal de la localidad y si era eficiente para la remoción de ese tipo de residuos. Se diseñó un HAFSS a escala laboratorio, de acuerdo con el volumen de residuos que se encontró en la caracterización.

64 Muestreo

Los residuos peligrosos resultantes de los procedimientos del laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P se recolectaron y clasificaron en recipientes plásticos con tapa, etiquetados según tipo y procedimiento realizado en el laboratorio. Ver figura 1. Para la caracterización inicial, se tomó una muestra puntual de todos los residuos generados y recolectados. En la fase de experimentación se tomaron dos muestras puntuales a la entrada y salida del humedal, y éstas se enviaron a análisis al laboratorio contratado.

Para el acondicionamiento del humedal, se tomó muestras en la mañana y en la tarde de lunes a viernes durante cuatro semanas del parámetro conductividad a la salida del humedal.



Figura 1. Recolección de residuos líquidos en recipientes plásticos. Fuente propia.

65 Determinar las condiciones de operación del HAFSS

Para la determinación de las mejores condiciones de operación, se realizaron ensayos y acondicionamiento hidráulico de los caudales de entrada y salida. El humedal se acondiciono durante un mes tomando la conductividad de Lunes a Viernes dos veces en el día, una en la mañana y otra en la tarde. Para el acondicionamiento del humedal se tomó un volumen de residuos líquidos y se recircularon para que el material biológico que comprendía el humedal se adaptara a los residuos líquidos a trabajar, aprovechando para realizar la calibración hidráulica del caudal de trabajo del humedal.

6.6 Evaluar la eficiencia del HAFSS

Se realizaron ensayos experimentales por triplicados en el Laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P. para esto se tomaron 7.650 ml de agua contaminada y se homogenizó, de allí se procedió a depositarlo en el tanque de entrada del sistema. Luego, se abren las válvulas de entrada y salida de tal manera que el humedal comenzara a funcionar; posterior a esto se tomaron las muestras que se llevan a un laboratorio acreditado con todos los cuidados y condiciones que solicita la norma.

A continuación, en la siguiente figura se muestra el proceso de tratamiento con el humedal.

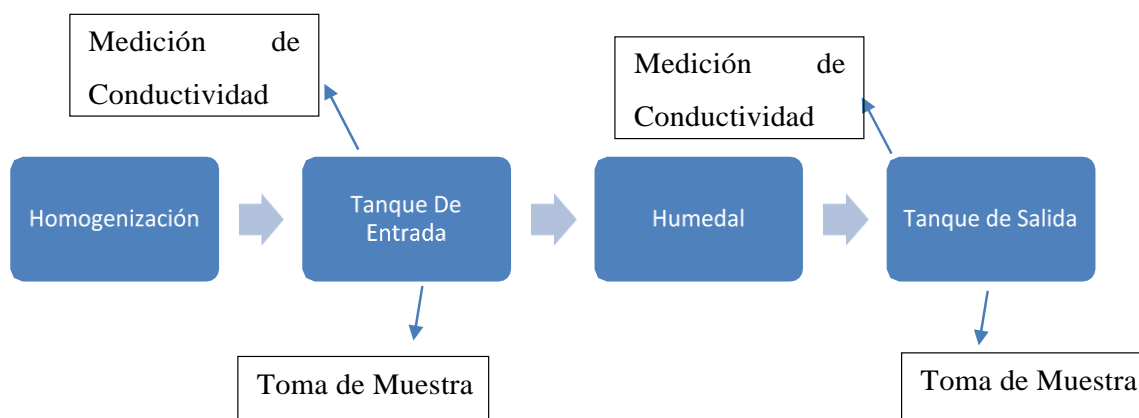


Figura 2. Mapa de Procesos del Sistema de Tratamiento HAFSS

7 Resultados y Análisis

7.1 Diseño y construcción del humedal artificial a escala laboratorio.

Para la caracterización previa de los residuos líquidos tratados, se realizaron según cada procedimiento de análisis de aguas del laboratorio, del cual se obtuvo la información registrada en la tabla 1, además se identificó la cantidad de residuos líquidos generados.

7.2 Caracterización previa de residuos líquidos químicos peligrosos

Tabla 1. Cantidad de residuos líquidos generados según los procedimientos.

Procedimiento	Residuos generados	Volumen del residuo
Dureza	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ácido nítrico, HNO₃, al 10% ▪ Cloruro de Magnesio Hexahidratado (MgCl₂•6H₂O) ▪ Sal disodica EDTA ▪ Amoníaco concentrado (NH₄OH) ▪ Sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO₄•7H₂O) ▪ Hidróxido de sodio (NaOH) ▪ Indicador de negro de eriocromo T, sal sódica del ácido 1-(1- hidroxí-2-naftilazo)-5-nitro-2-naftol-4-sulfónico. ▪ Aminoetanol ▪ Ácido clorhídrico concentrado (HCl.) ▪ Solución Estándar de Dureza 	4,6 litros
Sulfato	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solución estándar Na₂SO₄ trazable (1000 mg SO₄/L) 	5,1 litros

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solución de 100 mg/L de sulfatos: ▪ Soluciones estándar de sulfato ▪ Cloruro de Bario RA. ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Solución Buffer A 	
Alcalinidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carbonato de sodio patrón primario o reactivo especial <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ácido sulfúrico ▪ Soluciones Buffer estándar de pH 4.00 y 7.00 ± 0.01 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verde de bromocresol ▪ Rojo de metilo 	4,5 litros
Cloro libre y Cloro residual con kits spectroquant	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fosfato dibásico de sodio anhidro (Na_2HPO_4) ▪ Fosfato monobásico de potasio anhidro (KH_2PO_4) ▪ Sal disódica del ácido etilendiamina tetra-acético dihidratado (EDTA). ▪ Sulfato anhidro de N,N-dietil-p-fenilendiamina (Oxalato de DPD). Pueden emplearse también el sulfato pentahidratado de DPD y oxalato de DPD. ▪ Sulfato ferroso amoniacal hexahidratado (SFA) [$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] 	5 litros

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄) ▪ Ácido fosfórico concentrado (H₃PO₄) ▪ Difenilaminsulfonato de bario [(C₆HSNCH₆H₄-4SO₃)₂Ba] <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Glicina ▪ Arsenito de sodio (NaAsO₂) ▪ Tioacetamida (CH₃CSNH₂) ▪ dipropil-p-fenilendiamina (DPD) 	
Nitritos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ácido Clorhídrico concentrado ▪ Hidroxido de Amonio 1N ▪ N- (1-naftil)-etilendiamina diclorhidrato 2.5.3.1.4 sulfanilamida ▪ solución patrón trazable de Nitritos de 1000 ppm 	4,5 litros
Hierro residual con kits spectroquant	<ul style="list-style-type: none"> ▪ tioglicolato ▪ Hipoclorito 	5 litros

Los resultados de la caracterización de residuos líquidos son los descritos a continuación:

Tabla 2. Resultados preliminares de las concentraciones de los parámetros analizados en los residuos líquidos caracterizados

Parámetros	Concentración
pH	6.89 ± 0.01
Temperatura	22.5 ± 0.1°C
Oxígeno disuelto	5.95 ± 0.01 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO) *	2638 ± 216.1 mg O ₂ /L
Fósforo Total (P) *	1204 ± 78.8 mg P/L
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	18.3 ± 1.24 mg N-NO ₃ ⁻ /L
Cloruros (Cl ⁻) *	1049.8 ± 54 mg Cl ⁻ /L
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	4770 ± 530.6 mg SO ₄ ²⁻ /L
Aluminio (Al)	< 0.050 ± ND* mg Al/L
Hierro (Fe)	1.65 ± ND* mg Fe/L
Turbiedad	254 ± 0.01mg/L

*No Determinado

Luego de caracterizar los residuos, se escogieron los contaminantes a remover en el HAFSS. Ver tabla 3.

Tabla 3. Parámetros propuestos para el proyecto y ubicación del análisis.

Parámetros	Ubicación del análisis
Ph	En sitio
Conductividad	En sitio
Temperatura	En sitio
Demanda Química de Oxígeno (DQO) *	Laboratorio de análisis
Fósforo Total (P) *	Laboratorio de análisis
Ortofosfatos	Laboratorio de análisis
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	Laboratorio de análisis
Turbiedad	En sitio

De acuerdo con lo observado en la tabla 3, se escogieron estos parámetros debido a la accesibilidad de costos y ofertas de los laboratorios acreditados. Otro factor fundamental fue que la caracterización inicial que se realizó a los residuos líquidos peligrosos muestra que en su mayoría se pueden clasificar como materia orgánica (DQO), y algunos nutrientes como Fosforo (ortofosfato y fosforo total) y Nitrógeno (nitratos), y material particulado o suspendido en termino de Turbidez.

7.3 Cálculos del diseño del Humedal

Para determinar la eficiencia teórica de remoción del HAFSS, se utilizó la fórmula para diseñar un reactor de flujo de pistón, los cuales son usados normalmente para estos tipos de humedal de acuerdo a varias pruebas laboratorio realizadas en Norteamérica, (Díaz, Zamora, Caselles, & León, 2013).

$$C_e = C_o * e^{(-K * t)} \text{ Ecuación 1}$$

En dónde:

C_e, es la concentración de salida

C_o, es la concentración inicial

K, es la constante de remoción

t, es el tiempo de retención hidráulica

Una vez obtenidas las concentraciones iniciales, tomamos de referencia un contaminante, el valor más alto, el de los sulfatos, definimos un tiempo de retención de siete (7) horas y una constante de remoción (K) de 0.107 d⁻¹ según Romero Rojas en su libro “Tratamiento de aguas residuales” para la aplicación de la ecuación 1, y así obtuvimos los resultados registrados en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de concentración final aplicando la ecuación 1, de un reactor de flujo de pistón.

Parámetro	C ₀ (mg/L)	tiempo de retención hidráulica (h)	K constante de remoción d ⁻¹	K constante de remoción h ⁻¹	Concentración final
Sulfatos	2638.000	7	0.107	0.00445833	2556.944

Una vez definido el tiempo de retención, definimos un volumen de 10 L a tratar de residuos líquidos para determinar el caudal Q, y se emplea la ecuación 2.

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

Q, Caudal o flujo de residuos líquidos

V, Volumen a tratar

t, tiempo de retención hidráulica

Una vez hallado el Q, definimos el área superficial del humedal aplicando una profundidad efectiva de 0.14 m, en la ecuación 3.

$$A_s = \frac{Q}{H_e} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

A_s, área superficial

Q, Caudal o flujo de residuos líquidos

H_e, profundidad efectiva de 0.14m

Después de hallar el A_s, se hallan las dimensiones del humedal, preferiblemente en forma rectangular para garantizar el flujo horizontal, y se aplica la ecuación 4.

$$A_s = L * W \quad \text{Ecuación 4}$$

En dónde,

A_s, área superficial

L, largo del humedal

b, ancho del humedal.

En la tabla 5, se registran los cálculos de las ecuaciones 2, 3 y 4.

Tabla 5. Flujo y dimensiones del HAFSS.

Q (L/h)	V (L)	V(m ³)	Profundidad con borde (m)	He Profundidad efectiva	As Área superficial (m ²)	L Largo (m)	b Ancho (m)
1.4286	10	0.01	0.245	0.14	0.0714	0.34	0.210

En la profundidad efectiva, va incluido una capa de 5 cm de arena con material propio del humedal original.

Se adquirió la planta en la ubicación geográfica del humedal natural, ubicada en la vereda de Abreu del municipio de Rionegro del departamento de Antioquia, Colombia y se puede llegar en las siguientes coordenadas: 6° 9'37.20"N, 75°23'29.40"O. En la figura 3, se observa la ubicación geográfica.

También se consultó la ubicación de la planta utilizada en el humedal, y se obtuvo apoyo técnico del herbario de la Universidad de Antioquia para identificar la planta como *Sparganium Americanum*. Después, el humedal se construyó en las instalaciones del Laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P.

En la figura 4, se observa el humedal natural y en la figura 5, la recolección de las plantas.



Figura 3. Ubicación geográfica. Fuente: Google Earth.



Figura 4. Humedal natural de *Sparganium Americanum* en la vereda Abreu del municipio de Rionegro, Antioquia. Fuente Propia.



Figura 5. Recolección de *Sparganium Americanum*. Fuente propia

Además, se empleó un recipiente impermeable con las dimensiones calculadas, en la profundidad efectiva se instaló una grava promedio de 2 a 5cm para permitir el crecimiento de las raíces. Ver figura 6.



Figura 6. HAFSS conformado con *Sparganium Americanum*. Fuente propia.

En la siguiente figura se muestra el diseño del Humedal ya construido.

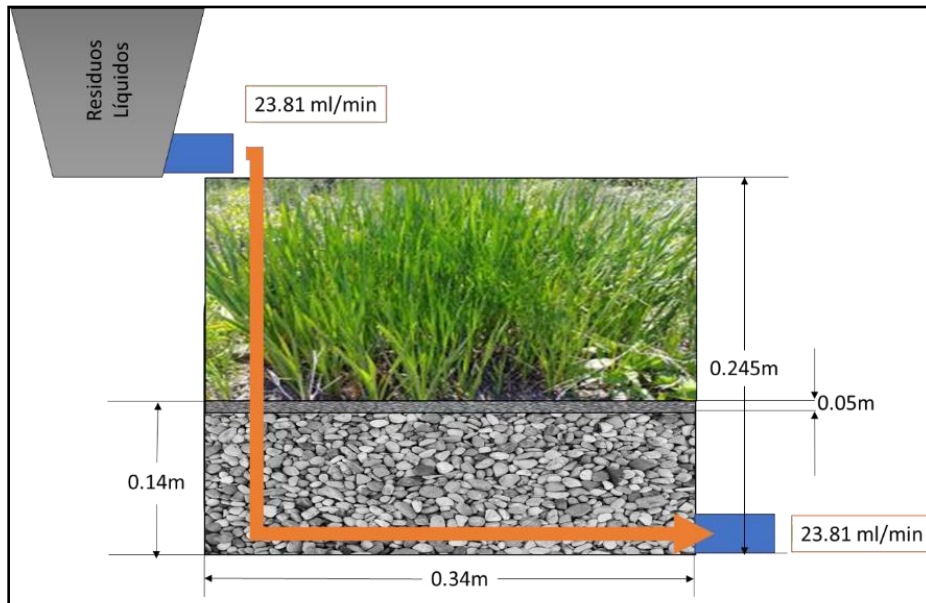


Figura 7. Esquema de funcionamiento del HAFSS conformado con *Sparganium Americanum*. Fuente propia.

Para efectuar la operación del sistema laboratorio de HAFSS, se llena un recipiente con 7.650 ml de los residuos líquidos a tratar, se homogenizan, luego se abre la válvula de entrada a un caudal de 23.81 ml por minuto, de igual manera se abre la válvula de salida al mismo caudal para que se mantenga el nivel del humedal, ver figura 8.



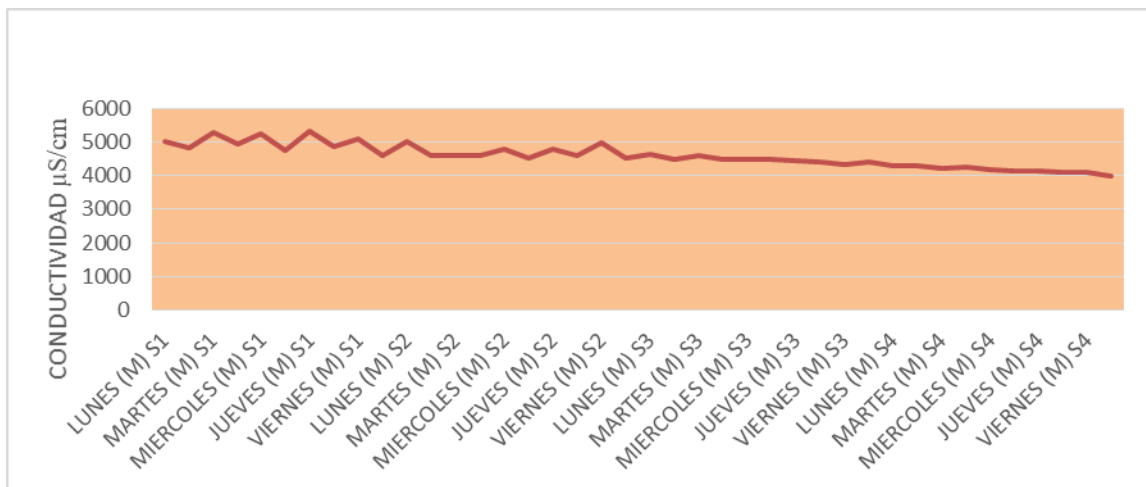
Figura 8. Ajuste de caudal en el sistema, entrada y salida. Fuente propia.

- **Etapa de Acondicionamiento hidráulico, estabilización fisicoquímica y biológica del Humedal**

Una vez definidos los parámetros de trabajo, se tomó muestra de los residuos líquidos y se envió al laboratorio acreditado para obtener resultados de las variables correspondientes. Además, se realizó medición de los demás parámetros en sitio, los cuales se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de Seguimiento de Conductividad en la Etapa de Estabilización del Humedal Artificial en unidades de $\mu\text{S}/\text{cm}$

DÍA	SEMANA 1		SEMANA 2		SEMANA 3		SEMANA 4	
	8:00a.m	5:00p.m	8:00a.m	5:00p.m	8:00a.m	5:00p.m	8:00a.m	5:00p.m
Lunes	5.000	4.830	5.000	4.590	4.640	4.490	4.290	4.300
Martes	5.300	4.950	4.990	4.600	4.590	4.500	4.220	4.250
Miércoles	5.250	4.760	4.800	4.530	4.500	4.470	4.190	4.150
Jueves	5.340	4.870	4.780	4.610	4.460	4.420	4.130	4.100
Viernes	5.100	4.600	4.980	4.510	4.390	4.400	4.100	4.000



Gráfica 1. Comportamiento en la etapa de estabilización del Humedal

En la gráfica 1, se puede observar el comportamiento del parámetro de conductividad en el humedal durante cuatro semanas, donde se tomaban los datos de Lunes a Viernes en dos horas específicas del día en la mañana a las 8:00 a.m. y en la tarde a las 5:00 p.m., los días

sábados y Domingos no se tomaron datos con la finalidad de observar los cambios que habían de viernes a Lunes , concluyendo que estos no cambiaron de manera radical , pues se logra evidenciar que fueron muy variables durante las primeras dos semanas, en las otras dos semanas se fue estabilizando en un mismo rango identificando que el sistema se encontraba apto para el ensayo final; como resultado de que el humedal es acorde a las condiciones de diseño y adecuado funcionamiento del sistema.

7.4 Evaluación de la eficiencia del HAFSS.

Después de realizar los ensayos experimentales de la eficiencia de remoción del Humedal se obtuvieron los siguientes resultados:

Se recolectaron las muestras para los análisis de la entrada y salida del sistema, ver figura 9.



Figura 9. Recolección de muestras, entrada y salida. Fuente propia.

Para la evaluación del sistema se realizaron los análisis mostrados en la tabla 7.

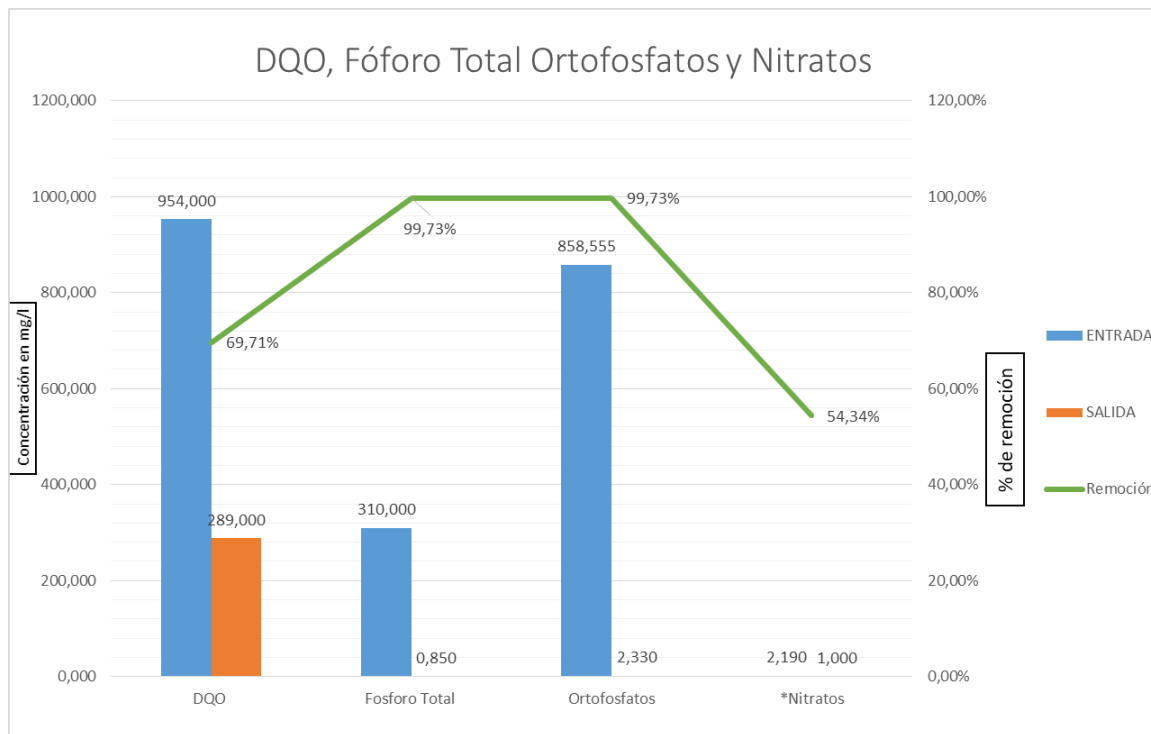
Tabla 7. Parámetros analizados y la remoción de entrada y salida.

Parámetro	Entrada		Salida		Remoción
	C ₀ (mg/l)	U ± (mg/l)	C ₀ (mg/l)	U ± (mg/l)	
DQO	954.000	ND	289.000	ND*	69.71%
Fosforo Total	310.000	20.283	0.850	0.056	99.73%
Ortofosfatos	858.555	56.176	2.330	0.152	99.73%
Nitratos	2.190	0.028	1.000	ND*	54.34%
**Turbidez	147.000 NTU	0.01 NTU	69.700 NTU	0.01 NTU	52.59%
**pH	7.058	0.01	7.104	0.01	-0.65%

*No Determinado

** Diferentes unidades de medida

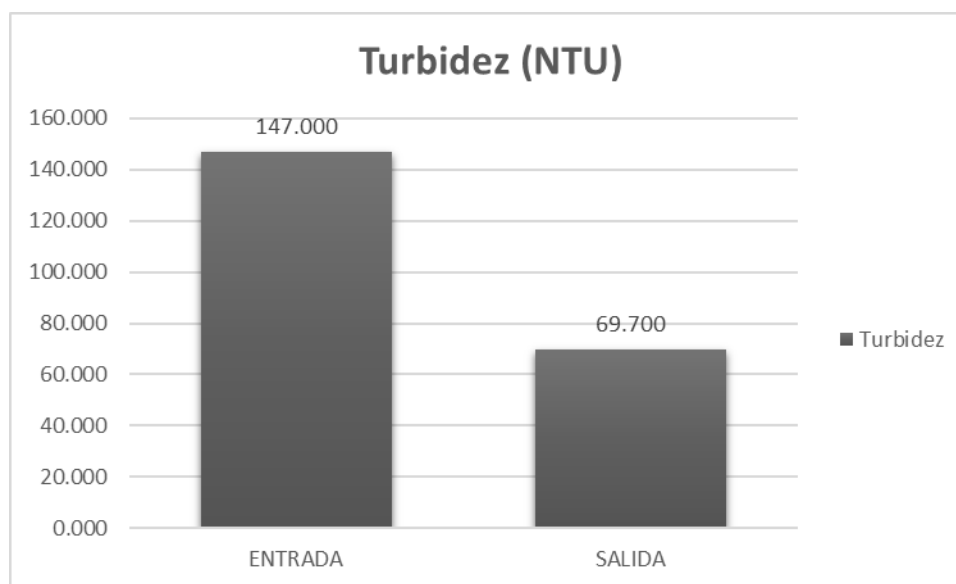
En la tabla 7, se aprecia las remociones en los parámetros de DQO, Fosforo total, Ortofosfatos, nitratos y la turbidez, con un valor de 69.71%, 99.73%, 99.73%, 54.34%, y 52.59% respectivamente. Indicando a modo general HAFSS arrojo buenos porcentajes de remoción para el tipo de residuo tratado. En cuanto al pH se mantuvo estable durante todas las fases experimentales con el Humedal.



Gráfica 2. Salida y entrada de DQO Fósforo total y Nitratos

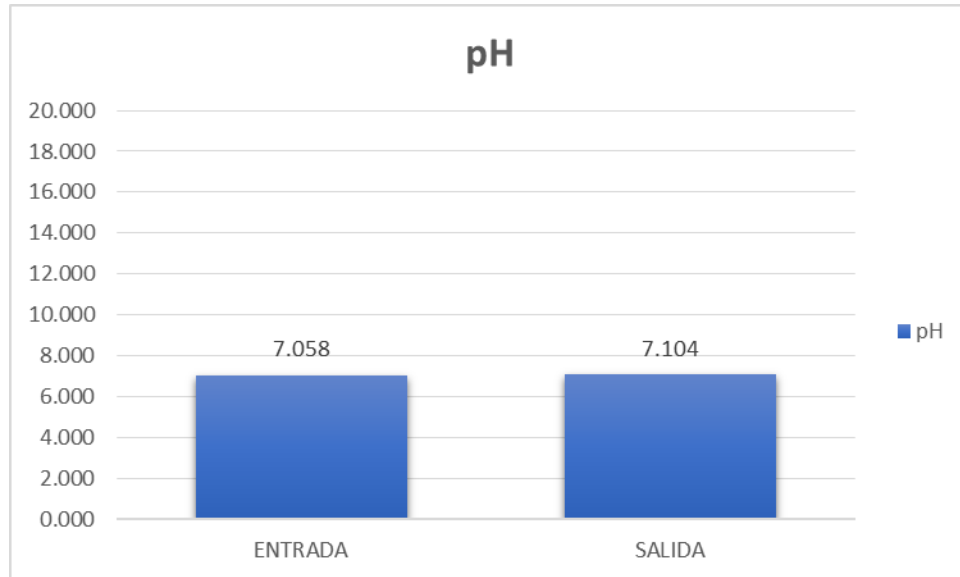
En la gráfica 2, se observa una disminución de DQO de 665mg/L lo que equivale a una remoción de 69.71%, lo cual pudo ser debido adsorción y absorción existente entre las raíces, microorganismos, las plantas y los contaminantes que pasaron por el humedal, como material orgánico, iones de fósforo y nitrógeno, y los sólidos suspendido en forma de turbidez. La remoción de Fósforo total es de 309,15 mg/L (99.73%), se infiere que este elemento pudo haberse removido en su mayoría por la necesidad alimentaria de la planta ya que es un nutriente fundamental para el crecimiento de la misma. Otro factor fueron las condiciones ambientales de operación del humedal, ya que tanto la planta como la capa de lodo del humedal fueron tomadas de zonas cercanas del sitio de tratamiento. La remoción de Ortofosfatos fue de 856,225 mg/L (99.73%) el mecanismo de remoción pudo ser similar al del Fosforo total, sin embargo, esta especie es muy soluble en el agua y de fácil absorción por las plantas del humedal. La remoción de Nitratos fue de 1,190mg/L (54.34%), pudo ser debido a la nitrificación que existe en el humedal por parte de las raíces de la planta la cual la absorbe como nutriente y los microorganismos o las especies bacterianas que están dentro del ciclo del nitrógeno.

De acuerdo con los porcentajes de remoción se puede visualizar que hay una tendencia de aumento entre la DQO comparadas a las especies de Fósforo, indicando que el humedal puede ser más eficiente para la remoción de las especies de fósforo que la materia orgánica. Por otro lado, también se observa una tendencia de disminución en la eficiencia de remoción entre las especies de fósforo y nitrógeno, evidenciando la posibilidad de que existen más microorganismos que se alimentan en mayor cantidad del fósforo que del nitrógeno.



Gráfica 3. Salida y entrada de Turbidez

Se observa en la gráfica 3, que la remoción de turbidez fue de 77.3 UNT (52.59%) indicando que el humedal tuvo un buen comportamiento en la disminución de la concentración de este parámetro puesto que este sistema no fue diseñado para la remoción de sólidos. Además, puede existir una asociación con la remoción de materia orgánica y con los nutrientes absorbidos por el HAFSS favoreciendo a la disminución de éstos parámetros.



Gráfica 4. Salida y entrada de pH

Se observa en la gráfica 4, que no hubo una variación significativa de pH durante todo el proceso de experimentación con el humedal. Esto favorece a las condiciones de operación del sistema de tratamiento.

Tabla 8. Parámetros analizados cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015

PARÁMETROS GENERALES	UNIDAD DE MEDIDA	ENTRADA	SALIDA	PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO, CON UNA CARGA MAYOR A 625,00 KG/DÍA Y MENOR O IGUAL A 3.000,00 KG/DÍA DBO5
pH	Unidades de pH	7.058	7.104	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	954.000	289.00	180

De acuerdo con la tabla 8, el parámetro de pH está cumpliendo con la normatividad de vertimientos. Respecto a la DQO se puede observar que a pesar de su alto porcentaje de remoción no cumple el máximo permisible de la resolución mencionada. Adicionalmente, los parámetros de fósforo, ortofosfatos y nitratos la norma solo menciona reportar y analizar a los entes de control.

8 Conclusiones.

- Respecto al análisis general del sistema del HAFSS, se concluye que es apto para la remoción de residuos líquidos generados en el Laboratorio de Empresas públicas de la Ceja, especialmente para materia orgánica y fósforo.
- Se logró diseñar y construir un humedal artificial a escala laboratorio para el tratamiento de los residuos químicos generados en procesos de potabilización de agua en el laboratorio de Aguas de Empresas Públicas de La Ceja E.S.P. utilizando plantas nativas de la zona y material reciclado de la planta de potabilización de aguas.
- Se determinaron las mejores condiciones de operación del HAFSS usando la ecuación de flujo pistón, usando la constante K de 0.107 d^{-1} y con un caudal de 23.81 ml/min a condiciones atmosféricas del lugar.
- Se determinó que la Planta *Sparganium Americanum* y el lodo adquiridos del humedal original favorecen al aumento de los tiempos de retención y la remoción de contaminantes.
- Los resultados obtenidos de remoción de DQO, Fosfatos, Ortofosfatos, Nitratos y turbidez fueron representativos con respecto a la concentración inicial, lo cual indica que el HAFSS planta *Sparganium Americanum*, tiene buena capacidad para remover contaminantes químicos, nutrientes y también sirve como medio filtrante.

9 Recomendaciones

- La Planta *Sparganium Americanum* es apta para tratar el agua residual generada en el laboratorio, sin embargo, sería conveniente realizar un pretratamiento químico para aumentar la eficiencia del humedal con respecto a los parámetros de DQO, Nitratos y Turbidez.
- Se observó que el humedal tiene una vida útil de poco tiempo, puesto que se acorta la vida de la planta con las condiciones químicas a la que está expuesta, por lo cual sería bueno buscar una planta con mayor resistencia y resiliencia, existen otras especies de *Typha* que son muy usadas para tratar residuos químicos.

10 Lista de referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (agosto de 2011). *Manejo de residuos peligrosos generados en las viviendas*. Obtenido de http://ambientebogota.gov.co/documents/sda/residuos/RESPELcartilla_noviembre2011.pdf
- Benítez, R., Ruiz, D., Obando, M., Miranda, C., & Gil, J. (Enero-Diciembre de 2013). *Gestión integral de residuos químicos generados en los laboratorios de docencia en química de la universidad del Cauca*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v4n2/v4n2a08.pdf>
- Chang, & Lou. (2007).
- Di Luca, G., Mufarregé, M., Hadad, H., & Maine, M. (4 de septiembre de 2018). *Science of the Total Environment Nitrogen and phosphorus removal and Typha domingensis tolerance in a floating treatment wetland*. Obtenido de sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718334600?via%3Dihub>
- Díaz, S. E., Zamora, E. R., Caselles, A., & León, J. A. (2013). *DISEÑO DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE UN CAMPO DE PETRÓLEO COLOMBIANO*. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3831>
- Enciclovida. (S.F). *Pastos, juncos, bromelias y afines*. Obtenido de [enciclovida.mx: http://enciclovida.mx/especies/6000177.pdf](http://enciclovida.mx/especies/6000177.pdf)
- España, L. M., Quintero, D. F., & Reyes, S. (2017). *Determinación de sólidos totales, suspendidos y sedimentables*. Obtenido de https://www.academia.edu/34926466/Determinaci%C3%B3n_de_s%C3%B3lidos_suspendidos_totales_suspendido_y_sedimentables
- Fernández Valle, M. J. (2012). *Validación de los ensayos de alcalinidad, cloruros y dureza en el agua tratada y cruda en la planta de tratamiento de Empocabal, Santa Rosa de Cabal*. Obtenido de <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/628162F363.pdf>

- Fernández, G. (2012). *Determinación de la alcalinidad mediante valoración rápida a doble punto final*. Obtenido de Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados: <http://www.icm.csic.es/bio/papers/1955.pdf>
- Ferré, N. (2007). *Diseño de un software para evaluar los riesgos de la exposición ambiental a través del agua, suelos y aire*. Obtenido de <https://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/fundacion/prev-ma/revista-seguridad/n108-programa-hra-metales-pesados.pdf>
- Flora of North America. (S.F). *Sparganium americanum*. Obtenido de www.efloras.org: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=10832
- García Bello, D. (28 de 11 de 2019). *¿Qué es el pH?* Obtenido de Cultura Científica: <https://culturacientifica.com/2019/11/28/que-es-el-ph/>
- Gutiérrez Elejalde, J. A. (2017). *Enseñansa de la biotecnología a través de procesos de biorremediación en la modalidad del medio ambiente*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Heraldo. (2 de 6 de 2017). *¿A qué sabe el agua?* Obtenido de <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2017/06/02/que-sabe-agua-1179136-310.html>
- j. (s.f.).
- Jaramillo, M., Agudelo, R., & Peñuela, G. (2016). *Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal*. Obtenido de Revista Facultad Nacional de Salud Pública: <http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/fnsp/article/view/20108/20779286>
- Loayza Pérez, J. E. (2007). *Gestión integral de residuos químicos peligrosos (conferencia)*. Obtenido de Scielo: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2007000400009
- MADS. (17 de Marzo de 2015). *Resolución 631 de 2015*. Obtenido de https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., & García, M. d. (2004). *La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina)*. Obtenido de [https://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510156890491c_Hig.Sanid.Ambient.4.72-82\(2004\).pdf](https://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510156890491c_Hig.Sanid.Ambient.4.72-82(2004).pdf)
- Ménendez, J. L. (s.f.). *Sparganiaceae*. Obtenido de asturnatura.com: <https://www.asturnatura.com/familia/sparganiaceae.html>
- Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morato, J. (2010). *ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL USANDO TRES ESPECIES DE MACRÓFITAS*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228516061_Estudio_comparativo_de_la_remocion_de_materia_organica_en_humedales_construidos_de_flujo_horizontal_subsuperficial_utilizando_tres_especies_de_macrofitas
- Moreno Ramón, H., Ibáñez Asensio, S., & Gisbert Blanquer, J. M. (2007). *Sulfatos*. Obtenido de Universidad Pontificia Bolivariana: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13682/sulfatos%20revisado%20definitivo.pdf?sequence=3>
- Pacheco Ávila, J., & Cabrera Sansores, A. (2003). *Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46770204.pdf>
- Paredes Cuervo, D., & Rivas Hernández, A. (2014). *Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua*. Obtenido de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- Peña Pulla, E. (2007). *Calidad del agua*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf>

- Perdomo, T. (2018). *Fitorremediación: tipos, ventajas y desventajas*. Obtenido de lifeder.com: <https://www.lifeder.com/fitorremediacion/>
- Pérez, R., Alfaro, C., Sasa, J., & Agüero, J. (Enero-Junio de 2013). *EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA ALTERNATIVO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. Obtenido de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/4958/4752>
- Ramírez Burgos, L. I. (2008). *Demanda química de oxígeno de muestras acuosas*. Obtenido de Química ambiental de los residuos peligrosos: http://emas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/redica/resources/LocalContent/127/2/Libro%20DQO%202008.pdf
- Remtavares. (16 de mayo de 2013). *Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Conceptos e historia*. Obtenido de Madridmasd: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/05/16/131891>
- Rodríguez, S. A. (2010). *La dureza del agua*. Obtenido de http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf
- Sanabria, O. A. (2006). *HUMEDAR I- ALTERNATIVA INNOVADORA DEBAJO COSTO PARA DEPURAR AGUAS RESIDUALES EN PAISES DEN VÍA DE DESARROLLO*. Obtenido de http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/revista_ambiental/06082010/rev_ambiental_vol1_num1_art9.pdf
- Sánchez de Fuentes, J. (2001). *El fósforo, parámetro crítico de la calidad del agua*. Obtenido de Universidad central de Venezuela: <http://www.ingenieroambiental.com/junio/fosforo.pdf>
- Staff, T. (02 de 11 de 2015). *Sparganium americanum*. Obtenido de wildflower: https://www.wildflower.org/plants/result.php?id_plant=spam
- Torres, E., & Marín Sanabría, A. (2012). *Optimización del humedal artificial subsuperficial para tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de Revista Ingenio libre: <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista-11/art2.pdf>

Universidad Industrial de Santander. (S.F). *Plan de gestión integral de residuos*. Obtenido de

<https://www.uis.edu.co/webUIS/es/gestionAmbiental/documentos/capacitaciones/Manejo%20de%20Productos%20y%20Residuos%20Quimicos.pdf>

Universidad de Florida. (S.F). *Sparganium americanum*. Obtenido de Centro de plantas acuáticas e invasoras: <https://plants.ifas.ufl.edu/plant-directory/sparganium-americanum/>

USDA. (S.F). *Sparganium americanum Nutt American bur reed*. Obtenido de United States Department of agriculture: <https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=SPAM>

WTW. (2004). *Manual pH meter 330i*. Obtenido de https://www.labmakelaar.com/fjc_documents/wtw-330i-340i-ph-meter-manual.pdf