

**EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIDAD DE APOYO Y
SERVICIO DEL BATALLÓN JOSÉ HILARIO LÓPEZ EN LA CIUDAD DE
POPAYÁN-CAUCA.**



**CORPORACION UNIVERSITARIA
AUTONOMA
DEL CAUCA**

MARÍA ALEJANDRA GARZÓN SÁNCHEZ

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN
2017**

**EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIDAD DE APOYO Y
SERVICIO DEL BATALLÓN JOSÉ HILARIO LÓPEZ EN LA CIUDAD DE
POPAYÁN-CAUCA.**



**CORPORACION UNIVERSITARIA
AUTONOMA
DEL CAUCA**

MARIA ALEJANDRA GARZON SANCHEZ

Trabajo de grado para optar de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Director

Biólogo

ARNOL ARIAS HOYOS

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez revisado el documento final del trabajo de grado “Evaluación de un humedal artificial en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Unidad de Apoyo y Servicio del Batallón José Hilario López en la ciudad de Popayán-cauca”, se autoriza la sustentación del mismo, para así realizar la gestión administrativa correspondiente para optar al título de: profesional en ingeniería ambiental y sanitaria.

Director

Jurado.

Jurado.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a Dios a mis padres y a mis ángeles del cielo por haberme brindado tantas oportunidades, conocimientos y siempre estar apoyándome.

Agradecimientos

Un día como hoy doy infinitas gracias al Batallón José Hilario López, Programa Fe en Colombia, a la Corporación Autónoma del Cauca y todos los docentes que me brindaron sus conocimientos y me regalaron lo más bonito que puede llevarse una alumna grandes amigos.

A mi director Arnol Arias, por brindarme su amistad y por depositar en mí su confianza para el proceso de este trabajo, por la dedicación de tiempo y esfuerzo en el desarrollo de cada una de mis actividades.

A mis padres: Cristóbal Garzón y Liliana Sánchez por darme la vida y mediante por ser mi apoyo, porque sin su ayuda hubiera sido difícil el haber logrado mi sueño de estudiar tan maravillosa carrera, por ustedes luchar por nunca rendirme, porque sé que en un futuro les brindare y devolveré todo lo que han hecho por mí, si mi Dios me lo permite y me guíe siempre por el buen camino. Agradezco a mis ángeles del Cielo Ester Hoyos, Aura Sánchez, Cristóbal Garzón y Paquita Garzón ustedes son mi guía, mi protección y aunque no los tengo presente en cuerpo siempre estarán en mis pensamientos y corazón; A toda mi familia que de una u otra forma estuvieron pendientes.

A mis compañeros de clase y demás amigos por siempre darme una voz de aliento para no rendirme y por siempre estar a mi lado.

A todos ustedes mil gracias Dios los bendiga

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO 1: PROBLEMA.....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICACIÓN	16
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES	20
2.1 Antecedentes.	20
2.2 Bases teóricas.....	24
2.2.1 Calidad del agua y la salud.....	24
2.2.2 Etapas del proceso de tratamiento de agua residual	27
2.2.3 Humedales artificiales.....	31
2.2.4 Humedales Construidos.....	33
2.3 Bases legales.....	43
CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	46
3.1 Fase I: EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN Y EFICIENCIA DE LA PTAR UBICADA EN EL BATALLÓN “JOSÉ HILARIO LÓPEZ”.	46
3.1.1 Actividad 1: Revisión bibliográfica.....	46
3.1.2 Actividad 2: Reconocimiento de la zona de estudio.....	46
3.1.3 Actividad 3: Trabajo de campo y laboratorio	48

3.1.4 Actividad 4. Análisis de las muestras.....	58
3.2 Fase II: COMPARACIÓN TEORICA ENTRE EL HUMEDAL SUPERFICIAL Y HUMEDAL DE FLUJO SUB SUPERFICIAL.	59
3.2.1 Actividad 1: Revisión bibliografía.....	59
3.3 Fase III: DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL.....	60
3.3.1 Actividad 1: Diseño del humedal.....	60
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
4.1 Evaluación de la operación, mantenimiento y eficiencia de la PTAR.....	63
4.1.1 Zona de estudio.....	63
4.1.2 Inspección de la PTAR.....	65
4.1.3 Trabajo de campo y Eficiencia de la PTAR.....	77
4.2 RESUMEN TEÓRICO COMPARATIVO.....	89
4.3 DISEÑO DEL HUMEDAL.....	91
CONCLUSIONES.....	97
RECOMENDACIONES.....	98
BIBLIOGRAFIA.....	100
ANEXOS.....	108

LISTA DE TABLAS

	Pag.
<i>Tabla 1. Principales Enfermedades.....</i>	26
<i>Tabla 2. Diferencias de los dos tipos de humedales.</i>	33
<i>Tabla 3. Normatividad ambiental general.....</i>	43
<i>Tabla 4. Material de Fondo.....</i>	52
Tabla 5. Alícuotas.....	56
<i>Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos</i>	57
Tabla 7. Uso del agua en el Cantón Militar.....	63
Tabla 8. Coordenadas PTAR.	64
Tabla 9. Operación y Mantenimiento de la PTAR.	66
Tabla 10. Registro.	72
<i>Tabla 11. Medición de Caudal y Temperatura.....</i>	77
<i>Tabla 12. Comparación normatividad de vertimientos.</i>	83
<i>Tabla 13. Análisis Teórico.....</i>	90

LISTADO DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Rejillas.....	28
Figura 3. Laguna Facultativa.....	31
Figura 4. Humedal superficial.....	32
Figura 5. Humedal subsuperficial.....	33
Figura 6. Tipo de plántulas para cada humedal.....	35
Figura 7. A y B Humedales contruidos de flujo libre, C humedal contruido de flujo sub superficial horizontal y D humedal de flujo sub superficial vertical.....	35
Figura 8. Esquema de un humedal contruido de flujo superficial.....	38
Figura 9. Procesos de la planta.....	47
Figura 10. Canal rectangular.....	49
Figura 11. Medición de longitud.....	50
Figura 12. Medición lámina de agua.....	50
Figura 13. Recorrido del flotador.....	51
Figura 14. Punto 2 Aforos volumetría.....	53
Figura 15. Aforo por método volumétrico.....	54
Figura 16. Puntos de muestreo.....	56
Figura 17. Toma de alícuota.....	56
Figura 18. Preservación de la muestra.....	57
Figura 19. Ubicación del batallón José Hilario López.....	65
<i>Figura 20. Humedal subsuperficial.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 21. Vista del Humedal.....</i>	<i>96</i>

RESUMEN

Los humedales naturales y artificiales tan ampliamente distribuidos en nuestra región hacen parte de los recursos no económicos que más se deben valorar dada la riqueza que ofrecen en cuanto a biodiversidad y los servicios ecosistémicos que prestan. Los humedales artificiales han sido de gran ayuda en el tratamiento de las aguas residuales, resaltando que, en Colombia, la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales han resultado inviables económica, técnica o ambientalmente; ya sea en sus fases de construcción, operación o mantenimiento, haciendo recomendable desarrollar tecnologías apropiadas, que sean económicas, eficientes y confiables. Los humedales artificiales o “construidos” son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar, suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer un mejoramiento ambiental. En este trabajo se evaluó un humedal artificial como alternativa de un tratamiento terciario, en una planta de tratamiento de aguas residuales, así como la determinación del estado en el que se encuentra dicha PTAR, para lo cual se realizó un análisis de diferentes parámetros fisicoquímicos como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Color, Conductividad, Oxígeno (O_2), Nitritos (NO_2), Nitratos ($N-NO_3$), Amonio (NNH_3), Fosfatos (P) y Potencial de Hidrogeno (pH). Se realizó un análisis teórico comparativo entre el humedal superficial y el humedal de flujo subsuperficial empleando una tabla en términos de eficiencia, costos y dimensiones, con el fin de determinar cuál es el más eficiente en el tratamiento de las aguas residuales.

Palabras claves: Humedal artificial, agua residual, tratamiento, humedal sub superficial.

ABSTRACT

The natural and artificial wetlands so widely distributed in our region are part of the non-economic resources that should be valued more given the richness they offer in terms of biodiversity and the ecosystem services they provide. Artificial wetlands have been of great help in the treatment of wastewater, emphasizing that, in Colombia, most wastewater treatment systems have been economically, technically or environmentally unviable; Either in its construction, operation or maintenance phases, making it advisable to develop appropriate technologies that are economical, efficient and reliable. Artificial or "built" wetlands are complex and integrated systems in which interactions occur between water, plants, animals, microorganisms, solar energy, soil and air; With the purpose of improving the quality of residual water and providing an environmental improvement. In this work an artificial wetland was evaluated as an alternative to a tertiary treatment in a wastewater treatment plant, as well as the determination of the state in which the WWTP is located, for which an analysis of different physicochemical parameters was performed as Biochemical Oxygen Demand (BOD5), Chemical Oxygen Demand (DQO5), Total Suspended Solids (SST), Color, Conductivity, Oxygen, Nitrites (NO₂), Nitrates (N-NO₃), Ammonium (NNH₃), Phosphates (P) and Hydrogen Potential (pH). A comparative theoretical analysis was performed between the surface wetland and the subsurface flow wetland using a table in terms of efficiency, costs and dimensions, in order to determine which is the most efficient in the treatment of wastewater.

Key words: Artificial wetland, wastewater, treatment, sub surface wetland.

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de soluciones para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y teniendo en cuenta la aplicación de tecnologías de bajo consumo de energía, dentro de los procesos biológicos, se ha promovido la utilización de las lagunas de estabilización, los procesos anaerobios de alta tasa, los tratamientos primarios de alta eficiencia, las zanjas de oxidación, los filtros percoladores, los humedales naturales y artificiales o la combinación de estos procesos [1].

De los métodos nombrados anteriormente los humedales construidos se presentan como una tecnología eficiente para el tratamiento principal o complementario de aguas residuales, principalmente en los casos donde resulta difícil construir, operar o mantener adecuadamente los sistemas de tratamiento convencionales. Dentro de los humedales construidos podemos encontrar tanto de flujo superficial como subsuperficial [2].

Los sistemas de humedales de flujo superficial son aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo libre y remueven en forma confiable la DBO, DQO y los SST. También pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo con tiempos de retención suficientemente largos, los metales son también removidos eficazmente y se puede esperar también una reducción de un orden de magnitud en coliformes fecales [3].

Un humedal artificial de flujo subsuperficial está diseñado con el nivel del agua por debajo de la superficie del medio. Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada, su vegetación es emergente como las espadañas y aneas (*Typha sp.*), los juncos (*Scirpus sp.*) y los carrizos (*Phragmites sp.*) y son muy efectivos en la remoción de

la DBO, la DQO, los SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles es también posible, pero se requiere un tiempo de retención mucho mayor [3].

En el presente trabajo se evaluó la planta de tratamiento de aguas residuales de la unidad de apoyo y servicio del Batallón José Hilario López en la ciudad de Popayán, esto con el fin de analizar su eficiencia y funcionamiento y lograr una comparación entre el humedal superficial y el subsuperficial en cuanto a eficiencia y costo, que permita definir una alternativa de tratamiento terciario a las aguas residuales.

CAPITULO 1: PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las principales problemáticas ambientales actuales es la contaminación del recurso hídrico, generada por las diferentes actividades antrópicas, a nivel industrial, agroindustrial, comercial, y residencial, dejando residuos con altas cargas contaminantes, que convierten al agua en un medio con gran potencial para transmitir una amplia variedad de enfermedades que pueden resultar mortales y que afectan sobre todo a la población con menores recursos económicos de los países en vías de desarrollo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada día mueren aproximadamente 30.000 personas a causa de la contaminación hídrica. En los países en vía de desarrollo, el 80% de todas las enfermedades son de origen hídrico y una cuarta parte de los niños que nacen en estos países mueren antes de cumplir cinco años, la gran mayoría por enfermedades hídricas [4].

En Colombia el crecimiento demográfico y de los diferentes sectores de producción, dejan en evidencia la gran demanda del recurso hídrico que afronta el país y por consiguiente la alta generación de vertimientos. De tal forma que la escasa cobertura para el tratamiento de aguas residuales que afronta actualmente el país, hace necesario estudiar diferentes alternativas de tratamiento, con el fin de controlar la contaminación de suelos, aguas subterráneas, cuerpos de agua, y evitar problemas de salubridad, esto debido a que la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales han resultado inviables por la falta de operación y mantenimiento [5].

Intentando mitigar la contaminación a los ríos, desde finales de los 70 del siglo XX la legislación ambiental colombiana incluyó la descontaminación de los ríos como una prioridad en los planes de desarrollo de todos los municipios. El país cuenta

con 583 sistemas de tratamiento de aguas residuales instalados, distribuidos en 480 municipios, de los cuales se sabe que el 14% no son funcionales [5].

Se estima que diariamente se descargan a las fuentes hídricas seis millones de m³ de aguas residuales domésticas sin ningún tipo de tratamiento, con un nivel de contaminación de 1.200 ton/día de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). Por otro lado se sabe que la producción agropecuaria aporta una carga contaminante de 4.000 ton/día de DBO₅ [6].

La ciudad de Popayán es una de las más atrasadas en construir la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, PTAR, lo que ha provocado impactos ambientales al recurso hídrico de la ciudad.

Teniendo en cuenta lo anterior se hace necesario la búsqueda de sistemas que disminuyan la contaminación hídrica y el impacto ambiental que tienen los diferentes vertimientos sobre las fuentes hídricas de las cuales se abastece la mayor parte de la población, además de esto que sean de bajo costo y a la vez confiables.

Por esto se ve la necesidad de realizar un tratamiento terciario que consiste en humedales artificiales, los cuales principalmente son sistemas naturales que proporcionan beneficios para tratar con efectividad altos niveles de DBO₅, DQO₅, SS y N , así como niveles significativos de fósforo, metales, traza orgánica y patógenos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Existe una gran presión sobre los recursos hídricos a nivel mundial. Según la UNESCO (2003) el 69% del agua dulce disponible en el planeta se destina a la agricultura, el 23% a la industria y el 8% al consumo doméstico. Diversos aspectos como la mala distribución temporal y espacial o la degradación determinan la actual situación que se resume en un gran desequilibrio entre la oferta existente y la creciente demanda de agua [7].

En países en desarrollo como Colombia, se enfrenta una mayor competencia por el acceso al agua en las próximas décadas, debido al crecimiento demográfico, nuevos hábitos de vida y el desarrollo urbano e industrial sin una adecuada planificación. Es decir que se prevé un aumento en la demanda hacia las limitadas fuentes de agua [8].

Por otra parte, la disposición final de las aguas residuales producidas por las diferentes actividades humanas (principalmente usos domésticos e industriales) representa un problema cuya magnitud está en constante incremento. Encarar este problema plantea un dilema crucial, ya que, por un lado, el agua residual se constituye en una fuente alternativa importante para el riego de los cultivos, pero, por otro lado, su uso para este fin, sin un adecuado tratamiento, puede constituirse a su vez en un problema mayor, por todos los riesgos que esto supone. En efecto, se han registrado a nivel mundial, muchos casos de brotes de enfermedades, casos de intoxicaciones masivas y se ha propiciado la degradación de diversos cuerpos de agua [7].

La mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales han resultado inviables económica, técnica o ambientalmente; ya sea en sus fases de construcción, operación o mantenimiento, haciendo recomendable desarrollar tecnologías apropiadas, que sean rentables, eficientes, y confiables [8]

Los humedales construidos, se presentan como una tecnología para el tratamiento principal o complementario de aguas residuales, principalmente en los casos donde resalta difícil construir, operar o mantener adecuadamente los sistemas de tratamiento convencionales [9]. Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual: Sistemas de flujo superficial y Sistemas de flujo subsuperficial. En los casos en que se emplean para proporcionar tratamiento secundario o avanzado, los sistemas de flujo superficial, debido a su configuración, pueden albergar distintos tipos de vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos. Los de flujo subsuperficial normalmente se les aplica agua residual pretratada en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente. Estos últimos se pueden clasificar según el sentido del flujo del agua en horizontales o verticales [10].

Se han publicado distintos trabajos de investigación relacionados con el tratamiento de agua residual a través de humedales construidos, especialmente de flujo subsuperficial, dada su particularidad de no tener una lámina de agua expuesta a la atmosfera, reduciendo los problemas de malos olores, presencia de vectores y riesgo público por posible contacto con el agua residual [10].

De acuerdo a diferentes investigaciones los humedales artificiales son técnica y económicamente factibles para tratar aguas residuales por varias razones:

- Son menos costosos que otras opciones de tratamiento.
- Los gastos de operación y mantenimiento son bajos. (energía y suministros)
- La operación y mantenimiento no requiere un trabajo permanente en la instalación.
- Los humedales soportan bien las variaciones de caudal.
- Facilitan el reciclaje y la reutilización del agua.
- Proporcionan un hábitat para muchos organismos.

- Pueden construirse en armonía con el paisaje.

Con base en lo anterior, se hace evidente la importancia de implementar este tipo de sistemas que permitan el manejo de las aguas residuales de una forma eficiente y con el menor impacto al medio ambiente.

Actualmente en la Unidad de Apoyo y Servicio del Batallón José Hilario López, que funciona en la ciudad de Popayán, se realiza el manejo de las aguas residuales por medio de una PTAR, la cual se encuentra activa desde el año 2004 pero que en la actualidad presenta una problemática en el tratamiento secundario en donde la geomembrana de la laguna de estabilización o laguna anaerobia, se encuentre fragmentada, ocasionando que el fluido se infiltre a través de las capas freáticas del suelo hasta llegar a las fuentes hídricas subterráneas contaminándolas indirectamente [11].

En el presente trabajo se pretende diseñar un sistema de tratamiento terciario (humedal artificial o humedal de flujo subsuperficial), analizando y comparando entre cada humedal para así determinar cuál presenta mayor eficiencia con respecto a la carga contaminante encontrada y cuál es la más óptima en términos de rendimiento, costos y operación del tratamiento, para complementar los procesos que se realizan en los sistemas primarios y secundarios implementados en la PTAR, ubicada en la Unidad de Apoyo y Servicio del Batallón José Hilario López en la ciudad de Popayán.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar un humedal artificial en la planta de tratamiento de aguas residuales de la unidad de apoyo y servicio del Batallón José Hilario López en la ciudad de Popayán-Cauca.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar la operación y eficiencia de la PTAR en función de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO_5), Solidos Suspendidos Totales (SST), Color, Conductividad, Oxígeno (O_2), Nitritos (NO_2), Nitratos ($N-NO_3$), Amonio ($N-NH_3$), Fosfatos (PO_4^{3-}) y Potencial de Hidrogeno (pH).
- Realizar un análisis teórico comparativo entre el humedal superficial y el humedal de flujo sub superficial en términos de eficiencia y costos, como alternativa de un tratamiento terciario.
- Realizar el diseño de un humedal artificial de acuerdo a los análisis.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES

2.1 Antecedentes.

La utilización de humedales construidos para la depuración de aguas residuales se remonta a comienzos del siglo XX. Las ciénagas, humedales y turberas se conocían como los mejores receptores de aguas servidas, jugando un papel purificador importante. Las primeras nociones científicas relacionadas con el uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas usadas, se remontan a 1946 en el Max Plank Institute System (MPIS), en Alemania, donde se evaluó el tratamiento mediante humedales de flujo horizontal para aplicaciones de aguas tanto municipales como industriales [12].

El centro de Investigación de Tecnologías Ambientales. (2003), CITA, de la Corporación Universitaria de la Costa, CUC, en Colombia, teniendo en cuenta las experiencias de investigación realizadas en el ámbito nacional e internacional con Humedales Artificiales, se dio a la tarea de construir un humedal de flujo subsuperficial, tratando agua residual municipal. Este trabajo reporta los avances obtenidos en las etapas de construcción arranque y estabilización, utilizan plantas tolerantes a las condiciones de alta humedad en que se encuentra el suelo y un medio de soporte que facilite el flujo de agua a través de él; dando como resultado que la eficiencia de remoción obtenido fue de 97 % para SST, el 90 % para DQO y el 92.3 % DBO a una temperatura de 20 °C [13].

Borrero *et al.* (2005), presentan el funcionamiento en la etapa inicial de un humedal piloto, diseñado para servir a la Estación Experimental Javeriana en el municipio de Cogua, Cundinamarca, tratando las aguas residuales domésticas provenientes de las viviendas y las aulas. Hacen una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los preestablecidos por los diferentes modelos de diseño. Los resultados determinan que el modelo de Reed *et al.* Arroja el mejor ajuste a los resultados experimentales en cuanto a la eficiencia de remoción de DBO₅, a pesar de que los rendimientos porcentuales están por debajo de los esperados, a causa

de la baja carga del efluente. La remoción de los indicadores de contaminación fecal es buena, (alrededor del 80%). Finalmente, concluyen que los resultados obtenidos en la planta piloto de humedal artificial demuestran la viabilidad de la utilización de esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico [14].

En Estados Unidos Kadlec (2008), realiza una revisión de diferentes fuentes, bases de datos, informes de proyectos y trabajos publicados en los cuales fueron evaluados los dos tipos de tratamiento predominantes para humedales flujo libre (FWS) y flujo sub superficial horizontal (HSSF). Como conclusión, el autor obtuvo que los factores implicados en la elección de la alternativa a elegir incluyen tamaño, costo, operatividad y eliminación de carga contaminante. En estos dos tipos de tratamiento se tiene una serie de ventajas, siendo para los de flujo libre una remoción de DBO, Sólidos Suspendidos Totales (SST), amoníaco, nitrógeno total y fósforo; mientras que los humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) son más eficaces para la reducción de los niveles de DBO en tratamientos terciarios, nitrato y patógenos [15].

En la ciudad de Medellín Colombia. (2010), se realizó el estudio de la remoción de materia orgánica con aguas residuales sintética, en término de DQO, DBO durante tres meses, en seis humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial a escala piloto, sembrado con diferentes macrófitas, *Canna limbata*, *Heliconi psittacorum* y *Phragmites sp*; las remociones de DQO fueron en el orden de las especies vegetales del 97.31, 95.94 y 97.13%; y en DBO del 99.36, 99.09 y 97.49%. Se observa en el estudio que existen diferencias significativas entre las plantas y además el estudio muestra que los humedales construidos de flujo subsuperficial arroja buenos resultados para la remoción de materia orgánica [16].

En Medellín, Colombia. (2012), se han realizado investigaciones, en las cuales se han comparado los resultados de humedales construidos de flujo subsuperficial y superficial, con diferentes contaminantes, entre ellos el de plaguicidas organofosforados. Para comparar la eficiencia de los humedales construidos de flujo

subsuperficial con humedales de flujo superficial se realizó un estudio de humedales a escala piloto, alimentados con agua residual sintética con diferentes concentraciones de clorpirifos, sembrados con *Phragmites australis*. El lecho utilizado fue de 3.18 a 6.35 mm. Las eficiencias de eliminación del plaguicida y carbono orgánico disuelto fueron del orden del 93% y 92% respectivamente en el humedal de flujo sub superficial y del 95%. Los dos tipos de humedales construidos son muy eficientes en el tratamiento de las aguas residuales domésticas contaminadas con pesticidas y carbono orgánico disuelto, aunque los resultados fueron ligeramente mejores en los humedales de flujo superficial [17].

En la investigación realizada por Mancilla *et al.* (2013), se evaluó la construcción de una planta piloto con seis humedales de flujo subsuperficial horizontal, en una región climática mediterránea en Chile, construidos con una superficie de 2 m² y una profundidad de 0,6 m cada uno, plantados con *Typha latifolia* o *Scirpus sp.* y llena de grava (G) o grava fina (FG) de 2,8 y 1,2 cm de diámetro respectivamente, continuamente alimentados con aguas residuales domésticas crudas, evaluado durante 280 días. Los resultados demostraron que la mayor eliminación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) fue en la temporada de otoño con altas temperaturas y en la plantación de *Scirpus* con un promedio del 78%, la eliminación más baja de DQO fue en la temporada de invierno [18].

En el noroeste de China. (2014) se evaluó las colonias adyacentes de *Phragmites* y *Typha* en dos humedales de superficie libre y flujo subsuperficial. Según los resultados, el efecto de la competencia interespecífica era notable para *Phragmites australis*, con lo que mostró el rendimiento de crecimiento más alta tanto en humedales de flujo libre y humedales subsuperficiales. Durante una operación de un año con una carga de superficie media de 0.053 m³ / (m² · día) se observa que para el humedal construido de flujo superficial hay una mayor remoción de nitrógeno y para el humedal construido de flujo subsuperficial con porcentajes de remoción entre el 8 y 15% de nitrógeno y fosforo, lo que provocó una mejora efectiva de la calidad del agua del río [19].

Hernández-Crespo *et al.* (2016), realizaron una comparación entre humedales construidos de flujo horizontal y flujo subsuperficial en Valencia, España, estos humedales fueron construidos en el (2009) con una superficie de 90 Ha. El agua residual proviene del lago Lalbufera. El objetivo de estos humedales es la reducción de la biomasa del fitoplancton y la mejora de la biodiversidad. En total se utilizaron seis humedales construidos, 5 de superficie libre y un humedal de flujo subsuperficial. Los resultados mostraron que el humedal de flujo subsuperficial es más rápido que los cinco de flujo libre en reducción de fósforo total y nitrógeno total, por lo que necesita menos área para obtener concentraciones de salida similares. De acuerdo con esta investigación esta es la principal ventaja de humedales de flujo subsuperficial con respecto a humedales construidos a flujo libre [19].

En el estudio realizado en la ciudad de México por Solís *et al.* (2016), se implementaron humedales artificiales de flujo libre empleando *T. Domingensis* (espadaño) y *E. Crassipes* (jacinto de agua), y humedales de flujo subsuperficial empleando *P. Paniculatum* (camalote) y *C. Articulatus L* (chintul) para remover contaminantes del agua residual. Se implementaron también lagunas sin vegetación y lagunas con grava como controles. El humedal que presentó la mayor eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual fue el de flujo libre utilizando *T. domingensis* (eficiencias de remoción de turbiedad, color, DQO, DBO₅, Nitrógeno Total (NT), Fosforo Total (PT) y SST [20].

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Calidad del agua y la salud

El agua es probablemente el recurso natural más importante del mundo, ya que sin ella no podría existir la vida y la industria no funcionaría, a diferencia de muchas otras materias primas, el agua no tiene sustituto en muchas aplicaciones, el agua tiene un papel vital en el desarrollo de las comunidades, ya que es indispensable que su abastecimiento sea seguro para que una comunidad se establezca permanentemente [21].

Sin embargo, los desechos líquidos y sólidos de una comunidad tienen un potencial considerable para la contaminación del ambiente y por ende afecta a la vida y calidad de las personas [5].

Es por esto que en el mundo existe una preocupación constante por los posibles riesgos para la salud que pueden surgir a largo plazo por la presencia de pequeñas concentraciones de impurezas en el agua utilizada por el hombre, en especial de compuestos potencialmente cancerígenos. También hay varios contaminantes, de origen natural o producidos por el hombre, que tienen efectos conocidos en la salud de quienes los consumen [5].

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el consumo de agua contaminada y la falta de acceso a servicios mejorados de saneamiento, está relacionada a más de 4.000 muertes prematuras al año en América Latina.

En el ciclo del agua, los problemas relacionados con el saneamiento y el abastecimiento de agua están estrechamente vinculados. Actualmente, el saneamiento no puede verse solo como la disposición de residuos para prevenir un ambiente insalubre. El saneamiento debe formar parte de una política general de protección del ambiente, como una manera de evitar la contaminación y proteger la

calidad del agua que va a usarse para bebida, cultivo de peces, riego, para fines recreativos, etc. [21].

Uno de los problemas sanitarios más críticos en los países de América Latina y el Caribe es la descarga incontrolada de aguas residuales sin tratamiento, las cuales contaminan los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Solo el 10% de las aguas residuales recibe algún tipo de tratamiento, generalmente inapropiado. En muchos casos, la inadecuada disposición de excretas y alcantarillado contamina el agua potable, originando numerosas enfermedades diarreicas y gastroentéricas. Su número las coloca entre las tres principales causas de muerte en la Región, siendo las más comunes: amebiasis, cólera, Hepatitis, Shigelosis, tifoidea, fiebres paratíficas e infecciones por rotavirus [21].

Características de las enfermedades

Las enfermedades contagiosas humanas son aquellas en las que el patógeno pasa su vida en el hombre y solo puede vivir corto tiempo fuera del cuerpo, donde el ambiente le es desfavorable. Este tipo de enfermedad se transmite por contacto directo. Las enfermedades no contagiosas tienen rutas de transmisión simples en las que el desarrollo extracorpóreo del organismo infectante tiene lugar en el suelo o el agua. La causa de estas enfermedades puede tener origen en bacterias, protozoos o gusanos, que pueden venir de diferentes ambientes contaminados como el agua, el cual es el principal ambiente para que se desarrollen estos organismos portadores de enfermedades [21].

- **Enfermedades transmitidas por el agua**

Las enfermedades hídricas más comunes ciertamente las que causan el mayor daño a escala global son aquellas que se propagan por el agua contaminada con heces u orina humana, con este tipo de enfermedades la infección ocurre cuando el

organismo patógeno llega al agua que consume una persona que no es inmune a la enfermedad [6].

En la siguiente tabla se evidencia las principales enfermedades relacionadas con el agua.

Tabla 1. Principales Enfermedades.

ENFERMEDAD	TIPO DE RELACION CON EL AGUA
Cólera	} Transmitidas por el agua.
Hepatitis infecciosa	
Leptospirosis	
Paratifoidea	
Tularemia	
Tifoidea	
Ascariasis	} Por el agua para aseo.
Conjuntivitis	
Enfermedades diarreicas	
Lepra	
Sarna	
Sepsia y ulcera de la piel	
Gastroenteritis	
Gusano de guinea	} Desarrolladas en el agua.
Esquistosomiasis	
Paludismo	} Insectos vectores.
Oncocercosis	
Enfermedad del sueño	
Fiebre amarilla	

Fuente. Fundamentos de control de la calidad del agua [6].

Para evitar estas endemias, epidemias o pandemias; la ciencia y la tecnología ha aplicado procesos para tratar las aguas residuales como principios biológicos, químicos y físicos asociados con la técnica de la ingeniería.

2.2.2 Etapas del proceso de tratamiento de agua residual

El tratamiento de aguas residuales, también conocido como proceso de depuración, es un sistema utilizado para remover contaminantes del agua. Eventualmente el agua usada se descontamina a través de medios naturales, pero eso requiere mucho tiempo; en una planta de tratamiento se acelera este proceso. Así podemos reutilizar el agua en actividades diversas como la agricultura, la industria y la recreación [22].

Al remover contaminantes del agua estamos, en cierta forma, defendiéndola del ataque de muchas bacterias y productos químicos.

Existen varios niveles de defensa: pretratamiento, tratamiento primario, secundario, avanzado y varios tratamientos especiales que se pueden utilizar después de todos ellos. El proceso de defensa o saneamiento inicia desde el momento en que el agua potable es utilizada y arrojada al drenaje, así la red de drenaje se convierte en la columna vertebral para la captación y transporte de aguas negras o residuales [22].

En el proceso de tratamiento de las aguas residuales, existen diferentes técnicas que ayudan en el:

- **Rejillas**

Llamado igualmente como sistema de cribado, son dispositivos constituidos por barras metálicas paralelas e igualmente espaciadas. Las barras pueden ser rectas o curvadas, su función es la retención de sólidos en suspensión o flotantes, este sistema se encuentra como una unidad hidráulica de tratamiento preliminar. Los

sólidos que se retienen son principalmente papel, productos de higiene femenina, plástico, restos vegetales, pedazos de madera, tapones de botella, entre otros. Estos sistemas brindan protección a las demás unidades hidráulicas de tratamiento contra obstrucciones [23].

Este tratamiento preliminar se puede clasificar en sistemas de rejillas gruesas (40 a 100 mm o más), rejillas medianas (20 a 40 mm), rejillas finas (10 a 20 mm), y rejillas rotativas finas (0.25 a 2.5 mm). Por otra parte, se puede clasificar en limpieza manual o mecánica. Las rejillas de limpieza manual son empleadas en sistemas de tratamiento de aguas residuales de bajo caudal y las mecanizadas en tratamientos de aguas residuales de gran porte o caudal [24].



Figura 1. Rejillas

- **Laguna anaerobia**

La laguna anaerobia se encarga de la remoción de materia orgánica del agua residual, el de oxidación y estabilización de los lodos orgánicos o biosólidos en ausencia de oxígeno, esto se lleva a cabo mediante una amplia variedad de bacterias clasificadas en dos grupos: formadas por ácidos (Acido génicas) y

formadas por metano (Metano génicas). Estos dos grupos de bacterias actúan en forma combinada para garantizar la conversión del carbono a metano.

Unas de las ventajas de la laguna son: posibilidad de alcanzar una gran estabilización de residuo, baja producción de lodos biológicos residuales, baja necesidad de nutrientes, no requiere oxígeno y produce metano [25].

Posee una desventaja en la exigencia de impermeabilización del terreno para evitar contaminaciones al manto freático por filtración y mayores extensiones de terreno para su implementación, estos sistemas por generalmente tienen una profundidad de 2-5 m y reciben cargas orgánicas volumétricas mayores de 100 g DBO5 m³/d [26].

El diseño de la laguna se realiza con base en la tasa orgánica superficial, la tasa de carga orgánica volumétrica y el tiempo de retención hidráulico. En climas donde la temperatura supera los 22 °C [25].

Las cargas de trabajo de las lagunas anaeróbicas son del orden de 0,4 kg DBO m³ /día, lo cual equivale a aproximadamente 1 kg DQO m³/día, tiempos de retención hidráulica (TRH) recomendados son del orden de 5 días y una profundidad entre 8 y 16 pies (2.5 y 5 m) [25].



Figura 2. Laguna Anaerobia.

- **Laguna Facultativa**

Este tipo de lagunas tienen una zona aerobia y una anaerobia, presentados en la superficie y fondo de la laguna. La finalidad de estas lagunas es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionando principalmente por las algas presentes. Las lagunas facultativas son depósitos de profundidad reducida (1.5 a 2.5 m), donde la actividad fotosintética de las algas ejerce un papel sobresaliente en la capa superior, donde se mantiene un cierto nivel de oxígeno disuelto que se modifica a razón de profundidad y hora del día [27].

En el fondo de la laguna se depositan los sólidos suspendidos que sufren un proceso de descomposición por estabilización anaerobia. Las bacterias y las algas son los dos componentes biológicos preponderantes de las lagunas facultativas y su acción constituye el efecto ecológico más importante sobre el proceso de auto purificación.

Este tipo de lagunas constituyen un sistema de tratamiento bioquímico de crecimiento suspendido, sin recirculación de sólidos sedimentados. El crecimiento

algal representa, por una parte, el suministro adecuado de oxígeno fotosintético para la actividad aerobia bacterial y, por otra, la necesidad de remoción del efluente para impedir que aumenten su concentración de sólidos suspendidos y de materia orgánica biodegradable. La población algal se representa usualmente por la concentración de clorofila “a” [27].



Figura 3. Laguna Facultativa.

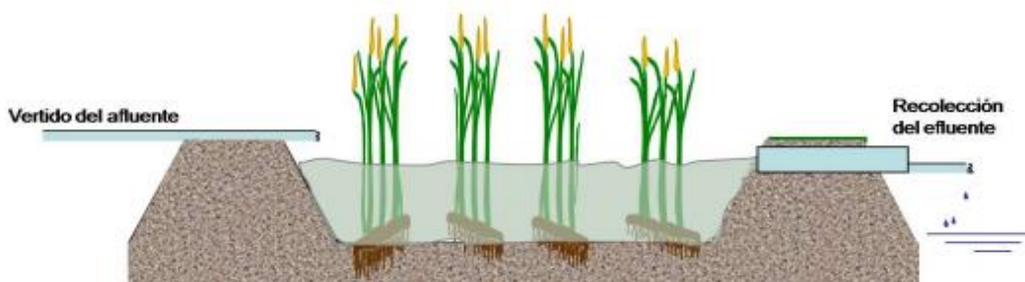
2.2.3 Humedales artificiales

La problemática ambiental causada principalmente por el vertimiento de aguas residuales municipales, es crítica, pues esta crece proporcionalmente tanto al desarrollo económico como a la sobrepoblación mundial [28]. Por tal motivo, los sistemas de tratamiento de aguas residuales han sido complementados con tratamientos biológicos terciarios como lo son los humedales artificiales, lo cuales son sistemas de depuración cuyos componentes principales son el sustrato, la vegetación y el agua, que se caracterizan por su simplicidad de operación, un bajo o nulo consumo energético, una baja producción de residuos, un bajo impacto ambiental auditivo y una buena integración al medio ambiente [29].

En los sistemas de tratamientos terciarios encontramos dos tipos de humedales los cuales se clasifican en:

- **Humedales Superficiales:** Los humedales superficiales 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 [30]. Como puede observarse en la Figura 4.

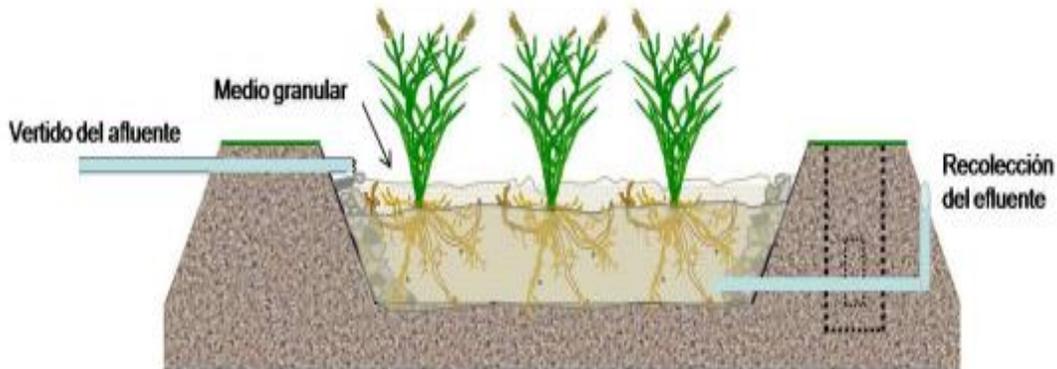
Figura 4. Humedal superficial.



Fuente. [35]

- **Humedales Subsuperficiales:** En los humedales de flujo sub superficial la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas [31]. La Figura 5, presenta un humedal subsuperficial y sus principales componentes.

Figura 5. Humedal subsuperficial.



Fuente. [31]

En la Tabla 2 se identifican las principales diferencias entre los humedales superficiales y sub superficiales.

Tabla 2. Diferencias de los dos tipos de humedales.

	FLUJO SUPERFICIAL	FLUJO SUB SUPERFICIAL
Operación	Opera con baja carga contaminante	Altas tasas de carga orgánica
Olor	Puede ser controlado	No existe
Área	Requiere superficies de mayor tamaño	Requiere superficies de menor tamaño
Costo	Menor costos en relación al sub superficial	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30 %

Fuente. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Universidad de Barcelona [32].

2.2.4 Humedales Construidos

Los humedales construidos (CW, sigla en inglés constructed Wetland) son una alternativa natural de tratamiento de aguas residuales, son diseñados y construidos para utilizar los procesos naturales que implican la vegetación de los humedales, los suelos (expresados como lechos porosos) y ensamblajes microbianos para el tratamiento de aguas residuales [33]. Los procesos fisicoquímicos y biológicos

presentes en este tipo de tratamiento, están dados por la interacción de las plantas, microorganismos, sustrato o lecho poroso y los contaminantes [34].

Los humedales construidos es el medio preferido para el control de la calidad del agua debido a sus mecanismos de tratamiento natural y funcionan como una unidad de tratamiento secundario o terciario en el sistema de tratamiento de agua residual [35]. Su funcionamiento hace parte de la línea de biorremediación, es decir, de funcionamiento natural para el tratamiento de aguas residuales, con eficacia para la eliminación de contaminantes y nutrientes sin una necesidad de energía adicional, funcionando a gravedad y por medio de una simbiosis entre, microorganismos y especies vegetales [36]. En general, los humedales construidos pueden ser diseñados para eliminar más del 90% de la DBO, DQO, sólidos en suspensión y la contaminación bacteriológica de las aguas residuales a través de flujo. La eliminación de N y P se mantiene cerca del 50% en la mayoría de los casos [37].

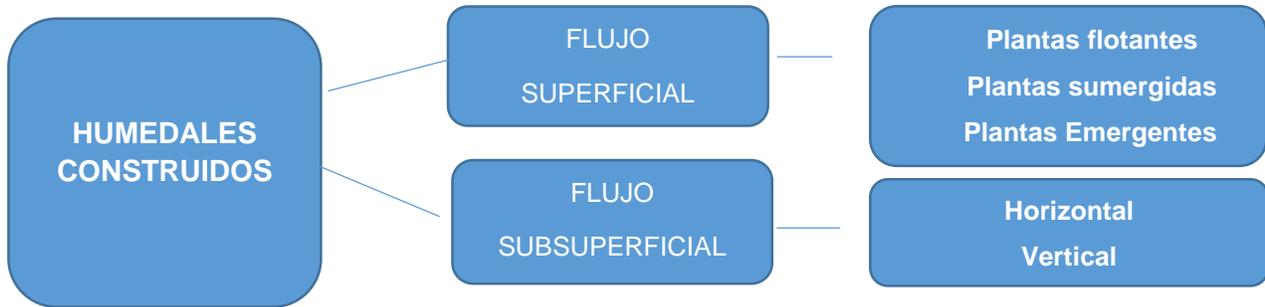
Caracterización de humedales construidos

Los humedales construidos se caracterizan por la posición de la superficie del agua y/o el tipo de vegetación presente. En este caso se observan dos tipos de humedales de flujo superficial y sub superficial. El humedal artificial de flujo sub superficial está diseñado específicamente en forma de canal que contiene un medio apropiado, como por ejemplo grava, arena y otro tipo de materiales que puedan simular este medio natural, el cual es sembrado con los mismos tipos de vegetación que se pueden encontrar en los humedales naturales, su diseño se basa en el nivel de la lámina de agua por debajo del sustrato o del lecho. Los humedales artificiales de flujo superficial, como su nombre lo indica son sistemas en los cuales no se posee sustrato y se encuentran especies vegetales emergentes, además poseen áreas abiertas de agua con apariencia similar a los humedales naturales [38], [39].

Los humedales construidos de agua superficial se pueden subdividir según el tipo de planta instalada en el sistema, es decir humedales construidos de plantas

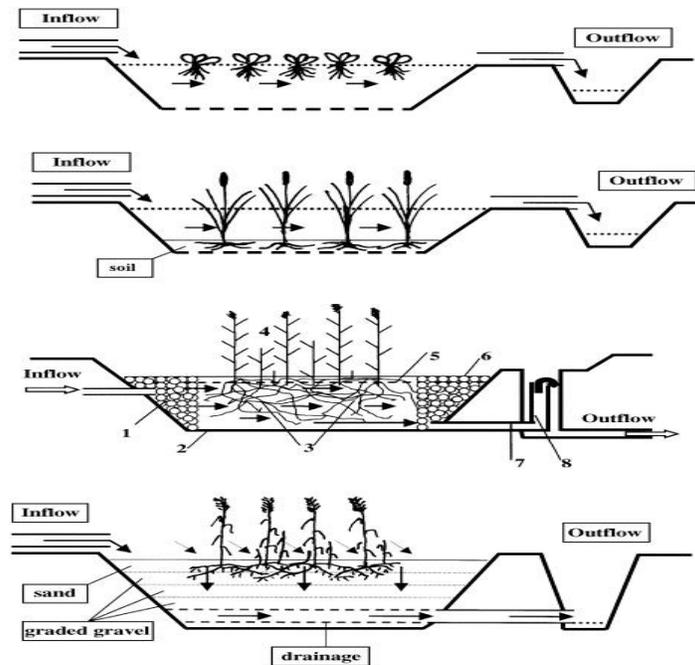
flotantes, plantas sumergidas, y plantas emergentes, mientras que los humedales construidos de flujo sub superficial se subdividen por la dirección de flujo, ya sea horizontal o vertical. A continuación, observamos en la ilustración, un resumen de lo anteriormente descrito (Ver Figura 6) [38].

Figura 6. Tipo de plántulas para cada humedal.



Fuente. *Elaboracion propia.*

Figura 7. A y B Humedales construidos de flujo libre, C humedal construido de flujo sub superficial horizontal y D humedal de flujo sub superficial vertical.



Fuente [39].

- **Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal**

Los humedales construidos con flujo de sub-superficie horizontal son una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales para pequeñas fuentes de contaminación especialmente orgánicos y sólidos en suspensión, el objetivo del tratamiento, es la remoción de DBO, DQO y los sólidos en suspensión es muy alta y constante durante los años de funcionamiento. La eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) es generalmente baja y no supera 50% para las aguas residuales municipal cuando los sistemas están dimensionados a aproximadamente 5 m² por equivalente población. Esta eliminación de nitrógeno está limitado por la falta de oxígeno en el lecho de filtración mientras que la eliminación de fósforo está limitado por la baja capacidad de absorción de los materiales de filtración (grava, roca triturada) [40].

El diseño típicamente consiste en una cama rectangular plantada y alineada con una membrana impermeable. Por medio de la gravedad las aguas residuales ingresan al humedal construido y pasa lentamente a través del medio de filtración bajo la superficie de la cama en una trayectoria horizontal para llegar al nivel en la salida [40].

Durante el paso de las aguas residuales a través del lecho de juncos el agua residual se pone en contacto con una red de zonas aeróbicas, anóxicas y anaerobias. En el lecho está presente los microorganismos o Biofilm, los cuales aportan a la depuración de las aguas residuales. Las profundidades de este sistema de tratamiento no son mayores a 60 cm, además de leves pendientes en el fondo. En este tipo de sistemas, los lechos son aislados de las aguas subterráneas para evitar su contaminación [41]. Este tipo de tratamiento de agua residual proporciona alta eliminación de compuestos orgánicos y sólidos en suspensión, pero la eliminación de nutrientes es baja [44].

La eliminación de nitrógeno está limitada por las condiciones anóxicas / anaeróbicas

en lechos de filtración que no permiten a nitrificación del amoníaco [45]. La eliminación del fósforo está restringida por el uso de materiales de filtro (gravilla, piedra triturada), La profundidad de lecho de filtración normalmente 0,6-0,8 m con el fin de permitir que las raíces de las plantas de humedales y para penetrar todo el lecho y asegurar la oxigenación de todo el lecho a través de la liberación de oxígeno de las raíces [42].

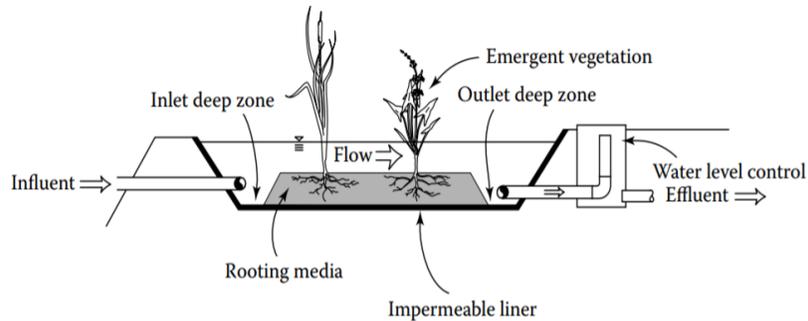
- **Humedales construidos de flujo superficial**

Este tratamiento de agua residual es considerado de flujo libre parecido a un estuario, en el cual se observan plantas emergentes. Las aguas residuales atraviesan el humedal, los cuales por diseño pueden contener plantas emergentes, sumergidas o flotantes. Poseen barreras laterales y en el fondo para prevenir la infiltración, de altura entre 1 y 1.5 m de lámina de agua, con lo cual la profundidad baja y la presencia de tallos regulan el flujo del agua [42].

En el proceso de descontaminación del agua predominan procesos de sedimentación, oxidación, reducción, adsorción. Este tipo de humedal atrae una gran cantidad de fauna como insectos, moluscos, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Se utilizan comúnmente como tratamiento después de un sistema de lodo o lagunaje [38], [43].

Los mecanismos de acción es la precipitación de sólidos en suspensión, la difusión de nutrientes, la mineralización de materia orgánica, la absorción de nutrientes por microorganismos y plantas, transformación microbiana de contaminantes en componentes gaseosos; las remociones de DBO y DQO son del orden del 90% y muy bajas para nitrógeno y fósforo (alrededor del 15%). Para su diseño se recomienda tiempos de retención hidráulicos de 5 a 10 días y alturas entre 1 y 1.5 metros [37]. Este tipo de humedales construidos se utilizan como medida de manejo ambiental para cuencas hidrográficas y zonas de descarga no puntuales, como las zonas de descarga de áreas de agricultura [44].

Figura 8. Esquema de un humedal construido de flujo superficial.



Fuente [34].

- **Partes del Humedal**

Especies vegetales en los humedales

La especie, la densidad y la distribución de la planta acuática de los humedales construidos, afectan el rendimiento hidráulico de manera positiva mientras sea de mayor densidad, y distribución, además de la mejora en el proceso de remoción de contaminantes. Dentro de los humedales las plantas conforman una barrera en la zona radicular [45]. Las especies vegetales correlacionan con la eliminación de nutrientes del agua residual como uso para el crecimiento, por otra parte, la especie vegetal es capaz de inferir en los tamaños de la comunidad microbiana.

El extenso sistema de raíces de las especies vegetales proporciona una gran área superficial para microorganismos unidos aumentando así el potencial de descomposición de la materia orgánica. La absorción de la planta es el principal proceso para la eliminación de nutrientes a partir de sistemas de aguas residuales que contienen plantas de Jacinto de agua, y se relaciona con la carga de nutrientes al sistema. El nitrógeno se retira a través de absorción de la planta (con la cosecha), el amoníaco se elimina a través de la volatilización y la nitrificación / desnitrificación, y el fósforo se elimina a través de absorción por la planta [46], [47].

La vegetación es un parámetro dominante de los sistemas de humedales construidos y juega un papel importante en el proceso de tratamiento de remoción de contaminantes, ya que provee procesos de filtración de partículas o sólidos, la reducción de la turbulencia dentro del humedal construido, la estabilización de los sedimentos y la provisión de una mayor área de superficie para el crecimiento de biopelícula generadas en las raíces [48].

El aumento de la diversidad de plantas mejoró el tamaño de la comunidad microbiana en el sistema de tratamiento de humedales, pero no promueve el desarrollo de la estructura de la comunidad microbiana [47]. Algunas especies vegetales son complemento de tratamiento de contaminantes persistentes como los metales tóxicos, ellas son capaces de absorber y bioacumular en los tejidos de raíz y parte aérea [50]. Por otra parte se ha observado que las siembras de varias especies dentro del cultivo mejoran las tasas de remoción en DBO y DQO, mejorar la unidad paisajística del sector y mejorar el suministro de oxígeno desde la raíz a baja radiación en el sector o área de estudio del humedal [49].

La zona de reacción activa de humedales construidos es la zona de la raíz (o rizosfera), en el cual tienen lugar procesos fisicoquímicos y biológicos inducidos por la interacción de las plantas, microorganismos, el suelo y los contaminantes. Las plantas utilizadas para la siembra de este tipo de tratamiento natural son las *Phragmites australis*, *Juncos spp*, *Typha angustifolia*, *Typha Latifolia*, *Iris pseudacorus L*, *Acorus calamus*, *Glyceria máxima*, *Carex spp* [38].

Microorganismos

La biomasa microbiana es dentro de los rangos similares en ambos humedales construidos de flujo sub superficial y de superficie. En los humedales construidos de flujo superficial se puede observar un patrón estructural estratificado de comunidad bacteriana, mientras que en los humedales construidos sub superficiales se observa un coeficiente mayor de biomasa en los sistemas de flujos horizontales, además de

la diferencia de las comunidades de microorganismos en los dos sistemas de humedales. Se presenta crecimiento heterótrofo en mayor cantidad en el sistema de flujo sub superficial específicamente en el flujo vertical, en comparación con los sistemas de flujo superficial.

Aunque se conocen comunidades y consorcios de microorganismos, es aún una caja negra en cuanto a los procesos de remoción de contaminantes [38], [43]. Los microorganismos son albergados en los humedales de flujo superficial en las raíces donde se genera la biopelícula y sobrenadantes de este tipo de consorcio, en los humedales construidos de flujo sub superficial, están presentes adheridos el biofilm al lecho [50].

La eliminación de un contaminante en particular se asocia típicamente con un grupo funcional microbiana específica, y como se observó anteriormente con la presencia o ausencia de especies vegetales sembradas. Los factores ambientales que influyen en el crecimiento y la actividad en el consorcio de los microorganismos (incluyendo la temperatura, el pH, la salinidad, la selección de especies de plantas y la disponibilidad de carbono orgánico y / o inhibir sustancias) se discuten con especial atención a los factores que podrían ser manipulados [51].

Lecho poroso

Un aspecto importante de los complejos procesos que tienen lugar en la rizosfera es la interacción entre raíces / rizomas y la matriz del suelo. El lecho poroso es el principal material de apoyo para el crecimiento vegetal y películas microbianas. Por otra parte, la matriz del suelo tiene una influencia decisiva en los procesos hidráulicos [38]. En lo que se refiere a humedales construidos, parece que el principal parámetro que influye en el sistema hidráulico del suelo es la distribución de tamaño de lecho. Estudios a largo plazo de la hidráulica de humedales construidos con diferentes parámetros del suelo indican que una mezcla de arena y grava produce los mejores resultados en términos tanto de las condiciones

hidráulicas y la eliminación de contaminantes [33], [45].

La conductividad hidráulica es una propiedad muy importante de los medios porosos, que indica la movilidad del agua dentro del suelo y depende del grado de saturación y la naturaleza del mismo, en los humedales de flujo subsuperficial como vertical, este factor es de gran importancia, dado que provee el tiempo de retención del agua residual en el tratamiento y por ende su eficiencia, es decir a mayor conductividad hidráulica menor tiempo de retención y viceversa [52].

Porosidad

La porosidad es el espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. Para el diseño de humedales es recomendable utilizar grava de 3 cm de diámetro, el cual al parecer genera mejores rendimientos o remociones. En los humedales con flujo subsuperficial [52]. El medio, las raíces de las plantas y otros sólidos ocupan parte de este espacio. Para humedales con flujo subsuperficial la porosidad varía con el tipo de medio o substrato utilizado en el sistema por diferentes factores tales como crecimiento de vegetación y producción de biofilm [55].

- **Mecanismos de acción de humedales construidos**

Los humedales construidos son capaces de proporcionar eficiencia en la remoción de material particulado, por medio de la sedimentación de los sólidos suspendidos, debido a la baja velocidad de flujo, las raíces de las plantas pueden servir como trampa de sedimentos y limita la resuspensión de material particulado. En algunos casos generando sedimentación y deposición de materia orgánica en el fondo, permitiendo obstrucción de poros en caso de humedales de flujo sub superficial, y pérdida de altura de lámina de agua en humedales de flujo libre [56].

La remoción biológica se presenta en varias partes del humedal, en parte por la captación de nutrientes de la planta, además de metales tóxicos; por otra parte, los

consorcios microbianos, utilizan el carbono de la materia orgánica como fuente de energía, la cual es transformada en energía y dióxido de carbono o metano [39]. Los procesos de absorción y adsorción se dan en la retención e inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes, principalmente por la acción de intercambio catiónico [38], [42].

Es por tal razón que los humedales están surgiendo como alternativas de bajo costo, fáciles de operar y eficientes en comparación con los sistemas de tratamiento convencional para una amplia gama de aguas residuales. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en macrófitas pueden ser definidos como sistemas naturales (SN), en los cuales las macrófitas acuáticas (plantas que crecen en suelos saturados de agua) tienen una función vital en relación con la depuración del agua residual [57].

2.3 Bases legales

En Colombia existe una legislación ambiental la cual tiene unas normas establecidas para su debido cumplimiento, en la Tabla 3, se resumen algunas de ellas.

Tabla 3. Normatividad ambiental general.

LEY 9 DE 1979	Establece el Código Sanitario Nacional la cual especifica los aspectos generales referentes a residuos líquidos. Se reglamentó con el decreto 1594 de 1984, en él se establece conceptos asociados a los vertimientos de agua residual donde establece procesos y procedimientos de la obtención de permisos de vertimientos y autorizaciones sanitarias para usuarios nuevos, métodos y pruebas de análisis, tasas retributivas y procesos sancionatorios [58].
LEY 99 DE 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones [59].
DECRETO 1594 DE 1984	Establece las definiciones pertenecientes a los vertimientos, tratamientos convencionales, usuario nuevo, existente, toxicidad, el ordenamiento del recurso, de la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas, marítimas, estuarinas y servidas,

	del vertimiento de los residuos líquidos, y de los porcentajes de remoción que es para DBO y DQO del 80%, con lo cual hasta el momento se venían desarrollando los diseños de las plantas de tratamiento como la investigada en el presente trabajo [60].
DECRETO 302 DE 2000	Reglamenta la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado, en especial el capítulo I el cual afirma de la solicitud de servicios y vinculación como usuario, cuando haya servicios públicos será obligatorio vincularse como usuario y cumplir con los deberes respectivos que no perjudiquen a la comunidad, además el diseño y la construcción de desagües deberán ajustarse a las normas y especificaciones prevista en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico [61].
DECRETO 3930 DE 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones [62].
DECRETO 1076 DE 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible [63].
RESOLUCION 1433 DE 2004	Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, y se adoptan otras determinaciones [64].
	Es la actual norma que rige los vertimientos en Colombia, adopta las definiciones de agua

<p style="text-align: center;">RESOLUCIÓN 631 DE 2015</p>	<p>residual doméstica (ARD), aguas residuales no domésticas (ARnD), dispone la aplicabilidad de los vertimientos puntuales de aguas residuales, además de los valores límites máximos permisibles microbiológicos, fisicoquímicos de vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales. Además, genera estos valores para diferentes actividades industriales y productivas como la agroindustria, ganadería, minería, hidrocarburos, alimentos y bebidas, fabricación y manufacturas de bienes y servicios y otras actividades como generación de energía eléctrica, tratamiento y disposición de residuos, entre otros y por ende su proceso de transición del decreto 1594 de 1984 [65].</p>
<p style="text-align: center;">RAS-2000</p>	<p>El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-2000), en su Sección II, Título E, regula los sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia y está publicado por la Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico del Ministerio de Desarrollo Económico de la República de Colombia [66].</p>

Fuente. Elaboración propia

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

Para la evaluación de un humedal artificial en la planta de tratamiento de aguas residuales de la unidad de apoyo y servicio del Batallón José Hilario López, el trabajo se desarrolló en tres fases con sus respectivas actividades lo cual permitió el diseño de un humedal artificial.

3.1 Fase I: EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN Y EFICIENCIA DE LA PTAR UBICADA EN EL BATALLÓN “JOSÉ HILARIO LÓPEZ”.

3.1.1 Actividad 1: Revisión bibliográfica.

Dentro de esta actividad se realizó una revisión bibliográfica de documentación científica, libros, bases de datos como la EBSCO, SCIENCE DIRECT, memorias existentes en el Batallón y en la CRC sobre las operaciones, mantenimientos que se han realizado en el transcurso de los años, planos de las estructuras de la planta de tratamiento, resultados de pruebas fisicoquímicas que se realizaron en el 2016, informes mensuales de los plazos (presupuesto) que presenta la planta, tesis de grado y demás relacionados con el funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y revisión de la documentación existente de humedales artificiales, información sobre los diferentes estudios e investigaciones que se han realizado para el tratamiento de aguas residuales, normatividad, leyes y demás información necesaria para el desarrollo del presente trabajo.

3.1.2 Actividad 2: Reconocimiento de la zona de estudio

Se realizó un recorrido el mes de septiembre del 2016, por las instalaciones del batallón de Apoyo y Servicio con la finalidad de evidenciar los principales impactos ambientales generados por las diferentes actividades que se realizan en dicho Batallón, se seleccionó la planta de tratamiento de aguas residuales como el lugar de estudio, ya que en el recorrido se evidencio el deterioro que presentaba la planta,

y se informó al Gestor Ambiental que se encontraba en el momento, se procedió a tramitar el permiso pertinente para poder realizar la practica en este lugar, el cual se hizo de manera verbal, argumentando sobre la importancia de tener un control en el manejo y mantenimiento de la PTAR, para posteriormente brindar una solución a través de un tratamiento terciario basado en el diseño de un humedal artificial, esto con el fin de obtener la aprobación para realizar las diferentes actividades propuestas.

- **Caracterización de la zona de estudio.**

Para el desarrollo de esta actividad se realizaron visitas técnicas en los meses de diciembre hasta julio del 2017, con el fin de revisar el estado actual de la planta de tratamiento desde el ingreso del efluente hasta la salida del vertimiento, en donde se verifico el mantenimiento y operación de la planta empleando una ficha con actividades de inspección. Para la ficha técnica se tuvo en cuenta todos los aspectos a verificar como son: la rejilla, la canaleta Parshall, la laguna anaerobia, laguna facultativa, lecho de secado y salida del tratamiento. Los factores bióticos como flora fauna y las condiciones organolépticas, esta ficha se realizó con el fin de ser implementado para fines ambientales en cuanto al mantenimiento y a la operación de la planta.

A continuación en la figura 9, se presentan los procesos que se realizan en la planta de tratamiento.

Figura 9. Procesos de la planta.



3.1.3 Actividad 3: Trabajo de campo y laboratorio

Como primera instancia se realizó la georreferenciación con un GPS Trimble TerraSync, en los puntos de entrada y salida para tener más exactitud del lugar, ya que en estos dos puntos se ejecutarán las siguientes actividades.

- **MEDICIÓN DE CAUDAL**

Para el desarrollo de esta actividad se seleccionaron dos puntos en la entrada y la salida para determinar el caudal, para el caudal de ingreso se realizó por el método aforo con flotadores, para el caudal de salida se tomó el método aforo volumétrico, su elección dependió del tipo de fuente superficial o vertimiento, características del sitio y condiciones al momento de su realización.

AFORO CON FLOTADORES

Para determinar el caudal de ingreso se utilizó el método de flotadores ya que es el más sencillo, para el aforo, se escogió una sección recta del canal la cual se midió y demarco una distancia a lo largo, posteriormente se colocó suavemente sobre la superficie del agua una pelota flotante y simultáneamente se activó el cronometro para medir el tiempo transcurrido hasta que el objeto termine de recorrer la distancia asignada.

Instrumentos utilizados:

- Cinta métrica
- Pelota de pingpong
- Cronometro
- Jalón

Descripción del procedimiento del aforo con flotadores

- Como primer paso se determina el punto de muestreo, este será tomado como el punto 1, ya que es aquí donde se puede realizar este tipo de aforo, como se puede observar en la figura 10.



Figura 10. Canal rectangular.

- Se demarca la longitud de una sección recta y en el punto de inicio se tomó la altura de la lámina de agua cada hora para determinar el caudal promedio, como se muestra en las siguientes figuras 11 y 12.



Figura 11. Medición de longitud.



Figura 12. Medición lámina de agua.

- Se verifico el tipo de material del fondo del canal.
- Se procede a verificar que el cronometro este en ceros, y que la pelota no presente ningún agujero, la pelota es colocada en el agua suavemente para evitar que este no le imprima una fuerza adicional que pueda afectar la medición, simultáneamente se activa el cronometro, y se toma el tiempo que trascurre la pelota en longitud demarcada este proceso termina una vez la pelota llegue al final y a su vez se detiene el cronometro, como se observa en la figura 13.



Figura 13. Recorrido del flotador.

- Este procedimiento se realizó con repeticiones de 5 tomas para evitar un margen de error.
- Finalmente con los datos obtenidos del aforo con flotadores se procede a para determinar el caudal con las siguientes ecuaciones.

La velocidad del agua se calcula de la siguiente manera:

$$V = \frac{X}{t} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (1)$$

V: velocidad superficial (m/s)

X: longitud recorrida por el elemento flotante (m)

t: Tiempo de recorrido del elemento flotante (s)

El caudal se calcula de la siguiente manera:

$$Q = n * V * a \quad (2)$$

Q: Caudal en metro cubico por segundo (m³/s)

V: Velocidad superficial (m/s)

A: Área transversal promedio (m²)

n: Factor que depende del material del fondo del canal: en la siguiente tabla 4 determina el factor (n) del canal.

Tabla 4. Material de Fondo.

MATERIAL DEL FONDO DEL CANAL	
FACTOR (n)	TIPO DE FONDO
0,4 - 0,52	Poco áspero.
0,46 - 0,75	Grava con hierba y caña.
0,58 - 0,7	Grava gruesa y piedras.
0,7 - 0,9	Madera, hormigón o pavimento.
0,62 - 0,75	Grava.
0,65 - 0,83	Arcilla y arena.

Fuente. Disponible en Guía para el monitoreo de vertimientos [68].

AFORO VOLUMÉTRICO

Para el cálculo del caudal de salida se implementó este método por la caída del agua, para realizar el aforo volumétrico se necesitó un cronometro y un recipiente aforado de 10 litros. El recipiente fue colocado bajo el vertimiento mediante una sección de tubería, de tal manera que recibiera todo el flujo, simultáneamente se activa el cronograma. Este proceso inicia en el preciso instante en que el recipiente se introduce al vertimiento y se detiene en el momento en que se retira de ella. Esto con el fin de obtener el volumen de agua vertida y de esta manera poder calcular el caudal promedio y la carga contaminante.

Instrumentos utilizados:

- Recipiente de 10 litros
- cronometro

Descripción del procedimiento del aforo volumétrico

- Como primer paso se determina el punto de muestreo, indicando que el punto 2 se podrá aforar por el método volumétrico, como se puede observar en la Figura 14.



Figura 14. Punto 2 Aforos volumetría.

- Se procede a verificar que el cronometro este en ceros, y que el recipiente no presente ningún agujero, el recipiente se colocar en la tubería de salida, simultáneamente se activa el cronometro, este proceso termina una vez el recipiente quede totalmente lleno hasta donde esta demarcado y a su vez se detiene el cronometro, estos pasos se ejecutó para los dos tubos.
- Este procedimiento se realizó mensualmente con repeticiones de 5 tomas.
- Finalmente con los datos obtenidos de tiempo y volumen a través del aforo volumétrico se procede a determinar el caudal con la siguiente ecuación.

Ecuación del caudal:

$$Q = \frac{V}{t} \left(\frac{L}{s} \right) \quad (3)$$

Q: Caudal en litros por segundo (L/s)

V: Volumen el litro (L)

T: Tiempo en segundos (s)

Este método tiene la ventaja de ser el más sencillo y confiable, siempre y cuando el lugar donde se realice el aforo garantice que al recipiente llegue todo el volumen de agua que sale por la corriente o vertimiento, en la figura 15 se observa el método empleado.



Figura 15. Aforo por método volumétrico.

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Para comprobar el estado actual en que se encuentra el agua residual fue necesario realizar una serie de muestras, las cuales fueron tomadas en dos puntos estratégicos, la entrada y la salida de la planta, esto con el fin de realizar un análisis de acuerdo a la normatividad existente.

Descripción del procedimiento

Antes de iniciar el muestreo fue importante tener claramente definido la forma de cómo serán tomadas las muestras, para ello se tuvo en cuenta la guía de caracterización de los vertimientos estipulada por el IDEAM [68]. A continuación, se explica detalladamente que se tuvo en cuenta.

- **Tipo de muestreo**

El tipo de muestreo corresponde al muestreo manual, ya que es un sitio de fácil acceso y su ventaja es que permite tomar la muestra sin ningún inconveniente, tanto en el punto de entrada como en el de salida de la PTAR, además de ellos se pudo observar las características del agua en cuanto a sustancias flotantes, color, olor, aumento o disminución de caudales.

- **Descripción del muestreo**

Se realizó el muestreo compuesto de 4 horas en la entrada y salida, punto 1 y 2 de la PTAR, (Ver Figura 16), donde se tomaron muestras puntuales de acuerdo con el instructivo para la toma de muestras de agua residual IDEAM [68], para la medición en campo de pH, Temperatura y Caudal; y para muestras con el fin de analizar en el laboratorio: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Color, Conductividad, Oxígeno (O_2), Nitritos (NO_2), Nitratos ($N-NO_3$), Amonio ($N-NH_3$) y Fosfatos (PO_4^{3-}). De la siguiente manera: las botellas fueron previamente organizadas y rotuladas, para la ejecución del llenado de las muestra son previamente purgadas, por lo que fue necesario tomar una pequeña muestra en un balde, se agregó a la botella se tapó, agito y luego se desechó.

Lo anterior con el propósito de verificar el cumplimiento del Decreto 1594 de 1984, Decreto 3930 del 2010 y Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Punto 1. Entrada

Punto 2. Salida



Figura 16. Puntos de muestreo.

Para el llenado de las botellas se calcula la alícuota como se observa en la tabla 5, posteriormente se toma la medida de la alícuota por medio de la probeta y se embaza, este proceso se realiza cada 60 minutos con el valor de la alícuota (Ver Figura 17), simultáneamente se mide el pH con la cinta y temperatura con un termómetro.

Tabla 5. Alícuotas

MEDIDA DE LA BOTELLA- mL	ALICUOTA $alicuota = \frac{\text{medida botella}}{4 \text{ horas}}$
---------------------------------	---

Fuente. Elaboración propia



Figura 17. Toma de alícuota

- **Preservación de la muestra**

Para la preservación de la muestra esta se dispuso en una nevera portátil con hielo la cual, esta adecuada a una temperatura promedio de unos 4°C (Ver Figura 18), para que la calidad de la muestra no se vea alterada al momento de ser transportada para su respectivo análisis [68].



Figura 18. Preservación de la muestra.

- **Método estándar empleado para cada muestra.**

En la Tabla 6, se presenta las especificaciones de Método estándar para el análisis del agua.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos

TIPO DE MUESTRA	PARAMETRO	SIMBOLO	UNIDADES DE MEDICION	METODO EMPLEADO
	Demanda bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg O ₂ /L	SM: 5210 D Respirométrico Incubación 5

AGUA	Demanda química de Oxígeno	DQO ₅	mg O ₂ /L	SM: DRB200 Espectrofotómetro DR 3900
	RESIDUAL	Solidos suspendidos totales	SST	mg/L
	Color	C	units PtCo	SM: Espectrofotómetro DR 3900
	Conductividad	-	µs/cm	SM: CDC401 sonda HQ40d
	Oxígeno	OD	mg/L	SM: HQ40d Sonda
	Nitritos	NO ₂	mg/L	SM: LR Espectrofotómetro DR3900
	Nitratos	N-NO ₃	mg/L	SM: Espectrofotómetro DR3900
	Amonio	N-NH ₃	mg/L	SM: Espectrofotómetro DR3900
	Fosfatos	PO ₄ ³⁻	mg/L	SM: TNT vial HR Espectrofotómetro DR 3900
	Potencial de hidrogeno	pH	U de pH	SM: PHC301 Sonda HQ40d

Fuente. Elaboración propia.

3.1.4 Actividad 4. Análisis de las muestras

Para el análisis de las muestras se realizó una comparación con los resultados obtenidos y los parámetros permisibles estipulados por el Decreto 1594 de 1984, Decreto 3930 d el 2010 y la Resolución 0631 del 2015 (Ver tabla 13), y para estimar la carga contaminante presente en el efluente de la planta se realiza por medio de la ecuación 4.

Carga contaminante

$$c.c = Q \left(\frac{L}{s} \right) * [] \left(\frac{mg}{L} \right) \quad (4)$$

Donde

c.c: Carga contaminante

Q: Caudal en l/s

[]: Concentración de DBO (mg/l)

Para el cálculo del porcentaje de remoción se utilizará la ecuación 5:

$$\% \text{ remocion} = \frac{[]_{\text{entrada}} - []_{\text{salida}}}{[]_{\text{entrada}}} * 100 \quad (5)$$

Donde

[]: Concentración de DBO (mg/l)

Nota: Debido a que no se pudo realizar el análisis por triplicado de las pruebas fisicoquímicas por parte del Batallón, solo se realizaron dos análisis, el cual se obtuvieron pocos datos, por ello se utilizó el Software Microsoft Excel para la determinación de gráficas.

3.2 Fase II: COMPARACIÓN TEORICA ENTRE EL HUMEDAL SUPERFICIAL Y HUMEDAL DE FLUJO SUB SUPERFICIAL.

3.2.1 Actividad 1: Revisión bibliografía

Para esta actividad se realizó una revisión bibliografía en revistas científicas, tesis, artículos científicos; y posteriormente se hizo una comparación entre los dos humedales.

Para la comparación teórica se implementó una tabla, donde se tiene en cuenta los aspectos más importantes como son costos, eficiencia y dimensiones, (ver anexo

B). Para determinar cuál de estos dos humedales será el más eficiente en términos de remoción fue necesario tomar los resultados obtenidos de las pruebas físico-químicas y el análisis teórico, para establecer el humedal más óptimo para el tratamiento terciario.

3.3 Fase III: DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL

3.3.1 Actividad 1: Diseño del humedal.

Para el diseño del humedal fue necesario conocer las características del agua residual y se tuvo en cuenta las variables de caudal, y posteriormente realizar los cálculos hidráulicos, esto basado en la Guía para el diseño de un humedal ya que tiene una dependencia directa del caudal y la concentración de carga contaminante [69]. Se tuvo en cuenta las relaciones largo – ancho, por eso se realizó las respectivas medidas donde será implementado el humedal, como también se tendrán en cuenta la impermeabilización de la capa subsuperficial del terreno, colocación del medio granular, elección del tipo de vegetación y verificación de las condiciones térmicas y cinéticas en el proceso de remoción.

Los cálculos se realizaron con la siguiente fórmula hidráulica y con relación de largo ancho de 3:2 por medio de la ecuación 6.

Área Superficial

$$As = LW = \frac{Q * Ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{Kt * D * n} \quad (6)$$

Donde

As: Área superficial del humedal, (m²).

L: Largo del humedal

W: Ancho del humedal

Q: Caudal medio (m³/d).

Co: Concentración de DBO en el afluente, (mg/L).

Ce: Concentración de DBO en el efluente, (mg/L).

KT: Constante de primer orden dependiente de la temperatura, (d⁻¹).

n: Porosidad promedio del sistema, en fracción decimal.

d: Profundidad efectiva (m).

Para la constante de primer orden se realiza con la siguiente fórmula 7.

$$KT = 1.104 * [(1,06)]^{(T-20)} \quad (7)$$

Donde

T: Temperatura más baja registrada.

Se procede a sacar el área con la ecuación 6, y posteriormente se realiza la relación largo ancho el cual será de 3:2.

$$\frac{L}{W} = \frac{3}{2}$$

Para realizar el cálculo de Retención Hidráulica se realiza con la siguiente ecuación 8.

Tiempo de Retención Hidráulica

$$TRH = \frac{V*n}{Q} \quad (8)$$

Donde

V: Volumen.

n: Porosidad efectiva.

Q: Caudal (m³/día).

Finalmente se realiza la ecuación 9 para el área transversal.

Área Transversal

$$AT = \frac{Q}{K_s * S} \quad (9)$$

Donde

Q: *Caudal (m³/día)*

Ks: Conductividad hidráulica

S: Pendiente.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación de la operación, mantenimiento y eficiencia de la PTAR

4.1.1 Zona de estudio

La población del cantón militar, está constituida por oficiales, suboficiales, soldados y personal civil, con un rango de número de personas entre 800 a 1.200, este número de personas varia en determinado tiempo, razones por las cuales el personal es trasladado a otras ciudades o por el ingreso de nuevos militares, denominados, así como población flotante según datos del Batallón BAS 29.

Para el normal desarrollo de las actividades cotidianas del cantón Militar, el acueducto y alcantarillado de Popayán, suministra los volúmenes agua para suplir todas las necesidades en el cantón. A continuación, en la tabla 7 se describe el uso del agua por cada uso general que realizan en el Cantón Militar.

Tabla 7. Uso del agua en el Cantón Militar.

USO GENERAL	USO ESPECIFICO
CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO	Bebida directa. Funcionamiento de cafetines, baterías sanitarias, lavado de pisos e instalaciones. Preparación de alimentos en las cafeterías Riego de canchas, jardines y zonas verdes
INDUSTRIAL	Lavado de vehículos
RECREATIVO	Llenado, operación y mantenimiento de la piscina.
PECUARIO	Alimentación de los animales de la granja.
AGRÍCOLA	Riego de cultivos.

Fuente. Elaboración propia

Por lo anterior las fuerzas militares implementaron un manual ambiental dentro de su cantón para velar por la conservación y prevención del medio ambiente y los recursos naturales, implementando desde el año 2004, un sistema de tratamiento de aguas residuales, con el fin de dar cumplimiento a las normas y leyes establecidas por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible sobre el manejo de los vertimientos de agua residual.

Las aguas residuales del cantón militar son conducidas por una red de alcantarillado sanitario con un diámetro de 10" y un diámetro interno de 8" en material de PVC, hasta llegar a la red de distribución del sistema de tratamiento biológico con una entrada de tubería de PVC con un diámetro de 6" y un diámetro interno de 4" [67], su pre-tratamiento consiste en una rejilla para la retención de los residuos sólidos; continua el canal de aducción el cual es una estructura hidráulica conocida como canaleta parshall, su función es medir la cantidad de agua que pasa por la sección del canal (caudal), posteriormente el agua residual es conducida a un tratamiento primario de lagunas que se encuentran en función de serie con el fin de minimizar la carga contaminante a través de un proceso biológico y microbiano.

A continuación, se describe en la tabla 8, la localización de la PTAR, la entrada (punto 1) y la salida (punto2).

Tabla 8. Coordenadas PTAR.

COORDENADAS			
	PTAR	ENTRADA (punto 1)	SALIDA (Punto2)
N	76°37' 11.1"	02° 27' 50.6"	02° 27' 46.3"
W	02° 27' 30.0"	76°37' 18.8"	76°37' 27.0"
msnm	1723	1111	1111

Fuente. Elaboración propia



Figura 19. Ubicación del batallón José Hilario López.

4.1.2 Inspección de la PTAR

En compañía con el soldado a cargo de la planta se verifico el estado actual de la planta con el fin de realizar la inspección mensual en función de mantenimiento y operación (ver Tabla 9). La siguiente ficha indica con una X lo que se observó en el transcurso de las visitas mensuales.

Además de ello se implementó para el control de operación y mantenimiento correctivo y preventivo una tabla en la cual se determinó con una X si se cumplió con lo planteado en el transcurso de los meses.

Tabla 9. Operación y Mantenimiento de la PTAR.

FUERZAS MILITARES DE COLOMBIA EJERCITO NACIONAL	LISTA DE VERIFICACION E INSPECCION								
	GESTION DE INGENIEROS								
	PROCESO DE INSPECCIONADO: Operación y Mantenimiento de la PTAR.								
Unidad inspeccionada : Planta de Tratamiento de aguas residuales									
Responsable del proceso inspeccionado: María Alejandra Garzón Sánchez									
<p>Localización. La planta de tratamiento de agua residual está ubicada en el batallón de apoyo y servicio BAS 29, bajo las coordenadas</p> <p style="text-align: center;">N: 02° 27' 50.6" W: 76°37' 18.8" ASNM: 1111 m</p> <p>La planta fue diseñada en este punto estratégico razón por la cual es un lugar retirado de la población civil con el fin de evitar problemas de saneamiento y contacto con vectores de enfermedades.</p>									
OBSERVACIONES EN LAS REJILLAS									
CARACTERÍSTICAS	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	
OPERACIÓN									
APARIENCIA									
Obstrucción		X	X	X			X	X	
Corrosión	X	X	X	X	X	X	X	X	
SOLIDOS FLOTANTES									
Ausentes									
Ligeros	X						X		
Apreciables		X	X	X				X	
OLOR									
Inodoro									

Ligero	X							
Apreciable		X	X	X	X	X	X	X
OTROS								
Aves		X		X			X	X
Peces								
Insectos		X	X	X	X	X	X	

DIMENSIONES	<p>25 barros de 3 mm de diámetro, con separaciones de aproximadamente 0,03 m, sin inclinación.</p>	
	<p>El segundo sistema de rejilla, se encuentra ubicado después de la canaleta parshall con las siguientes características:</p> <p>Las rejillas instaladas están situadas en posición vertical, constituidas por 15 barras de 5 mm con separación entre barros de 0,05 m [67].</p>	

OBSERVACIONES EN LA LAGUNA ANAEROBIA

CARACTERÍSTICAS	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
OPERACIÓN								

APARIENCIA								
Verdosa	X							
Verde lechoso		X						
Marrón								
Grisácea			X	X	X	X	X	X
LODOS FLOTANTES								
Ausentes	X							
Ligeros		X						
Apreciables			X	X	X	X	X	X
GRASAS								
Ausentes								
Ligeros								
Apreciables	X	X	X	X				X
NATAS								
Ausentes								
Ligeros	X							
Apreciables	X	X	X	X				X
PRESENCIA DE VEGETACION								
Algas	X							
OLOR								
Inodoro		X	X	X	X	X	X	X
Ligero	X							
Apreciable								
OTROS								
Aves	X			X	X			X
Insectos	X	X	X	X	X	X	X	X
	La laguna anaerobia tiene las siguientes condiciones.							

Algas	X							
OLOR								
Inodoro								
Ligero	X							X
Apreciable		X	X	X	X	X	X	
DAÑOS								
Ruptura geomeembrana	X	X	X	X	X	X	X	X
Erosión								
OTROS								
Aves	X			X	X			X
Peces								
insectos		X	X	X	X	X	X	
DIMENSIONES	<p>La laguna anaerobia tiene las siguientes condiciones.</p> <p>Largo 130,0 m</p> <p>Ancho 41,0 m</p> <p>Profundidad 2,25 m</p>							
OBSERVACIONES CANALETA PARSHALL								
<p>La canaleta es estructura hidráulica hecha en concreto la cual consta de una construcción lateral dividida en cuatro partes: transición de entrada, sección convergente, garganta y sección divergente. Se encuentra un concreto erosionado a causa de la fricción de la corriente de agua residual, además presenta musgos y vegetación a su alrededor.</p>								



OBSERVACIONES LECHO DE SECADO

Se observa la presencia de lodos en los cuatro módulos de secado y tienen una especie vegetal en crecimiento, con lo cual se presume que no existe un retiro de este material en una amplia fracción de tiempo, se evidencia que no existe un acondicionamiento final de dichos lodos.

El volumen de lodos tratados es aproximadamente 2.47 m³ por cada mantenimiento de las lagunas presentes en el Sistema.

DIMENSIONES

Módulo 1 Ancho 5,3 m
 Largo 4,26 m
 Módulo 2 Ancho 5,3 m
 Largo 4,28 m
 Módulo 3 Ancho 5,3 m
 Largo 4,25 m
 Módulo 4 Ancho 5,3 m
 Largo 4,27 m



OBSERVACIONES SALIDA DEL TRATAMIENTO

El punto de la salida del vertimiento tiene una estructura en concreto con 2 orificios de tubería de 6" de diámetro en material de PVC, esta es la última etapa donde el agua residual previamente tratada es vertida al afluente con una caída de aproximada de 1,5 m lo cual puede generar una oxigenación del efluente final (Rio Cauca).



Fuente. Elaboración Propia

Para cumplir con los reportes de operación y mantenimiento se realizó un registro con las necesidades de operación y mantenimiento plasmadas en la tabla 10 y se especifica con una X en que meses se ejecutaron dichas actividades.

Este registro se basó en las visitas, (ver Tabla 9), y posteriormente se informó al supervisor de la planta para solicitar la ejecución de estas mejoras.

Tabla 10.Registro.

Registro Correctivo y Preventivo								
Registro operacional	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Caudal de entrada y salida	X	X	X	X	X	X	X	X
Características fisicoquímicas						X		X
Registro de mantenimiento								
Limpieza de rejillas					X	X		
Manejo de los residuos extraídos					X	X		

Cambio de barrotes de las rejillas por causa de corrosión								
Mejoramiento de las paredes de concreto de la canaleta parshall por causa de fragmentación.								
Extracción de material flotante (natas) laguna anaerobia					X	X		
Limpieza de vegetación					X	X		
Extracción de lodos								
Manejo de lodos								
Extracción de material flotante laguna facultativa					X	X		
Aplicación de bacterias								
Construcción de zanjas para lodos								
Implementación de letreros y señales para la prevención de accidentes		X	X	X	X	X	X	X
Implementación de cercas de protección		X	X	X	X	X	X	X
Poda de la planta		X				X	X	

Registro de seguridad del personal								
Casco								
Guantes					X	X		
Mascara respiratoria					X	X		
Botas de caucho					X	X		
Overol								
Botiquín de primero auxilios								

Fuente. Elaboración propia.

4.1.2.1 Condiciones actuales del sistema.

De acuerdo a la visita realizada se estableció, las falencias en los procesos de tratamiento, basados en operación y mantenimiento, por ello se implementó la tabla 9 y posteriormente se diseñó un registro preventivo y correctivo, como se puede observar en la tabla 10.

En el proceso de rejillas en los meses de enero hasta marzo del 2017, se presentaba obstrucción por los sólidos retenidos, provocando proliferación de insectos y presencia de aves, por esto fue necesario solicitar la limpieza de estas rejillas y se ejecutó esta actividad en los meses de abril y mayo, del presente año, también se evidencia que los barrotes presentan corrosión por lo que se estableció el cambio de estos, pero en el transcurso de las visitas no fue posible hacer el cambio, razón por la cual la planta no disponía de recursos económicos y no contaba con un operador a cargo. En las dimensiones, se evidencia que en el segundo sistema de rejillas los barrotes tienen una separación aun mayor que en la entrada, por esto se requiere de un mantenimiento preventivo en la sustitución de la segunda estructura, por rejillas finas para mejorar la eficiencia de remoción de sólidos como bolsas plásticas, hojas, y demás componentes que pueden estar ingresando al sistema de

lagunas, el olor del agua que pasa por estas rejillas es apreciable ya que aún no se realiza un proceso de tratamiento biológico y el agua residual se encuentra en estado de septicidad.

En cuanto a la canaleta parshall no se encuentra una curva de calibración de esta estructura para poder utilizarla como sistema de aforo de caudal de entrada, además el concreto se encuentra erosionado, se informa y se solicita la limpieza de la estructura ya que presenta musco en sus paredes, esta actividad no fue realizar en el transcurso de los meses, razones mencionadas anteriormente.

La observación del cambio de color de la laguna anaerobia fue evidente ya que en el mes de diciembre, la laguna tenía una apariencia verdosa, a partir de enero, se tuvo un cambio evidente pasando a color grisácea y con mal olor de tipo inodoro, las posibles causas del olor, son por la presencia de hidrogeno sulfurados y demás tipos de gases, además una sobrecarga orgánica, que ocasiona la disminución del pH, provocando así la muerte de las algas, como evidencia en los meses de enero a julio, y a su vez generando el cambio de color de la laguna [70]. También se evidencia natas, lodos y grasas ocasionando la proliferación de insectos, se solicitó la limpieza de todas las estructuras de la planta y en el mes de abril y mayo se ejecutó dicha solicitud, pero en el mes de julio se volvió a presenciar las natas y grasas, distribuidas en toda el área de la laguna. Por ello se ve la necesidad de un diseño y construcción de un sistema de captura de estos componentes, debido a que las grasas y aceites tienden a acidificar los cuerpos de agua.

La laguna facultativa también presenta un cambio de color, de verdosa a grisácea, evidenciando que posiblemente la laguna no esté funcionando correctamente, ya que uno de los signos de buen funcionamiento en las lagunas facultativas, es el desarrollo de un color verde brillante debido a la presencia de algas. El olor fue apreciable, un signo que evidencia falencias ya que en este proceso los hidrogeno sulfurados o los diferentes tipos de gases tiendes a disminuir; las posibles causas del cambio de color y olores sea por una alta carga orgánica, disminución de pH,

disminución de concentración de oxígeno y sustancias tóxicas, o una sobrecarga de la tasa de aplicaciones afectando directamente al crecimiento de las algas [25].

Además se evidencia la presencia de natas, material flotante causado posiblemente por la afloración de lodo de fondo, poca circulación de la masa de agua y actuación del viento, se observa un área extensa de vegetación denominada como Buchón de agua que limita la penetración de energía luminosa, provocando una disminución de oxígeno disuelto e indicando desbalance de nutrientes y baja carga orgánica. En el transcurso de los meses de visita se observa que no se ha realizado la aplicación de la sepa de bacterias aerobias, es decir un proceso de arranque del sistema, las bacterias desempeñan una función vital en el proceso natural de estabilización, por tal motivo se solicitó la aplicación de la sepa bacteriana, esta actividad tampoco se ejecutó razones mencionadas anteriormente, la limpieza de la laguna se realizó en el mes de abril y mayo, se observa el englobamiento de tres puntos de la geomembrana, provocando la infiltración de estas aguas y disminuyendo el caudal de salida, como se puede observar en la Gráfica 1.

El lecho de secado presenta lodos que no han sido retirados, lo cual genera una ineficiencia del sistema. La presencia de especies vegetales dentro de esta estructura puede indicar un periodo de tiempo amplio en el cual no se le ha realizado una operación adecuada y por ende un mantenimiento. Se observó, además, que no se realiza un proceso final para la disposición de estos lodos, se informó y recomendó realizar zanjas para disponer estos lodos para lo cual no se obtuvo respuesta alguna.

En el proceso final del tratamiento de aguas se evidencia que se está generando una oxigenación adecuada, ayudando así al desarrollo de remoción de la materia orgánica que no fue removida por los procesos anteriores.

En la tabla 10 se puede evidenciar el registro preventivo y correctivo, en el cual se realizaron actividades para mejora, en las fallencias que se presentaban en los

procesos a nivel de operación y mantenimiento, evidenciando que no fue posible ejecutar las medidas correctivas razones mencionadas anteriormente, además de ello no se tenía un seguimiento de las necesidades que podía presentar la planta.

4.1.3 Trabajo de campo y Eficiencia de la PTAR

4.1.3.1 Medición de Caudal

Para cumplir con los registros operacionales se realizó la medición mensual de caudales en la entrada y en la salida de la PTAR, (ver Tabla 11).

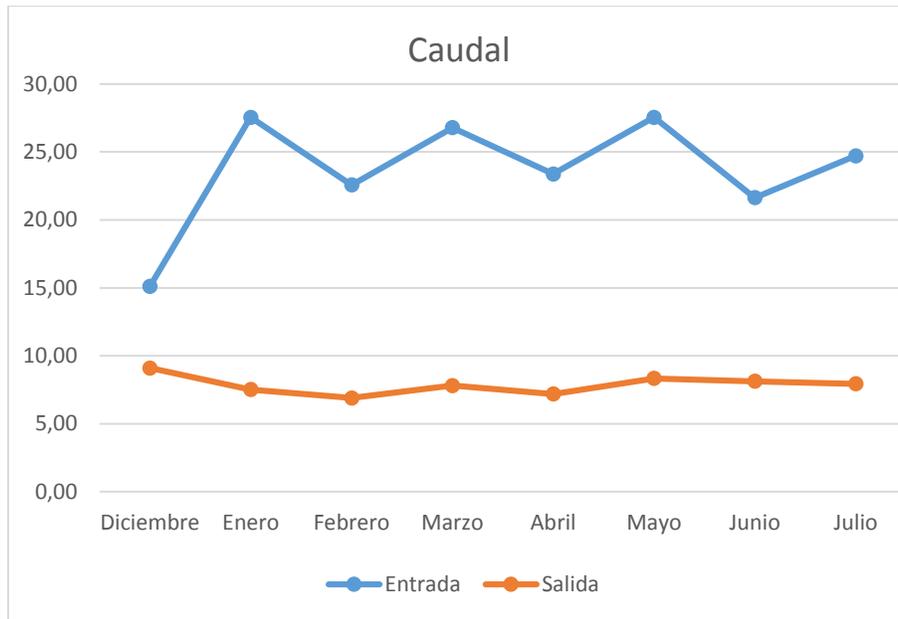
Tabla 11. Medición de Caudal y Temperatura.

CAUDAL ENTRADA			CAUDAL SALIDA		Temperatura
Mes	Caudal (m ³ /s)	Caudal (l/s)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (l/s)	°C
Diciembre	0,0151	15,1079	0,0091	9,0909	22
Enero	0,0275	27,5434	0,0075	7,5188	20
Febrero	0,0226	22,5666	0,0069	6,8966	21
Marzo	0,0268	26,7785	0,0078	7,8125	22
Abril	0,0234	23,3705	0,0072	7,1942	22
Mayo	0,0275	27,5402	0,0083	8,3333	20
Junio	0,0216	21,6324	0,0081	8,1301	21
Julio	0,0247	24,7104	0,0079	7,9365	20

Fuente. Elaboración propia.

En la Grafica 1 se observa los caudales que se tomaron en el transcurso de ocho meses.

Grafica 1. Medición de Caudal



Se evidencia que en el caudal de entrada incremento en los meses de enero, marzo, mayo y julio, las dos posibles causas son el aumento de las precipitaciones e ingreso de nuevo personal al Cantón Militar. El caudal de salida disminuye notoriamente, las posibles causas es que haya una ruptura en el sistema de tuberías y que en la laguna de estabilización se esté infiltrando las aguas residuales a través de las capas freáticas del suelo, ya que la geomembrana se encuentra rota.

4.1.3.2 Pruebas fisicoquímicas

A través del laboratorio del SENA, se realizó el 24 de mayo y el 11 de Julio 2017, en la entrada y salida de la PTAR de la unidad BAS-29, un muestreo compuesto de 4 horas con intervalos de 60 minutos, con alícuotas de 500 mL para cada botella de 2000 mL. A continuación se reporta los resultados de los análisis de los parámetros fisicoquímicos.

Reporte resultados- Muestras de agua

Resultados 24 de Mayo de 2017.

	Servicio Nacional de Aprendizaje Reporte resultados- Muestras de agua
---	--

Identificación de la muestra

Sitio de muestreo	Coordenadas
Entrada PTAR	N: 02° 27' 50.6" W: 76°37' 18.8" ASNM: 1111 m
Salida PTAR	N: 02° 27' 46.3" W: 76°37' 27.0" ASNM: 1111 m

PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA
Color	89 units PtCo	84 units PtCo
Conductividad	616 μ s/cm	410 μ s/cm
Oxigeno	5,57 mg/L	7,50 mg/L
Nitritos	19 mg/L	34 mg/L
Nitratos	6,7 mg/L	12,2 mg/L
Amonio	9,33 mg/L	9,44 mg/L
Fosfatos	15,9 mg/L	16,2 mg/L
pH	8,4	9,2
Solidos S.T	18,9 mg/L	25 mg/L
DQO	407 mg/L	247 mg/L

DBO	263 mg/L	80 mg/L
-----	----------	---------

Caudal de entrada: 27 l/s

Caudal de salida: 8 l/s

Resultados 11 de julio de 2017

	Servicio Nacional de Aprendizaje Reporte resultados- Muestras de agua
---	--

Identificación de la muestra

Sitio de muestreo	Coordenadas
Entrada PTAR	N: 02° 27' 50.6" W: 76°37' 18.8" ASNM: 1111 m
Salida PTAR	N: 02° 27' 46.3" W: 76°37' 27.0" ASNM: 1111 m

PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA
Conductividad	703 µs/cm	524 µs/cm
Oxigeno	4,49 mg/L	6,86 mg/L
Nitritos	106 mg/L	5,0 mg/L
Nitratos	78,4 mg/L	3,3 mg/L
Amonio	0,464 mg/L	29,3 mg/L
Fosfatos	41,2 mg/L	13,5 mg/L
pH	6,92	7,61

Solidos ST	252 mg/L	18 mg/L
DQO	291 mg/L	143 mg/L
DBO	310 mg/L	60 mg/L

Caudal de entrada: 24 l/s

Caudal de salida: 7 l/s.

- **Calculo de la Carga Contaminante.**

Muestreo 1.

DBO

$$c.c = 8 \left(\frac{L}{s} \right) * [80] \left(\frac{mg}{L} \right) = 640 \left(\frac{mg}{s} \right) = 55,30 \left(\frac{Kg}{día} \right)$$

DQO.

$$c.c = 8 \left(\frac{L}{s} \right) * [247] \left(\frac{mg}{L} \right) = 1976 \left(\frac{mg}{s} \right) = 170,73 \left(\frac{Kg}{día} \right)$$

Muestreo 2.

DBO

$$c.c = 7 \left(\frac{L}{s} \right) * [60] \left(\frac{mg}{L} \right) = 420 \left(\frac{mg}{s} \right) = 36,29 \left(\frac{Kg}{día} \right)$$

DQO.

$$c.c = 7 \left(\frac{L}{s}\right) * [143] \left(\frac{mg}{L}\right) = 1001 \left(\frac{mg}{s}\right) = 86,49 \left(\frac{Kg}{día}\right)$$

- **Calculo del porcentaje de remoción**

Muestreo 1.

DBO

$$\% \text{ Remocion} = \frac{263 \frac{mg}{l} - 80 \frac{mg}{l}}{263} * 100 = 69,58 = 70\%$$

DQO

$$\% \text{ Remocion} = \frac{407 \frac{mg}{l} - 247 \frac{mg}{l}}{247 \frac{mg}{l}} * 100 = 64,78 = 65\%$$

Muestreo 2.

DBO

$$\% \text{ Remocion} = \frac{310 \frac{mg}{l} - 60 \frac{mg}{l}}{310} * 100 = 80,64 = 80\%$$

DQO

$$\% \text{ Remocion} = \frac{291 \frac{mg}{l} - 143 \frac{mg}{l}}{291 \frac{mg}{l}} * 100 = 50,85 = 50\%$$

Evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual

- **Comparación normatividad de vertimientos.**

En la tabla 12, se puede observar una comparación entre los resultados realizados por Anascol en el año 2016 (Ver anexo C) y un promedio de los resultados obtenidos en las pruebas fisicoquímicas del presente año (ver reporte resultados), y posteriormente, se comparó con la normatividad de vertimientos. Las casillas que aparecen con un (-), indica que no registran valores permisibles o que está en análisis y el símbolo %R significa Porcentaje de Remoción.

Tabla 12. Comparación normatividad de vertimientos.

Parámetro	Unidad	Resultados 2016		Resultados 2017		Normatividad		
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Decreto 1594 De 1984	Decreto 3930 De 2010	Resolución 0631 De 2015
Color	units PtCo	-	-	89	84	75 unid	-	-
pH		7,8	8,6	7,6	8,4	5-9	6,5 -8,5	6-9
DBO	(mg/L)	231	204	286	70	Remoción 30%	Remoción 80%	90,00
			% R. 11		% R. 75			
DQO	(mg/L)	452	381	349	195	-	Remoción 80%	180,00
			% R. 15		% R. 44			
SST	(mg/L)	330	137	135,1	21,5	Remoción 50%	50	90,00

Fuente. Elaboración propia.

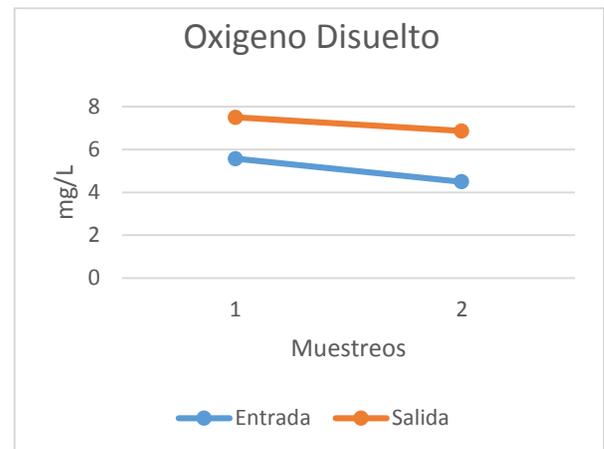
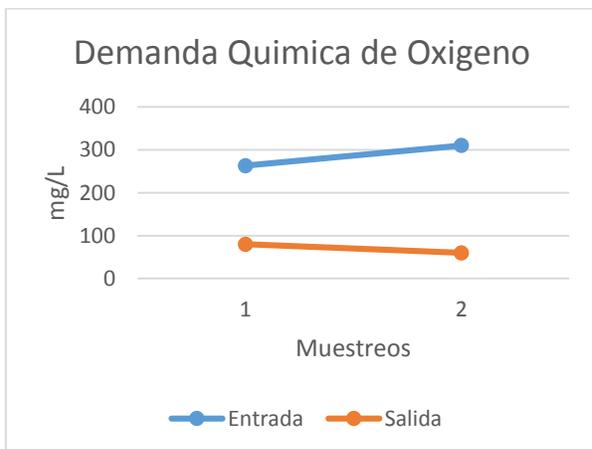
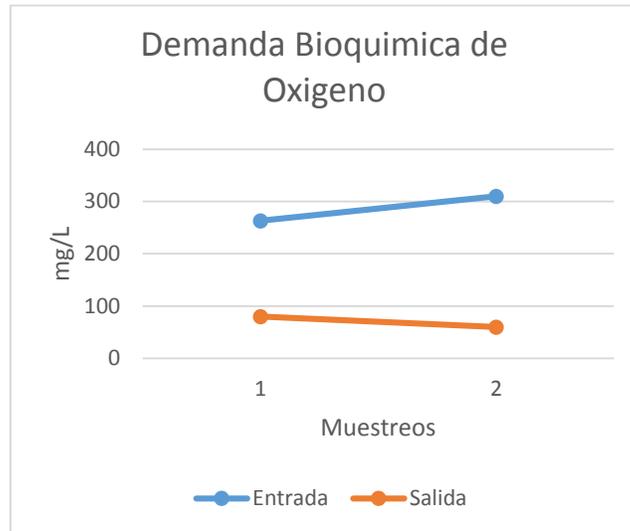
Respecto a los datos obtenidos por la tabla 12 se puede inferir lo siguiente:

El color del vertimiento arrojó un valor de 84 unidades, indicando que no se está cumpliendo con el parámetro establecido por el Decreto 1594 de 1984, el cual establece un color real de 75 unidades, una de las posibles causas, son por la presencia de hierro, ácidos húmicos y algunos residuos industriales, el color y el pH son directamente proporcional, evidenciando el incremento del pH en 8,4 unidades, siendo este alcalino, el pH alcalino se produce por el consumo de anhídrido carbónico por parte de las algas. Como se evidencia en la comparación de los resultados en el año 2016 y 2017 el pH se mantiene entre los rangos permisibles.

Relación DBO, DQO Y OD

En la gráfica 2, se observa los resultados arrojados por los siguientes parámetros en la entrada y salida del sistema.

Grafica 2. Relación DBO, DQO Y OD.



La DBO indica la cantidad de oxígeno que los microorganismos especialmente bacterias, hongos y plancton que consumen durante la degradación de sustancias orgánicas, DQO indica la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica, y el OD mide la cantidad de oxígeno gaseoso disuelto [84].

Relacionando esta teórica se puede decir que la DBO disminuye y DQO aumenta relativamente, siendo una relación inversamente proporcional, y a su vez aumentando el oxígeno ya que, posiblemente se está generado por la presencia de materia orgánica que al degradarse de manera microbiológica y químicamente genera sólidos disueltos y aumento de la conductividad.

Con relación al promedio de los resultados, se puede evidenciar que la DBO arroja un porcentaje de remoción de 75 %, por lo cual indica que cumple con el Decreto 1594, donde el resultado es mayor que el porcentaje de remoción establecido; en cuanto al Decreto 3930 no se alcanza el 80 % de remoción, faltante un 5 % el cual indica que no se cumple con la normatividad.

De acuerdo a la normatividad vigente la Resolución 0631 establece un valor límite permisible de 90 mg/L, el cual al momento del muestreo está cumpliendo con lo establecido ya que no sobrepasa este límite.

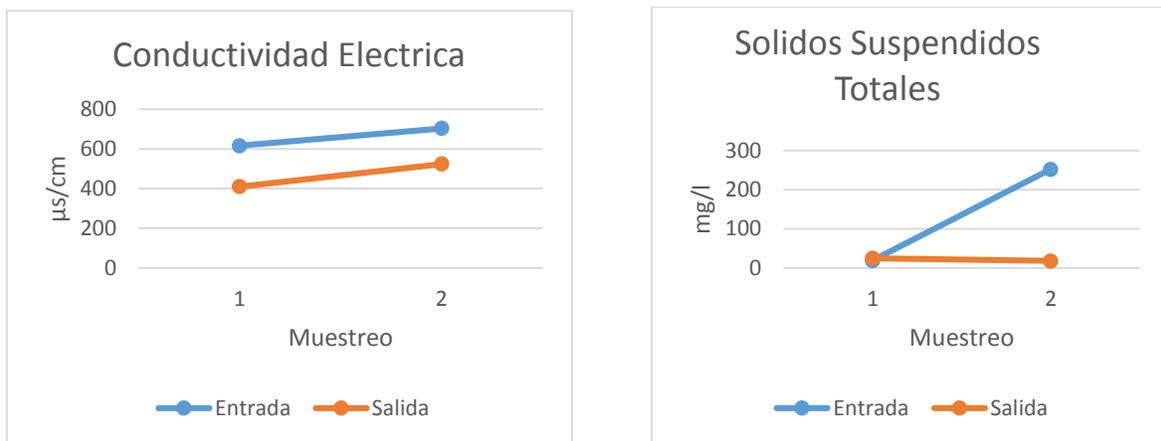
Para la DQO se evidencia que no se está cumpliendo con la normatividad en cuanto al Decreto 3930 en el cual establece un porcentaje de remoción de 80%, y en los resultados de muestreo arroja un valor de 44%, comprobando que el porcentaje es muy bajo, ya que se necesitaría el 36% para lograr el cumplimiento del porcentaje de remoción establecido por dicho Decreto. Para la Resolución 0631 el límite máximo permisible es de 180 y los resultados sobrepasan este valor en 15 mg/l.

Comparando con las pruebas del 2016 se difiere que en el presente año la planta ha logrado aumentar el porcentaje de remoción como se observa en la Tabla 12, la DBO y la DQO anteriormente tenía un porcentaje de remoción bajo, en el presente año incremento evidentemente, pero este porcentaje no cumple con la normatividad vigente. De acuerdo a lo anterior se podría inferir que los microorganismos están

realizando un buen proceso de remoción de materia orgánica, sin tendencia a formar un sistema anaerobio y el consumo de oxígeno en esta laguna se debe más a reacciones químicas, generadas por la presencia de aguas industriales (grasas, detergentes, aceites, etc.), provenientes de los talleres y a su vez podrían estar generando un impacto en algas y bacterias allí presentes.

Relación conductividad y solidos suspendidos totales

Grafica 3. Relación conductividad y solidos suspendidos totales

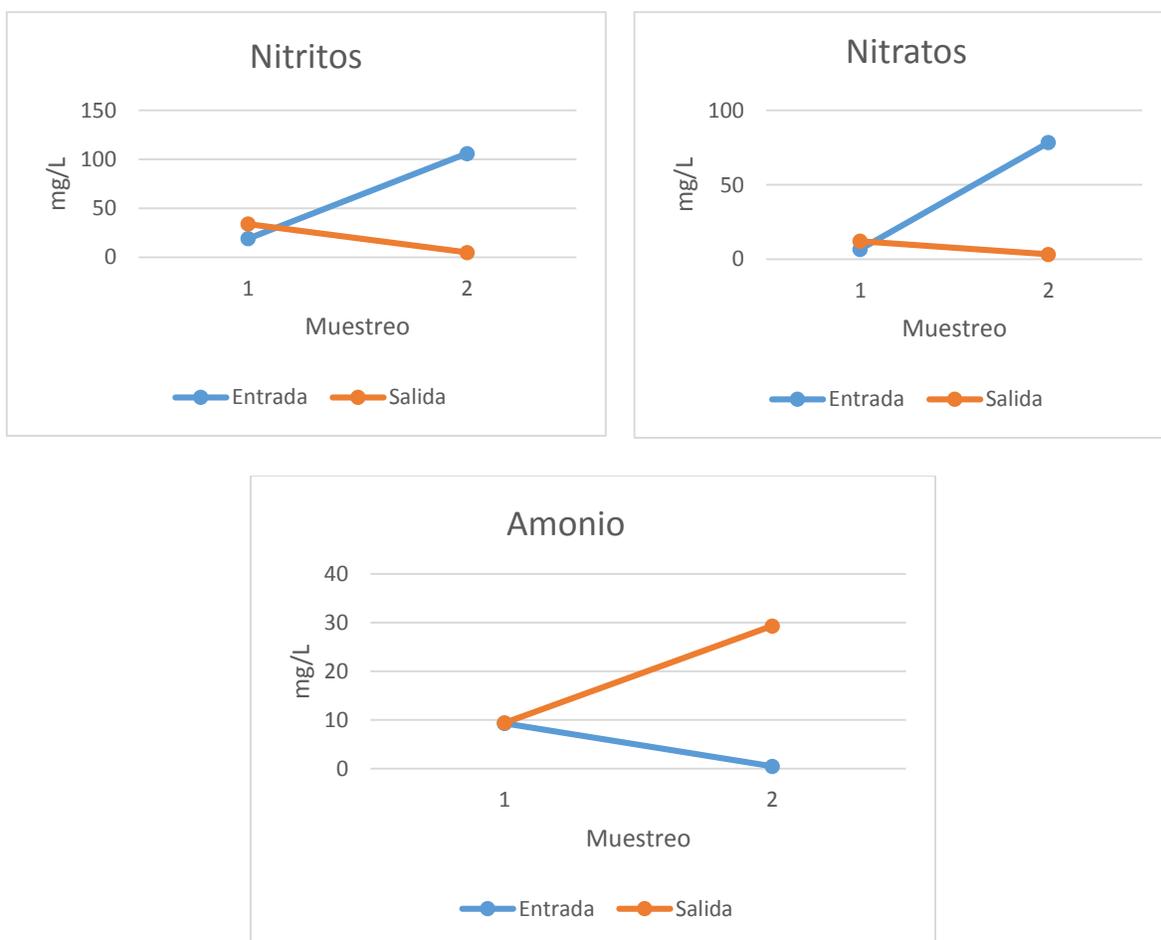


Los sólidos suspendidos totales son importante como indicador, dado que su presencia ocasiona la disminuían del paso de la luz a través del agua, evitando su actividad fotosintética en las corrientes, además es considerado importante para la producción de oxígeno, en la gráfica 3, se observa que en la salida incrementaron los sólidos causando problemas estéticos y absorción de contaminantes, lo anterior posiblemente se presentó por el arrastre de algas que pueda tener la estructura de salida.

Los sólidos y la conductividad tienen una relación directamente proporcional, la conductividad es la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica [84].

Relación Nitritos, Nitratos y Amonio

Grafica 4. Relación Nitritos, Nitratos y Amonio



Respecto a los nitritos, nitratos y amonio como lo muestra la gráfica 4 en la entrada del sistema de tratamiento se evidencia la presencia de materia orgánica, pero en el transcurso del tratamiento estos disminuyen, indicando que los microorganismos

están cumpliendo con el proceso de degradación de la materia orgánica y compuestos nitrogenados, de acuerdo a la normatividad vigente la Resolución 0631 no presenta los valores límites permisibles.

4.2 RESUMEN TEÓRICO COMPARATIVO

Para el resumen teórico se implementó una tabla, en la cual se realizó la comparación de los dos humedales con las condiciones más relevantes de los estudios ya realizados (ver anexo B).

Después de realizar la comparación teórica, se llegó a la conclusión que el humedal subsuperficial será el más opimo para la ejecución del diseño para la planta de tratamiento de aguas residuales, ya que a nivel de remoción es aún mejor.

A partir de esta selección se realizó una comparación entre el humedal subsuperficial vertical y horizontal (ver Tabla 13).

Tabla 13. Análisis Teórico.

Análisis teórico comparativo		
	<p>Humedal artificial con flujo Subsuperficial Horizontal.</p>	<p>Humedal artificial con flujo Subsuperficial Vertical.</p>
Tipo de tratamiento	<p>Primario, Secundario y Terciario.</p> <p>Aguas residuales pueden ser aprovechadas</p>	<p>Primario, Secundario y Terciario.</p> <p>Aguas residuales pueden ser aprovechadas</p>
Diseño y Requerimientos	<p>Área mínima: 0,5 ha</p> <p>cargas alrededor de 6g DBO/m² día</p> <p>Distancia mínima a la población: 50m.</p> <p>Distancia mínima a agua superficial o subterránea: 30m</p> <p>No requiere energía eléctrica</p>	<p>Área mínima: 0,3 ha</p> <p>Cargas entre 20 y 40 g DBO/m² día</p> <p>Distancia mínima a la población: 50m</p> <p>Distancia mínima a agua superficial o subterránea: 30m</p> <p>Se requiere una fuente constante de electricidad</p>
Consideraciones ambientales al elegir la tecnología	<p>Control de olores - Incremento de vegetación –</p> <p>- Se requiere pre tratamiento para prevenir las obstrucciones</p>	<p>- Control de olores - Incremento de vegetación -</p>

Eficiencia del sistema	<p>DBO5 80-90%</p> <p>SST (Sólidos totales) 80-95%</p> <p>NT (Nitrógeno total) 15-40%</p> <p>PT (Fosforo total) Las tasas de eliminación del fósforo dependen de las propiedades del material del filtro, de la longitud y del tiempo durante el cual el humedal ha estado operando.</p>	<p>DBO5 90-99%</p> <p>SST (Sólidos totales) 90-99%</p> <p>NT (Nitrógeno total) 30%</p> <p>PT (Fosforo total) Las tasas de eliminación del fósforo dependen de las propiedades del material del filtro, de la longitud y del tiempo durante el cual el humedal ha estado operando</p>
Costo aproximado.	<p>Mínimo: US\$ 6850.00</p> <p>Máximo : US\$ 26000.00</p>	<p>Mínimo: US\$ 7547.00</p> <p>Máximo : US\$ 30410.00</p>
Costos de operación y mantenimiento	<p>Entre US\$ 3,800/año a US\$ 9,000/año</p>	<p>Entre US\$ 4,200/año a US\$ 9,500/año</p>

Fuente. Elaboración propia.

4.3 DISEÑO DEL HUMEDAL

Como tratamiento terciario de pulimiento, se ha proyectado construir un humedal artificial de flujo sub superficial. Para dimensionar el humedal construido que se instalará después de la laguna facultativa, se selecciona en primera medida el sustrato que se va a utilizar. Para el caso de la unidad de tratamiento terciario se propone aplicar grava gruesa, ya que se requiere que no haya obstrucción a corto plazo.

Sustrato	tamaño efectivo d_{10}^* , mm	Porosidad efectiva η
Arena (media)	1	0.3
Arena (grueso)	2	0.32
Arena con grava	8	0.35
Grava (media)	32	0.4
Grava (grueso)	128	0.45

Fuente. Diseño de Humedales Artificiales para el Tratamiento de aguas Residuales [47].

Posteriormente se determinan los parámetros para el dimensionamiento:

Para determinar el área superficial, aplicamos la siguiente expresión E.3.2 del RAS, que además se encuentra en [70].

Área superficial del humedal (A_s)

$$A_s = \frac{Q L_n \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T (D) (\eta)}$$

El valor de K_T se puede calcular por la ecuación siguiente:

$$K_T = 1.104 * [(1,06)]^{(T-20)}$$

Dado que la Temperatura del Agua residual a tratar su mínimo registrado es 20° C

$$K_T = 1.104 * [(1,06)]^{(20-20)}$$

$$K_T = 1.104$$

Como se puede observar en los resultados obtenidos por las características fisicoquímicas se evidencia que en el muestreo 1 se obtuvo un DQO de salida de 247, tomando este registro para diseñar, ya que si se diseña con la concentración de DBO no alcanzaría a remover la concentración de DQO.

Condiciones iniciales.

$$Qm = \frac{62,913 \frac{l}{s}}{8} = 7,8 \frac{l}{s} = 0,0078 \frac{m^3}{s}$$

$$Qm = 673.92 \frac{m^3}{dia}$$

Profundidad efectiva (D): 0,8 m

Porosidad efectiva del sustrato: 0,45

Concentración inicial: 247 mg/l DQO

Concentración final esperada: 180 mg/l DBO

Constante Kt: 1,104 d-1

Pendiente: 1.0%

Espesor de grava sobre lámina de agua: 0.10 m

Espesor de lecho de sembrado: 0.5 m

Material vegetal: Papiro Enano

$$As = \frac{673,93 \frac{m^3}{dia} * Ln \frac{247 mg/l}{180 mg/l}}{1,104 dia - 1 * 0,8 m * 0,45}$$

$$As = 536,56 m^2$$

Tomando una relación de 3:2 veces el largo que el ancho obtenemos.

$$As = LW = 536,56 m^2$$

$$\frac{L}{W} = \frac{3}{2}$$

$$2L = 3W$$

$$3W * W = 536,56 m^2$$

$$\sqrt{w^2} = \sqrt{\frac{536,56 m^2}{1,5}}$$

$$W = 18,91 m$$

$$L = 1,5 * 18,91 m$$

$$L = 28,37 m$$

$$TRH = \frac{V * n}{Q}$$

$$TRH = \frac{18,91m * 28,91 m * 0,8m * 0,45}{673,93 \frac{m^3}{dia}}$$

$$TRH = 0,2920 \text{ Dia} = 7 \text{ horas}$$

Área transversal

$$AT = \frac{Q}{K_S * S}$$

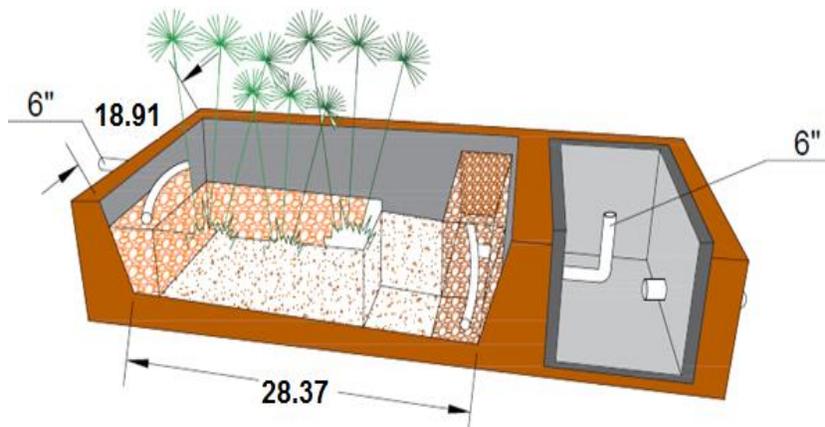
Tipo de suelo	Coficiente de permeabilidad k (cm/s)
Grava media a gruesa	$> 10^{-1}$
Arena gruesa a fina	10^{-1} a 10^{-3}
Arena fina, arena limosa	10^{-3} a 10^{-5}
Limo, limo arcilloso, arcilla limosa	10^{-4} a 10^{-6}
Arcillas	$< 10^{-7}$

Fuente. Diseño de Humedales Artificiales para el Tratamiento de aguas Residuales [47].

$$AT = \frac{673,93 \frac{m^3}{\text{dia}}}{86,4 \frac{m}{\text{dia}} * 0,01} = 780.01 m^2$$

En la figura 20 se observa el diseño del humedal.

Figura 20. Humedal subsuperficial.



Fuente. Elaboración propia

Construcción

Se recomienda para conseguir una pendiente de 1 % tener una capa de arena de espesor variable entre 0,5- 2 m dejando un borde libre de 0.2 m, impermeabilizar con una membrana sintética para prevenir las pérdidas de aguas residuales en el suelo. El material granulométrico adherido será arena, grava y escombros con el propósito de garantizar una conductividad hidráulica apropiada con el fin de que este material sea un soporte para las especies vegetales y allí desarrollen sus raizales.

La tubería de entrada y de salida tendrá el mismo diámetro que la proveniente de la laguna facultativa 6 “, la disposición de la tubería de salida será la que genere la altura efectiva de salida. Con respecto a la vegetación de sembrado, se recomienda la especie Papiro Enano, la cual genera una cantidad amplia de raíces que ayudaría a la remoción de materia orgánica, se sembrarán 5 plantas por metro cuadrado.

En la figura 21 se observan los proceso de la planta y el humedal diseñado.

Figura 21. Vista del Humedal.



Fuente. Elaboración Propia.

CONCLUSIONES

La evaluación que se realizó en la planta de tratamiento, permitió establecer el estado actual de cada uno de los procesos, evidenciando la falta de control en operación y mantenimiento debido a la ausencia de personal capacitado para tal fin, además es necesario adjudicar recursos económicos que se requieren para ejecutar actividades que contribuyan al mejoramiento de cada proceso en el sistema de tratamiento.

Los análisis de las pruebas fisicoquímicas dieron como resultado, que la DBO se encuentra entre el límite permisible, la DQO se encuentra por encima de los límites permisibles establecidos por la normatividad Colombiana vigente, por el cual es necesario reajustar el sistema en términos de operación y mantenimiento para que no interfieran en las diferentes reacciones.

La comparación teórica permitió dar una amplia información sobre el humedal más óptimo para diseño, el humedal subsuperficial arrojó resultados más relevantes en términos de eficiencia y costos para optimizar los procesos con este tratamiento terciario.

El humedal artificial posibilita el tratamiento de aguas contaminadas mediante métodos naturales, siendo un aspecto positivo en la capacidad de recrear hábitat para la fauna, y en términos socioeconómicos, su principal ventaja es el bajo costo de mantenimiento y operación.

RECOMENDACIONES

Para el buen funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales se recomienda tener el personal idóneo (operador), que tenga conocimiento en temas como el funcionamiento y capacidad de cada proceso que conforma la planta, estar familiarizado con la teoría y la práctica de los procesos operacionales y la forma de evaluar estos procesos, para cumplir con el objetivo de mejorar y optimizar la operación y mantenimiento de la planta.

Ejecutar e implementar un programa de operación, mantenimiento y control de procesos (ver Tabla 9). Ya que permite obtener información específica de la eficiencia de los procesos.

El operador deberá de cumplir con el equipo de seguridad requeridos tales como (casco de seguridad, máscara antigás, guantes de cuero, botas de caucho y overol), estas herramientas son apropiadas para cumplir con sus funciones de trabajo y necesarios para preservar su integridad física.

El operador deberá de ejecutar las acciones tales como: mantener en buen estado los alrededores de la planta de tratamiento, inspeccionar y mantener registro todos los días del funcionamiento de los diferentes procesos y registrar cada mes las características fisicoquímicas en el afluente y efluente, registrar el volumen o peso de los sólidos y medición de caudales, a su vez deberá preparar reportes anuales con los datos de operación y mantenimiento, diseñar un registro de inspección con el fin de reportar las necesidades que presenta la planta en cuanto al mantenimiento de las estructuras del tratamiento (laboratorio, limpieza, insumos etc.).

Previo a esto el operador deberá tomar medidas preventivas y predictivas en cuanto a: limpieza a las rejillas, el retiro de los sólidos deberá ser realizados semanalmente, cambio de los barrotes ya que presentan corrosión y modificación de las dimensiones de las segundas rejillas, ya que la distancia entre barrotes es muy amplia, esto ocasionando que pasen los sólidos al tratamiento primario, limpieza a la canaleta parshall, colocar un medidor para determinar el caudal de ingreso, tener registro del volumen de sólidos retenidos y disponerlos adecuadamente, realizar el retiro semanal de las natas, lodos flotantes y grasas de la superficie de la laguna anaerobia, como se observa en la tabla 9, las grasas afectan el funcionamiento por lo que se hace necesario la construcción de trampa de grasas y posteriormente este material retirado deberán ser depositados en el lecho de secado, conjuntamente limpiar los lechos de secado y poner los secos adecuadamente, evaluar el grado de la deshidratación para determinar el momento de limpieza y mantenimiento del lecho de secado. En la laguna facultativa también se debe realizar el retiro de este material flotante y agregar las bacterias para que cumplan la función de remoción.

Periódicamente las lagunas deberán ser sometidas a limpieza, la laguna anaerobia se puede realizar aproximadamente cada tres a cuatro años esto se afectan una vez el lodo alcance un tirante entre 1.0 a 1.5 m y la laguna facultativa una vez el lodo tenga un promedio de 0.25m.

Los lodos deben ser sometidos a una digestión anaerobia para terminar su fase final o para su acondicionamiento final. Después de realizar el proceso de digestión los lodos pueden depositarse en zanjas de unos 60 cm de profundidad.

Se recomienda implementar el humedal artificial subsuperficial como tratamiento biológico de las aguas residuales del Batallón de Apoyo y Servicio, para mitigar y optimizar los impactos generados por dichas aguas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Correa, "Evaluación y monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa fé de Antioquia, Colombia", 2008.
- [2] C. Díaz, "Tratamiento de aguas residuales a través de humedales", 2014.
- [3] D.C. Washington, EPA. "folleto informativo de tecnologías de aguas residuales humedales de flujo libre superficial," p. 1,2, 2000.
- [4] T.H.Y. TEBBUTT, "Fundamentos de control de la calidad del agua", pp. 55,2008.
- [5] S. D. S. P. Domiciliarios, "Informe Técnico Sobre Sistemas De Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia. Línea Base 2010," no. 84, pp. 1–54, 2012.
- [6] A. R. Municipales, "CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES," 2014.
- [7] O. Delgadillo, A. Camacho, L. F. Pérez, M. Andrade, Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, pp 115, Cochabamba – Bolivia, 2010.
- [8] D. Acero, C. Ariel, C. Magíster, and I. Civil, "Tratamiento de agua residual a través de humedales," pp. 1–8, 2014.
- [9] Lara Borrero Jaime Andres, Depuración de aguas residuales Municipales con humedales artificiales, Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, mayo de 1999.
- [10] Díaz Acero Carlos Ariel, Tratamiento de agua residual a través de humedales, V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, 2014 Tunja – Colombia
- [11] J. J. M. Reyes, "Deficiencias en el uso de Geosinteticos para la impermeablizacion de rellenos sanitarios en Mexico," vol. 7, pp. 5–8, 2008.

- [12] A. Suárez, N. Agudelo, J. Rincón, and N. Millán, "Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas," *Mutis*, vol. 4, no. 1, pp. 8–14, 1996.
- [13] A. Silva, "HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DE LA COSTA Bernal, F.,* Mosquera, D.,** Maury, H. A.,*** González, D.,**** Guerra, R.,**** Pomare, A.**** y Silva, M. ****," pp. 149–155, 2003.
- [14] L. Borrero, J. Andrés, V. Puerto, I. Leonardo, I. Y. Evolución, D. E. U. N. Humedal, A. D. E. Flujo, S. En, J. Andrés, and L. Borrero, "Implantacion y evaluacion de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua,Cundinamarca,Colombia," 2005.
- [15] R. H. Kadlec, "Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands," *Ecol. Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 159–174, 2008.
- [16] J. I. Montoya, L. Ceballos, J. C. Casas, and J. Morató, "Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial," *Esc. Ing. Antioquia*, pp. 75–84, 2010.
- [17] R. M. Agudelo C, M. L. Jaramillo, and G. Peñuela, "Comparison of the removal of chlorpyrifos and dissolved organic carbon in horizontal sub-surface and surface flow wetlands," *Sci. Total Environ.*, vol. 431, pp. 271–277, 2012.
- [18] R. Kadlec, R. Knight, J. Vymazal, H. Brix, P. Cooper, and R. Haberl, "Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation," *Scientific and Technical Report series*. p. 156 pp, 2013.
- [19] C. Hernández-Crespo, S. Gargallo, V. Benedito-Durá, B. Nácher-Rodríguez, M. A. Rodrigo-Alacreu, and M. Martín, "Performance of surface and

subsurface flow constructed wetlands treating eutrophic waters,” *Sci. Total Environ.*, vol. 595, pp. 584–593, 2014.

- [20] S. Silvan, L. Ocaña, B. Margulis, R. Germán, J. Roberto, R. Cerino, M. José, R. S. Silván, G. L. Ocaña, R. Germán, B. Margulis, J. Roberto, H. Barajas, and J. Romellón, “DE VEGETACIÓN MACRÓFITA,” 2016.
- [21] Organización Panamericana de la Salud, Oficina Regional para Europa, Organización Mundial de la Salud, Agua y Salud, 1998.
- [22] J. Lizarazo, M. Orjuela, “Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia” Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2013
- [23] M. Lothar Hess, “tratamiento preliminar.pdf,” Sao Paulo, 2003.
- [24] ASEPEYO, “Guía de buenas prácticas depuradoras de aguas. Monografía Estudio EDAR,” 2009.
- [25] G. Tchobanoglous, L. Pardo, “Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones,” Copyright.Colomb., 2000.
- [26] J. Alberto, G. Nuñez, and J. G. Aljure, “estabilización Planta extractora de Monterrey Evaluation of settlement ponds . Monterrey Palm Oil Mill,” no. 48, pp. 39–53, 1994.
- [27] G. Correa, “EVALUACIÓN Y MONITOREO DEL SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE SANTA FÉ DE ANTIOQUIA COLOMBIA,” 2008.
- [28] R. Valencia, T. Diana, and M. Granados, “CONTAMINACION DEL AGUA Y TRATAMIENTO,” p. 19, 2012.
- [29] A. Depuración de Aguas Residuales Mediante Humedales Artificiales: La Edar de Los Gallardos (Almería). Gestión de Aguas del Levante Almeriense S.A. GALASA (2002).
- [30] U.S. EPA, “Wastewater Technology Fact Sheet Free Water Surface Wetlands,” United States Environ. Prot. Agency Environmental Prot., p. 8, 2000.

- [31] A. C. H. Joan Garcia Serrano, "Depuración con Humedales Construidos," Univ. Politec. Cataluña, pp. 1–96, 2008.
- [32] O. Delgadillo, A. Camacho, and M. A. Serie, Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. 2010.
- [33] J. Vymazal, "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands," *Sci. Total Environ.*, vol. 380, no. 1–3, pp. 48–65, 2007.
- [34] U. Stottmeister, A. Wießner, P. Kusch, U. Kappelmeyer, M. Kästner, O. Bederski, R. A. Müller, and H. Moormann, "Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment," *Biotechnol. Adv.*, vol. 22, no. 1–2, pp. 93–117, 2003.
- [35] S. Lee, M. C. Maniquiz, and L. H. Kim, "Characteristics of contaminants in water and sediment of a constructed wetland treating piggery wastewater effluent," *J. Environ. Sci.*, vol. 22, no. 6, pp. 940–945, 2010.
- [36] C. Maucieri, A. C. Barbera, J. Vymazal, and M. Borin, "A review on the main affecting factors of greenhouse gases emission in constructed wetlands," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 236, pp. 175–193, 2017.
- [37] J. T. A. Verhoeven and A. F. M. Meuleman, "Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations," *Ecol. Eng.*, vol. 12, no. 1–2, pp. 5–12, 1999.
- [38] R. H. Kadlec and S. D. Wallace, *Treatment Wetlands*, Second Edition. 2009.
- [39] Environmental Protection Agency, "Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial," United States Environ. Prot. Agency, (Us Epa)., p. 13, 2000.
- [40] J. Vymazal, "Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment," *Ecol. Eng.*, vol. 25, no. 5, pp. 478–490, 2005.
- [41] C. Arias and H. Brix, "Humedales artificiales para el tratamiento de aguas

residuales,” *Cienc. e Ing. Neogranadina*, no. 13, pp. 17–24, 2003.

- [42] W. Llagas Chafloque and E. Guadalupe Gómez, “Diseño de Humedales Artificiales para el Tratamiento de aguas Residuales en la UNMSM,” *Revisa del Inst. Investig. FIGMG*, vol. 15, no. 17, pp. 85–96, 2006.
- [43] H. Brix, “Treatment Wetlands: an overview.,” *Proceedings Conference on Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Technical University of Gdnask, pp. 1–9, 1995.
- [44] J. Tournebize, “Ecological engineering to mitigate nitrate and pesticides pollution in French agricultural drained watersheds: Implications for design of artificial wetlands” *Irstea*, 2015.
- [45] C. Guo, Y. Cui, B. Dong, and F. Liu, “Tracer study of the hydraulic performance of constructed wetlands planted with three different aquatic plant species,” *Ecol. Eng.*, vol. 102, pp. 433–442, 2017.
- [46] A. K. Kivaisi, “The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review,” *Ecol. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 545–560, 2001.
- [47] C. B. Zhang, J. Wang, W. L. Liu, S. X. Zhu, H. L. Ge, S. X. Chang, J. Chang, and Y. Ge, “Effects of plant diversity on microbial biomass and community metabolic profiles in a full-scale constructed wetland,” *Ecol. Eng.*, vol. 36, no. 1, pp. 62–68, 2010.
- [48] M. Greenway, “Constructed Wetlands for Water Pollution Control - Processes, Parameters and Performance,” *Dev. Chem. Eng. Miner. Process.*, vol. 12, no. 5–6, pp. 491–504, 2004.
- [49] S. Zhu, X. Huang, S.-H. Ho, L. Wang, and J. Yang, “Effect of plant species compositions on performance of lab-scale constructed wetland through investigating photosynthesis and microbial communities,” *Bioresour. Technol.*, vol. 229, pp. 196–203, 2017.
- [50] M. Truu, J. Juhanson, and J. Truu, “Microbial biomass, activity and community

composition in constructed wetlands,” *Sci. Total Environ.*, vol. 407, no. 13, pp. 3958–3971, 2009.

- [51] J. L. Faulwetter, V. Gagnon, C. Sundberg, F. Chazarenc, M. D. Burr, J. Brisson, A. K. Camper, and O. R. Stein, “Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review,” *Ecol. Eng.*, vol. 35, no. 6, pp. 987–1004, 2009.
- [52] L. David, D. Garzón, J. Esteban, and C. Montañez, “limpias basada en la distribución de tamaños de poros,” vol. 1, no. 1, 1999.
- [53] A. C. H. Joan Garcia Serrano, “Depuración con Humedales Construidos,” *Univ. Politec. Cataluña*, pp. 1–96, 2008.
- [54] J. A. Lara Borrero, “Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales,” p. 122, 1999.
- [55] O. Delgadillo, A. Camacho, and M. A. Serie, *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. 2010.
- [56] L. M. Nguyen, “Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters,” *Ecol. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 199–221, 2000.
- [57] M. Peña, V. Ginneken, and C. Madera, “Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales,” *Rev. Ing. y Compet.*, vol. 5, pp. 27–35, 2003.
- [58] “LEY 9 DE 1979.pdf.” [Online]. Available: https://www.codechoco.gov.co/sites/Documentos/Normatividad/Leyes/LEY_9_1979.pdf.
- [59] “LEY 99 DE 1993.pdf.” [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297>.
- [60] “Decreto 1594 DE 1984.pdf.” [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>

- [61] "Decreto 302 de 2000.pdf." [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=4636>.
- [62] "Decreto 3039 de 2010.pdf." [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>.
- [63] "DECRETO 1076 DE 2015.pdf." [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=62511>.
- [64] "RESOLUCION 1433 DE 2004.pdf," 2004. [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15603>.
- [65] M. D. M. Y. D. S. AMBIENTE, RESOLUCION MINAMBIENTE NACIONAL 631 DE 2015.pdf.
- [66] Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, "Documentación Técnico Normativa del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico," p. 114, 2000.
- [67] M, Torres, "Formulación del Plan de Manejo Ambiental para el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la Tercera División, Ejército Nacional de la Ciudad de Popayán". 2016.
- [68] IDEAM, "Guia Para El Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas," p. 15, 2010.
- [69] EPA, "Guía para el Diseño y Construcción de un Humedal Construido con Flujos Subsuperficiales". 1993.
- [70] OPS, "Guía para la Operación y Mantenimiento de Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Lagunas de Estabilización". 2005.
- [71] D. Mara. "Domestic wastewater treatment in developing countries", Earthscan. pp. 85-187, 2003.
- [72] A. Morel, S, "Diener, Greywater management in low and middle-income countries, review of different treatment systems for households or neighbourhoods, Dübendorf, Switzerland. 2006.
- [73] P.Cooper, "The performance of vertical flow constructed wetland systems with

special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates”, Wat. Pp.91-97, 2005.

- [74] R.Crites, G Tchobanoglous, “Small and Decentralized Wastewater Management Systems”. WCB. pp. 599- 609. 1998.
- [75] J.Patiño, F. Zhinin,” Estudio comparativo de la capacidad depuradora de phragmites australis y cyperus papyrus en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón santa isabel. Universidad de Cuenca”. 2015.
- [76] L. Poh-Eng, C. Polprasert, “Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Resource Recovery”.(1998).
- [77] C. Polprasert, “Wastewater Treatment II, Natural Systems for Wastewater Management”. 2001.
- [78] P. idderstolpe, “Introduction to greywater management, Stockholm Environment Institute, Sweden, Report. 2004.
- [79] J. Romero, “calidad del agua”. 2009

ANEXOS

Anexo A. Medición de caudal

CAUDAL DE ENTRADA									
Mes	Distancia	Tiempo	Velocidad	Ancho	Lámina de agua	Área	n	Caudal (m³/s)	Caudal (L/s)
Diciembre	78	40,89	1,9076	0,88	0,01	0,0088	0,9	0,0151	15,1079
Enero	78	31,4	2,4841	0,88	0,014	0,0123	0,9	0,0275	27,5434
Febrero	78	32,85	2,3744	0,88	0,012	0,0106	0,9	0,0226	22,5666
Marzo	78	29,99	2,6009	0,88	0,013	0,0114	0,9	0,0268	26,7785
Abril	78	39,65	1,9672	0,88	0,015	0,0132	0,9	0,0234	23,3705
Mayo	78	35,89	2,1733	0,88	0,016	0,0141	0,9	0,0275	27,5402
Junio	78	39,98	1,9510	0,88	0,014	0,0123	0,9	0,0216	21,6324
Julio	78	30	2,6000	0,88	0,012	0,0106	0,9	0,0247	24,7104

CAUDAL DE SALIDA				
Mes	Volumen	Tiempo	Caudal (m³/s)	Caudal (L/s)
Diciembre	0,01	1,1	0,0091	9,0909
Enero	0,01	1,33	0,0075	7,5188
Febrero	0,01	1,45	0,0069	6,8966
Marzo	0,01	1,28	0,0078	7,8125
Abril	0,01	1,39	0,0072	7,1942
Mayo	0,01	1,2	0,0083	8,3333
Junio	0,01	1,23	0,0081	8,1301
Julio	0,01	1,26	0,0079	7,9365

Anexo B. Análisis Teórico

Análisis teórico comparativo			
Condiciones	Humedal superficial	Humedal subsuperficial	Bibliografía
Tipo de tratamiento	Primario, Secundario y Terciario.	Primario, Secundario y Terciario.	[19]
	Aguas residuales pueden ser aprovechadas	Aguas residuales pueden ser aprovechadas	[20] [22]
Diseño y Requerimientos	Área mínima: 0,5 ha	Área mínima: 0,3, 0.5ha	[71]
	Distancia mínima a la población: 50m	Distancia mínima a la población: 50m	[72]
	Distancia mínima a agua superficial o subterránea: 30m	Distancia mínima a agua superficial o subterránea: 30m	[73] [74]
	La lámina de agua posee una profundidad de 0.3 y 0.4 m.	La lámina de agua suele ser entre 0.3 y 0.9 m.	[75] [76]
	Altura recomendada de 1 y 1.5 m	Altura recomendada de 0.8 a 1.2 m	[77] [78]
	Requiere mayor espacio.	Requiere menos espacio.	[79]
	No posee lecho poroso, y en ellas se encuentran	Posee un lecho poroso el cual es sustento de la	

	<p>principalmente vegetación emergente.</p> <p>Lámina de agua a flujo libre.</p> <p>Tiempos de retención de 5 a 10 días.</p> <p>Según el tipo de planta instalada, es decir planta flotante, planta sumergida y planta emergente.</p> <p>Son más sensibles a temperaturas relativamente bajas.</p>	<p>vegetación y microorganismos.</p> <p>Lámina de agua por debajo del lecho o sustrato</p> <p>Tiempos de retención de 2 a 5 días.</p> <p>Se diseñan para pequeñas fuentes de contaminación</p> <p>Según dirección de flujo, es decir horizontal y vertical</p> <p>Flujo Subsuperficial en buenas condiciones de operación y mantenimiento adecuado resulta ser en sí un tratamiento biológico de alta eficiencia en términos de remoción de materia orgánica.</p> <p>Los Juncos, Papiros y heliconias como vegetación propia de humedales naturales, desempeñan un papel fundamental en el mejoramiento de la</p>	
--	--	---	--

		<p>calidad del vertimiento en un humedal artificial de flujo subsuperficial.</p> <p>No son necesarias las podas periódicas de la vegetación, ya que la parte aérea de las plantas no contribuye a la remoción de contaminantes</p>																
Consideraciones ambientales al elegir la tecnología	<p>Control de olores</p> <ul style="list-style-type: none"> - Control de insectos y roedores - Incremento de vegetación - Limpieza de Lodos - Largo tiempo de arranque para operar a plena capacidad. - Se diseñan para el manejo ambiental para cuencas hidrográficas y zonas de descarga no puntuales, como las zonas de agricultura. 	<p>Control de olores - Incremento de vegetación - Limpieza de Lodos</p>																
Eficiencia del sistema	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Parámetro.</th> <th>% Remoción</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">SST</td> <td style="text-align: center;">78%</td> <td style="text-align: center;">95%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DBO</td> <td style="text-align: center;">79%</td> <td style="text-align: center;">90%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DQO</td> <td style="text-align: center;">39%</td> <td style="text-align: center;">70%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">N-NH3</td> <td style="text-align: center;">22%</td> <td style="text-align: center;">70%</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro.		% Remoción	SST	78%	95%	DBO	79%	90%	DQO	39%	70%	N-NH3	22%	70%		
Parámetro.		% Remoción																
SST	78%	95%																
DBO	79%	90%																
DQO	39%	70%																
N-NH3	22%	70%																

	NO2	67%	75%	
	N-NO3	67%	70%	
	p-total	50%	80%	
	OD	33%	30%	
	coliformes fecales	98%	98%	
Costo aproximado.	Grava instalados (utilizados en la parte Cama)	Oscilan entre \$ 16 / m ³ y \$ 70 / m ³ , con un costo medio de \$ 42 / m ³ .	Grava Oscilan entre \$ 16 / m ³ y \$ 70 / m ³ , con un costo medio de \$ 42 / m ³ .	Membrana de recubrimiento tiene un costo de 16 mil m ² . Plántulas, cada plántula tiene un valor alrededor de 500 a 800 pesos.
	Mínimo: US\$ 6313.00	Mínimo: US\$ 6313.00	Mínimo: US\$ 6313.00	
Costos de operación y mantenimiento	Entre US\$ 3,600/año a US\$ 8,000/año	Entre US\$ 3,600/año a US\$ 8,000/año		

Fuente. Elaboración propia

Anexo C. Pruebas Anascol



INFORME I 18808 -18809 -16



Página 5 de 12

Dónde:
 Qp=Caudal promedio en litros por segundo
 N: Número de alicuotas

• **Cálculo de alicuotas:**

$$V_i = \frac{(V \cdot Q_i)}{(n \cdot Q_p)}$$

Dónde:

V_i = Volumen de cada alicuota o porción de muestra (mL)
 V = Volumen total a componer (mL)
 Q_i = Caudal instantáneo de cada muestra (L/s)
 Q_p = Caudal Promedio (L/s)
 n = Número de alicuotas

$\sum_{i=1}^n Q_i$ = Sumatoria de caudales (L/s)

Tabla 6. Resultados obtenidos del análisis en el Laboratorio y/o campo y Comparación normativa.

Variable	Método	Unidades	LCM ¹	Resultado		Resolución 0631 del 17 de marzo de 2016 - Art. 8
				Entrada PTAR 18808	Salida PTAR 18809	
Aceites y Grasas	Extracción Líquido - Líquido - Partición gravimétrica SM 5520 B	mg Aceites y Grasas/L	10	21	<10	20,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO ₅	S.M 5210 B, Incubación 5 días y Electrodo de Luminiscencia Modificado, EPA 360,3, ASTM D 888-06	mg O ₂ /L	5	231	204	90,00
Demanda Química de Oxígeno – DQO	SM 5220 D- Reflujo cerrado y Colorimétrico Modificado	mg O ₂ /L	20,0	454	381	180,00
Fenoles Totales	Destilación-Fotométrico Directo, SM 5530 B,D	mg Fenoles/L	0,100	<0,100	<0,100	No Reporta
Sólidos Suspendidos Totales	Gravimétrico Secado a 103-105°C, SM 2540 D.	mg SST/L	10	330	137	90,00
Tensoactivos	Surfactantes Aniónicos como SAAM, SM 5540 C	mg SAAM/L ³	0,400	2,09	*	Análisis y Reporte
Sólidos Sedimentables ² (Min. – Máx.)	SM 2540 F -Cono imhoff-Volumétrico	mL/L	N.A.	1,5 - 5,5	-	5,00
pH ² (Min. – Máx.)	S.M. 4500 – H ² B Método Electrométrico	Unidades de pH	N.A.	6,48 - 7,85	7,63 - 8,64	6,00 - 9,00
Temperatura ² (Min. – Máx.)	SM 2550 B - Electrométrico	°C	N.A.	15,4 - 28,5	15,8 - 28,7	40,00
Caudal ² (Min. – Máx.)	Volumétrico /Vertedero rectangular	L/s	N.A.	29,868 - 100,805	3,535 - 7,100	No Reporta
Caudal ² (Promedio)	Cálculo			50,262	5,203	

¹ LCM - Límite de cuantificación del método. Es el valor mínimo cuantificable con el método utilizado para la determinación de la variable.

² Variable medida en campo.

³ Calculado como LAS, peso molecular 288,4

N.A: No Aplica

N.D: No Detectable.

Fecha de siembra de la DBO₅: 16 de agosto de 2016 a las 17:00 horas.

Artículo 8. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas (ARD) de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales con una carga menor o igual a 625.00 kg/día DBO₅.

*La muestra presenta interferencia de color (verde oscuro), por tal motivo no es posible reportar un resultado para este análisis.

Anexo C. Resumen Pruebas Físicoquímicas

CARACTERIZACIONES REALIZADAS EN EL AÑO 2015					
ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL					
TERCERA DIVISION DEL EJERCITO NACIONAL					
Caracterizaciones	Unidad	ENERO 1	ABRIL 2	JULIO 3	NOVIEMBRE 4
Parametros Analizados					
Caudal (Entrada)	L/S	2,4	13,3	40,4	3,15
Caudal (Salida)	L/S		11,4	2,7	2,99
Conductividad (Entrada)	uS/cm		306,4		668
Conductividad (Salida)	uS/cm		300,69		537
Alcalinidad (Entrada)	mg CaCO ³ /L	102			
Alcalinidad (Salida)	mg CaCO ³ /L				
DBO5 (Entrada)	mg O ² /L	47	71,9	177	241
DBO5 (Salida)	mg O ² /L	6	19,1	5	13,3
DQO (Entrada)	mg O ² /L	170	139		576
DQO (Salida)	mg O ² /L	40	43		94
Fenoles Totales (Entrada)	mg Fenol/L	0,23		< 0,100	
Fosfatos (Entrada)	mg PO ₄ ⁻³	2,16			
Fosfatos (Salida)	mg PO ₄ ⁻³	0,72			
Fosforo Total (Entrada)	mg P/L	3,2			
Fosforo Total (Salida)	mg P/L	2,2			
Grasas y Acietes (Entrada)	mg/L	10,2	36,2	28	63,2
Grasas y Acietes (Salida)	mg/L	< 0,5	5,2	< 10	8,4
Nitratos (Entrada)	mg N-NO ₃ /L	0,4			
Nitratos (Salida)	mg N-NO ₃ /L				
Nitrogeno Amoniacal (Entrada)	mg N-NO ₃ /L	15,28			
Nitrogeno Amoniacal (Salida)	mg N-NO ₃ /L	10,19			
Nitrogeno Total (Entrada)	mg N/L	15,4			
Nitrogeno Total (Salida)	mg N/L	10,5			
Oxigeno Disuelto (Entrada)	mg O ² /L	3			
Oxigeno Disuelto (Salida)	mg O ² /L	4,1			
pH (Entrada)	UN	7,1	6,7	7,4	7,39
pH (Salida)	UN	7,1	7,89	7,4	7,5
Solidos Sedimentables (Entrada)	ml/L	0,8		4,04	
Solidos Sedimentables (Salida)	ml/L				
SST (Entrada)	mg/L	29	348	120	155
SST (Salida)	mg/L	10	110	25	14,3
Temperatura (Entrada)	°C	16,9	21,2	21	22,4
Temperatura (Salida)	°C	17,2	21,2	19,4	25,3
Tensoactivos (Entrada)	mg/L	1,3		2,02	
Tensoativos (Salida)	mg/L	< 0,2		< 0,400	
Coliformes Totales (Entrada)	NMP/100ml	1413600			
Coliformes Totales (Salida)	NMP/100ml	62400			
Echerichia Coli (Entrada)	NMP/100ml	85700			
Echerichia Coli (Salida)	NMP/100ml	1000			