

**Evaluación, en una primera aproximación, de la calidad del agua
tratada en un Humedal Construido de Flujo Subsuperficial para reúso en
riego agrícola. Municipio de Guarne. 2011.**

Ruth Viviana Therán Tovar

**Trabajo de investigación para optar al título de administradora en salud:
gestión sanitaria y ambiental**

**Asesora
Ruth Marina Agudelo Cadavid
Profesora Investigadora**

**Universidad de Antioquia
Facultad Nacional de Salud Pública
Héctor Abad Gómez
2011**

Esa
Quien con sus manos curó más de una herida
Quien me enseñó aunque no quisiera aprender
Quien es única, inigualable, una auténtica dama de hierro
Pero con un corazón tierno de gigante
Esa,
Ella,
Madre,
porque cada uno de mis esfuerzos son mas tuyos que míos
Son tuyos todos mis logros.

Tabla de contenido

Lista de Tablas	7
Lista de Figuras	8
Lista de Anexos	9
Glosario	10
Resumen	12
1 Introducción	13
2 Planteamiento del problema	14
2.1 Antecedentes del Problema	14
2.2 Descripción del problema	15
2.3 Justificación	17
3 Objetivo General	18
3.1 Objetivos Específicos	18
4 Marcos de referencia	19
4.1 Generalidades de ubicación del HCFSS	19
4.2 Marco Conceptual	19
4.2.1 Contextualización y clasificación de los humedales.	19
Figura 1. Sección longitudinal de un humedal artificial.	20
Figura 2. Proceso de tratamiento en un humedal artificial	21
4.2.2 Ventajas y desventajas de los humedales construidos	22
4.2.3 Características de las Aguas residuales:	23
4.2.4 Descripción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual	24
□ Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	24
□ Demanda Química de Oxígeno (DQO)	24
□ Oxígeno Disuelto (OD)	25
□ Sólidos Suspendidos Totales.	26
□ Conductividad.	26
□ Potencial Hidrógeno (pH).	26
□ Coliformes totales y fecales.	26
□ Nitrógeno Total (NT).	27

□ Fósforo ²³ .	27
4.3 Descripción de la metodología del Índice de Calidad Ambiental	28
Tabla 4. Tipología de calidad ambiental	31
4.4 Requerimientos del decreto 1594/1984 15	32
4.5 Marco Legal.	34
Tabla 6. Marco legal vigente de acuerdo con la legislación colombiana	34
5 Metodología	35
5.1 Tipo de estudio.	35
5.2 Muestreos.	35
Tabla 7. Equipos utilizados para medir parámetros fisicoquímicos In Situ.	35
5.3 Plan de Análisis	36
5.3.1 Recolección de datos.	36
5.3.2 Procesamiento y análisis de datos.	36
5.4 Fases metodológicas	36
5.4.1 Fase 1. Descripción la infraestructura física y el comportamiento hidráulico del HCFSS (Diagnóstico)	36
5.4.2 Fase 2. Proceso de caracterización de las aguas a la entrada y la salida del sistema.	37
5.4.3. Fase 3. Comparar los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros medidos (físicos, químicos y biológicos), con los límites establecidos en la legislación ambiental vigente y el índice de calidad ambiental.	38
La metodología del ICA se explica en detalle en el marco de referencia.	38
5.4.3 Fase 4. Percepción de las personas residentes cerca de la influencia del humedal construido, como sistema de tratamiento de agua residual domestica.	38
6 Resultados	39
6.1 Descripción de la infraestructura física y comportamiento hidráulico del HCFSS.	39
6.1.1 Procedencia y composición de las aguas residuales.	39
6.1.2 Generalidades y dimensiones.	39
6.1.3 Configuración del filtro.	41
6.1.4 Plantas utilizadas en el humedal.	41

6.2	Caracterización del agua residual en el afluente y efluente del HCFSS	43
6.2.1	Primer Muestreo.	43
6.2.2	Segundo Muestreo.	43
6.2.3	Tercer Muestreo.	43
6.2.4	Cuarto Muestreo.	43
Tabla 9.	Resultados muestreo en agua residual. Guarne.	45
6.3	Aplicación de la fórmula del ICA de los resultados obtenidos de la caracterización del agua residual del HCFSS.	46
6.4	Resultados de la Aplicación de la encuesta de percepción del HCFSS	46
Tabla 10.	Resultados del HCFSS y su cumplimiento con el decreto	46
Fuente:	Datos tomados del Decreto 1594 de 1984.	46
Tabla 11.	Índice de Calidad Ambiental agua residual en el afluente. Guarne.	47
Tabla 12.	Índice de Calidad Ambiental agua residual en el efluente. Guarne.	48
6.5	Otros logros alcanzados durante la ejecución de este trabajo de investigación.	49
6.5.1	Equipos de laboratorio.	49
6.5.2	Finca la Selva de la Asociación Cristiana de Jóvenes (ACJ) (Unión, Antioquia).	49
7	Discusión de los resultados	51
7.1	Interpretación de los resultados de la caracterización del agua residual del HCFSS	51
7.1.1	Caudal (Q).	51
7.1.2	Temperatura (°C) y pH.	51
7.1.3	Oxígeno Disuelto (OD).	52
7.1.4	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	52
7.1.5	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	52
7.1.6	Sólidos Suspendidos Totales (SST).	54
7.1.7	Demanda Química de Oxígeno (DQO).	55
7.1.8	Nitrógeno Total (N) y Fósforo total (P).	55
7.1.9	Coliformes totales y fecales.	56
7.2	Alternativas de mejoramiento para el HCFSS	57
8	Conclusiones	58

Agradecimientos	59
Referencias Bibliográficas	60

Lista de Tablas

Tabla 1. Valor asignado a los diez primeros parámetros propuestos por Bascaran.....	29
Tabla 2. Unidades porcentuales de otros parámetros que intervienen en la calidad del agua.....	30
Tabla 3. Función de transformación del ICA a un valor del CA.	31
Tabla 4. Tipología de calidad ambiental	31
Tabla 5. Parámetros de interés para el estudio de la calidad del agua residual para vertimientos en una fuente receptora de agua.....	32
Tabla 6. Marco legal vigente de acuerdo con la legislación colombiana.....	34
Tabla 7. Equipos utilizados para medir parámetros fisicoquímicos In Situ.	35
Tabla 8. Caudal Diagnóstico en el afluente y efluente del HCFSS. Guarne 2011.....	40
Tabla 9. Resultados muestreo en agua residual. Guarne.....	45
Tabla 10. Resultados del HCFSS y su cumplimiento con el decreto	46
Tabla 11. Índice de Calidad Ambiental agua residual en el afluente. Guarne.	47
Tabla 12. Índice de Calidad Ambiental agua residual en el efluente. Guarne.	48

Lista de Figuras

Figura 1. Sección longitudinal de un Humedal Artificial.....	20
Figura 2. Proceso de tratamiento en un humedal artificial.....	21
Figura 3. Esquema humedal construido de flujo subsuperficial HCFSS de Guarne	40
Figura 4. Imagen de las Phragmites Australis en el humedal construido de flujo subsuperficial de Guarne.....	42

Lista de Anexos

Anexo 1. Matriz recolección de datos <i>In Situ</i>	61
Anexo 2. Consentimiento Informado versión 2.	62
Anexo 3. Encuesta de percepción versión 3.....	63
Anexo 4. Resultados de laboratorio de Guarne. Primer muestreo.....	65
Anexo 5. Resultados de laboratorio de Guarne. Segundo muestreo.	67
Anexo 6. Resultados de laboratorio de Guarne. Tercer muestreo	69
Anexo 7. Resultados de laboratorio de Guarne. Cuarto muestreo.	71
Anexo 8. Consolidado Encuesta de Percepción del humedal de Guarne...73	
Anexo 9. Fotografías Trabajo de grado HCFSS.....	75
Anexo 10. Estudio factibilidad finca la Selva en la Unión.	79
Anexo 11. Resultados Fundación Aurelio Llano. La Unión Corregido.	83
Anexo 12. Carta Fundación estudio de la Unión.	84
Anexo 13. Cumplimiento de la normatividad ARD. Corantioquia.	85

Glosario

Agua Residual: Líquidos procedentes de la actividad humana, que llevan en su composición, residuos y manipulaciones de cocinas (desperdicios, residuos animales o vegetales, detergentes y partículas) y de la actividad general de las viviendas¹.

Afluente: curso de agua que desemboca en otro de capacidad mayor².

Análisis físico-químico de agua: Son aquellas pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas³.

Análisis microbiológico del agua: Son aquellas pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos³.

Efluente: desechos líquidos o gaseosos, tratados o no, generados por diversas actividades humanas que fluyen hacia sistemas colectores, o directamente a los cuerpos receptores².

Humedal Construido de Flujo Libre (HCFL): Consisten normalmente en una o más cuencas o canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación⁴.

Humedal Construido de Flujo Subsuperficial (HCFSS): Son estanques o canales con el fondo generalmente impermeable sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava en el que se siembran las plantas emergentes. Y su nivel esta siempre por debajo de la superficie de la grava⁵

Índice de Calidad Ambiental (ICA): Indicador para determinar la calidad ambiental del agua.⁶

Materia Orgánica: pueden ser compuestos orgánicos provenientes de vegetales, animales o compuestos de síntesis. Degradables por acción microorganismos o no biodegradables. En las aguas residuales son principalmente proteínas, grasas, aceites, hidrocarburos, hidratos de carbono, agentes tensoactivos, pesticidas, compuestos orgánicos volátiles y no volátiles y otras estructuras más compleja².

Muestra puntual: Es la muestra individual representativa en un determinado momento.⁷

Reúso del agua: Utilización de los efluentes líquidos previo cumplimiento del criterio de calidad³.

Resumen

Se ha reportado la utilidad de los humedales construidos para la depuración de aguas contaminadas, como el caso de Estados Unidos, en donde se utilizaron humedales como una vía para el tratamiento de las aguas residuales que demostraron su eficacia. Se debe tener en cuenta que las aguas residuales albergan microorganismos patógenos, materia orgánica y metales pesados, por lo que la legislación colombiana establece parámetros de calidad que se deben cumplir para reutilizar las aguas tratadas. Lo anterior es posible porque los humedales remueven componentes perjudiciales del agua residual, mediante procesos biológicos, físicos y químicos. En este estudio se tuvo como objetivo explorar la calidad del agua tratada en el humedal construido de flujo subsuperficial, e indicar si era posible su reúso en riego agrícola, para lo cual se utilizó un humedal construido ubicado en Guarne, producto de otro trabajo de investigación del programa Administración en Salud: Gestión Sanitaria y Ambiental. En este proyecto fue necesario el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tanto en el laboratorio como mediciones *In situ*. Se realizaron cuatro muestreos en el afluente y el efluente, que arrojaron los primeros indicios de la efectividad de este humedal para el tratamiento de aguas residuales. Se encontró una remoción del 60% para DBO_5 y del 66% para SST, igualmente valores bajos de OD y una cantidad elevada de Coliformes totales y fecales, de lo cual se concluye que este humedal no cumple con los requerimientos del decreto 1594 de 1984 para reúso agrícola, pero se podría complementar con tratamiento químico para eliminar los microorganismos patógenos y mejorar su condiciones.

Palabras Clave: Agua residual, reúso del agua, humedales construidos, calidad del agua.

1 Introducción

Con el creciente aumento en el consumo del recurso hídrico se siente la preocupación mundial por el ahorro y su uso eficiente. En los próximos años las reservas mundiales de agua dulce para riego agrícola y en general, para consumo humano se podrían ver comprometidas por la contaminación de las mismas. Lo anterior ha obligado a desarrollar tecnologías eficientes para reducir el consumo y prevenir el recurso, permitiendo reutilizar aguas usadas y en consecuencia, disminuyendo la cantidad de agua residual que se genera⁸. Sin embargo el sector doméstico como industrial continúa generando aguas residuales, con gran cantidad de componentes orgánicos e inorgánicos que ponen en riesgo la salud de la comunidad y en general, del medio ambiente.

Dado que en numerosos regadíos se producen volúmenes importantes de agua residual, la necesidad de su reutilización resulta cada vez más manifiesta en países con escasez de agua⁸. Además, también debe considerarse el control de residuos industriales, los cuales pueden ser altamente tóxicos y en muchos casos no pueden ser eliminados utilizando el tratamiento convencional de aguas residuales⁹, razón por la cual, tener alternativas de tratamiento que, además de eliminar los componentes patógenos de las aguas residuales, no generen mayor contaminación, es una de las preocupaciones de la salud pública. Una buena alternativa son los humedales construidos.

Esta tecnología se inició a nivel experimental en Alemania en la década de 1960, aunque no fue hasta las dos últimas décadas del siglo pasado que empezaron a utilizarse para el tratamiento de las aguas residuales generadas por pequeños núcleos poblacionales en países de todos los continentes del mundo¹⁰.

Éste trabajo de investigación nace de la necesidad de esbozar un panorama de la manera en la que se llevan a cabo los procesos físicos, químicos y biológicos al interior de un humedal construido que trata aguas residuales domésticas. Dichos procesos se evalúan mediante la efectividad en la remoción de la materia orgánica, microorganismos patógenos, nitrógeno y fósforo realizando análisis fisicoquímicos y microbiológicos tanto en *In situ* como en laboratorio. El fin de éste estudio, fue realizar un acercamiento a la calidad del agua tratada del humedal construido de flujo subsuperficial que se encuentra en el municipio de Guarne y explorar la posibilidad de reúso en otro escenario.

2 Planteamiento del problema

2.1 Antecedentes del Problema

El uso del agua ha aumentado a escala mundial a un ritmo de dos veces superior al incremento de la población y un número creciente de regiones está alcanzando el límite en la prestación de servicio hídrico fiable. Esta situación se agrava conforme aumenta la demanda de una mayor calidad y cantidad de recursos hídricos locales en áreas urbanas en rápido crecimiento⁸. El buen uso del agua incidirá en la disponibilidad del recurso hídrico para las futuras generaciones.

La agricultura representa el principal sistema consumidor de agua en la mayoría de los países. En ella se utilizan altos volúmenes para riego, tanto en pequeños como en grandes sistemas; sin embargo, las eficiencias de aprovechamiento son muy bajas. El sector residencial también es un gran consumidor al utilizar elementos sanitarios que consumen elevadas cantidades de agua, lavadoras de ropa, regaderas, riego de jardines, etc. De otro lado, la industria en sus procesos de producción requiere altas cantidades del recurso¹¹.

Muchos sistemas naturales están siendo considerados con el propósito del tratamiento del agua residual y control de la contaminación de la misma. El interés en los sistemas naturales está basado en que son técnicas sostenibles de conservación del agua, opuesto al proceso de tratamiento convencional de aguas residuales que es intensivo respecto al uso de energía y químicos. Los humedales son uno de los tipos de sistemas naturales que pueden usarse para el tratamiento y control de la contaminación. Según U.S. EPA (1983), un humedal se construye específicamente con el propósito de controlar la contaminación y manejar los residuos, en un lugar donde existe un humedal natural¹².

En cuanto al uso de humedales artificiales para la depuración de aguas contaminadas, existen reportes de la utilidad que éstos tienen para el tratamiento de las aguas residuales:

“El primer reporte científico en el que se señalan las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales pertenece a la Dra. Kathe Seidel del Instituto Max Planck, de Alemania. En el informe de sus investigaciones ella plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) era posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como

inorgánicas, así como la desaparición de bacterias (coliformes, Salmonella y Enterococos) presentes en las aguas residuales”⁵.

En Alemania, en la década de los años 60 se desarrolló un sistema que se llamó “Método de zona de raíces”, el cual consistía en el diseño de estanques rectangulares con un lecho específico en los que se sembraba *Phragmites australis* y el flujo del agua residual era subsuperficial horizontal ⁵. Autores como Kadlec Robert H. y Knight R. L. (1993) dan cuenta de una buena historia del empleo de humedales naturales y construidos para el tratamiento de aguas residuales y disposición¹².

En Estados Unidos se utilizaron en un principio los humedales naturales como una vía para el tratamiento de las aguas residuales; sin embargo, se observó que ocurrían cambios en la composición de las especies comunes de estos sitios por lo que se decidió comenzar a diseñar humedales construidos para tratar las aguas residuales, las cuales demostraron su eficacia para éstos fines⁵.

En un estudio realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en un ingenio azucarero, se encontró que el agua proveniente del tratamiento de los efluentes de servicios sanitarios por medio de lagunas de oxidación se podía reusar en lavado de pisos, sistemas de enfriamiento, servicios sanitarios y riego agrícola¹¹. Asimismo en un estudio hecho en la Universidad de Zulia, mediante el uso de éstas, se regaron cultivos de lima, guayaba, mango, entre otros, con aguas tratadas de las lagunas. Una de las conclusiones de este estudio es que el crecimiento de las plantas frutales regadas con aguas tratadas provenientes de las lagunas de oxidación es favorable, no se presentaron factores que limiten el desarrollo vegetal y el consumo de la parte cosechable¹³. Lo anterior permite contemplar la posibilidad de reutilizar el agua de los efluentes de los humedales artificiales construidos.

2.2 Descripción del problema

Para reutilizar las aguas residuales tratadas en riego agrícola, se debe tener en cuenta que las aguas residuales albergan microorganismos patógenos como virus, protozoos, helmintos y bacterias los cuales causan enfermedades de origen hídrico⁹. También contienen metales pesados como cadmio, cobre, plomo, mercurio, selenio y cinc¹⁴, por lo cual, la legislación colombiana establece los parámetros de calidad que debe cumplir el agua que se espera reutilizar para uso agrícola. En el decreto 1594 de 1984, en su artículo 40, se

establecen niveles máximos permisibles de aluminio, cobalto, hierro, entre otros¹⁵. Igualmente la ley 373 de 1997 en su artículo cinco determina la obligatoriedad del reuso del agua, en la medida que la tecnología lo permita¹¹.

La eliminación de agentes patógenos es el principal objetivo del tratamiento de aguas residuales para aprovechamiento. Las directrices sobre la calidad de las aguas residuales y las normas para aprovechamiento, frecuentemente se expresan según el máximo número permisible de bacterias coliformes fecales y totales. Las normas establecidas en los últimos 50 años han sido, en general, muy estrictas, dado que se basan en una evaluación teórica de los posibles riesgos que para la salud tiene la supervivencia de agentes patógenos en las aguas residuales, el suelo y los cultivos¹⁶. El decreto 1594 de 1984 expresa una cantidad máxima para la presencia de coliformes en agua residual tratada que se quiera reutilizar en riego agrícola, sólo permite 5000 como número mas probable (NMP) para los coliformes totales y 1000 para los coliformes fecales.

En el año 2009 se realizó una investigación con humedales piloto y uno de los resultados fue la construcción de un humedal construido de flujo subsuperficial (HCFSS) en el municipio de Guarne, vereda el Zango. Este humedal fue construido sobre el terreno, cuyas dimensiones fueron: largo 2.0 m, ancho 1.0 m, profundidad total 0.6 m y nivel de la lámina de agua 0.3 m; recubierto con geomembrana PVC de 0.5 mm, se colocó grava de cantera de diámetro $\frac{3}{4}$ pulgadas, se utilizó tubería en forma de flauta (tubo perforado que distribuye el agua a lo ancho) para alimentar al humedal y recolectar el agua tratada, de tal manera que permitan un tiempo de residencia de 5 días¹⁷. Éste humedal se estudió solo de manera cualitativa, no se realizó ninguna caracterización en el efluente para conocer las características del agua que le ingresaba o de el agua tratada que se descarga en la quebrada la mosca. Por lo tanto se requería un estudio cuantitativo que diera una idea de la efectividad de la remoción de materia orgánica en el HCFSS.

Para la alimentación continua del humedal, se utiliza el efluente sobrenadante del pozo séptico con un caudal de diseño de 3.7 L/min¹⁸, en él se tratan aguas residuales domésticas. Sin embargo, no se conocen las condiciones microbiológicas y fisicoquímicas de la calidad del agua tratada resultante. El efluente de este humedal se vierte a la quebrada la Mosca y no es posible reutilizar estas aguas para riego agrícola ya que no se conocen sus características fisicoquímicas y microbiológicas.

En esta investigación se trató de resolver la pregunta, ¿Cuál es la calidad del agua tratada en un Humedal construido de flujo subsuperficial (HCFSS) para su reuso en riego agrícola?

2.3 Justificación

La preocupación por reusar agua de buena calidad no es nueva, de hecho, algunas de las técnicas de riego son tan antiguas como la construcción en Inglaterra del primer sanitario de bajo consumo en el año 1890, por Thomas Crapper¹¹

El uso eficiente no sólo aporta beneficios al usuario que lo efectúa, también significa mejoras para otros usuarios. Por ejemplo, el ahorro del líquido en zonas habitacionales implica una menor explotación de ríos y acuíferos y una mejor calidad del agua; además, al reducirse los consumos, hay menos agua residual, menos necesidad de obras de drenaje, más facilidad de tratamiento y menos riesgo de contaminación de los cuerpos receptores¹¹.

Las técnicas de aprovechamiento del recurso hídrico en los cultivos pueden mejorarse con sistemas de control, conducción, distribución y aplicación del riego a los cultivos adecuados¹¹. Reutilizar el agua tratada de los humedales construidos es posible ya que ellos remueven patógenos y demás componentes perjudiciales del agua residual, utilizando plantas para la remoción de contaminantes.

Este estudio implicó conocer la calidad del agua a reutilizarse de un tratamiento con un humedal subsuperficial que actualmente se vierte a la quebrada la Mosca, por lo cual se hicieron mediciones cuantitativas para determinar la calidad del agua tratada.

Para este proyecto fue necesario tomar muestras de agua, en el afluente y efluente del humedal, con el fin de determinar si la calidad del efluente (agua tratada) cumplía con los requerimientos de ley y conocer si puede ser reutilizado en actividades agrícolas.

3 Objetivo General

Evaluar, en una primera aproximación, la calidad del agua tratada en el humedal construido de flujo subsuperficial (HCFSS) en el municipio Guarne, durante el 2011, con el fin de determinar si es apta para reúso en riego agrícola. En caso de no cumplir proponer alternativas que complementen el tratamiento.

3.1 Objetivos Específicos

- Conocer el comportamiento del HCFSS (Diagnóstico).
- Realizar la caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas en el afluente y efluente del HCFSS.
- Comparar los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros medidos (físicos, químicos y biológicos), con los límites establecidos en la legislación ambiental vigente y el índice de calidad ambiental.
- Identificar la percepción de las personas residentes en el área de influencia del humedal construido, como sistema de tratamiento de agua residual doméstica.

4 Marcos de referencia

4.1 Generalidades de ubicación del HCFSS

Las aguas residuales provenientes de un establecimiento “El Punto Exacto” son descargadas al pozo séptico, luego pasan al humedal HCFSS y por último, el agua tratada es descargada a la quebrada la Mosca. Este lugar se encuentra ubicado en la vereda el Zango, Municipio de Guarne, sobre la autopista Medellín- Bogotá en el Km 19. Tiene tres años de funcionamiento y su propietaria es la Sra. Ana Libia Gallego¹⁹.

- **Vereda el Zango y Quebrada la Mosca²⁰.** La vereda limita por el oriente con las veredas Montañés y El Molino; por el occidente con la vereda San Isidro; por el norte con las veredas Romeral y Batea Seca; por el sur con las veredas El Salado parte baja y La Cabaña. La vereda se encuentra a 5 minutos en carro y 30 minutos a pie de la zona urbana, y a 40 minutos de las ciudades de Medellín y Rionegro. En cuanto al recurso hídrico, Guarne es uno de los municipios más ricos en agua. Su principal corriente es La Mosca, que lo atraviesa por el centro de norte a sur, con una extensión de 30 kilómetros. Recibe por su margen derecha las quebradas Batea Seca, El Sango, El Salado, La Brizuela, La Honda, San José, Hojas Anchas, La Mosquita y Garrido. Por la margen izquierda recibe los afluentes La Mejía, Montañés, La Mulona, Basto Norte, Basto Sur, La Ochoa, San Felipe, La Clara, Chaparral y La Castro.

4.2 Marco Conceptual

4.2.1 Contextualización y clasificación de los humedales.

- **Humedales naturales.** Los humedales son ecosistemas que cumplen numerosas funciones ambientales, la más importante de todas es ser un reservorio de agua y albergue de una gran biodiversidad. Estos ecosistemas también entregan beneficios al hombre, de tipo económico, social y cultural, ya que permiten el desarrollo de las actividades pesqueras y agrícolas, abastecen de agua a las comunidades cercanas, permiten la explotación del recurso energético y son un espacio para la recreación y el turismo²¹.
- **Humedales construidos.** Son construcciones hechas por el hombre, las cuales imitan los humedales naturales, que tienen como función fundamental el tratamiento de las aguas residuales. Por esta razón ellos se incluyen entre los llamados sistemas naturales de tratamiento⁵. En estos

sistemas los contaminantes presentes en las aguas residuales son removidos por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el ambiente natural, entre estos procesos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana (**Figura 1**).

En los humedales crecen vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estas condiciones ambientales. Estos seres vivos, junto a procesos físicos (floculación, sedimentación y filtración de los sólidos suspendidos, entre otros) y químicos (nitrificación, adsorción del fósforo, desnitrificación, entre otros) son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y, en algunos casos, productos químicos tóxicos; por esta razón se ha llamado a los humedales “los riñones del mundo”¹⁴ (**Figura 2**). Los humedales artificiales tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para funcionar. Si hay suficiente tierra económica disponible cerca de la instalación de los humedales de cultivo acuático, puede ser una alternativa de costo efectivo.

Los humedales artificiales proporcionan el hábitat para la vida silvestre, y son, estéticamente, agradables a la vista²². El término de humedales construidos es relativamente nuevo; sin embargo, el concepto es antiguo, pues se tiene conocimiento que antiguas culturas como la China y la Egiptia utilizaban los humedales naturales para la disposición de aguas residuales⁵.

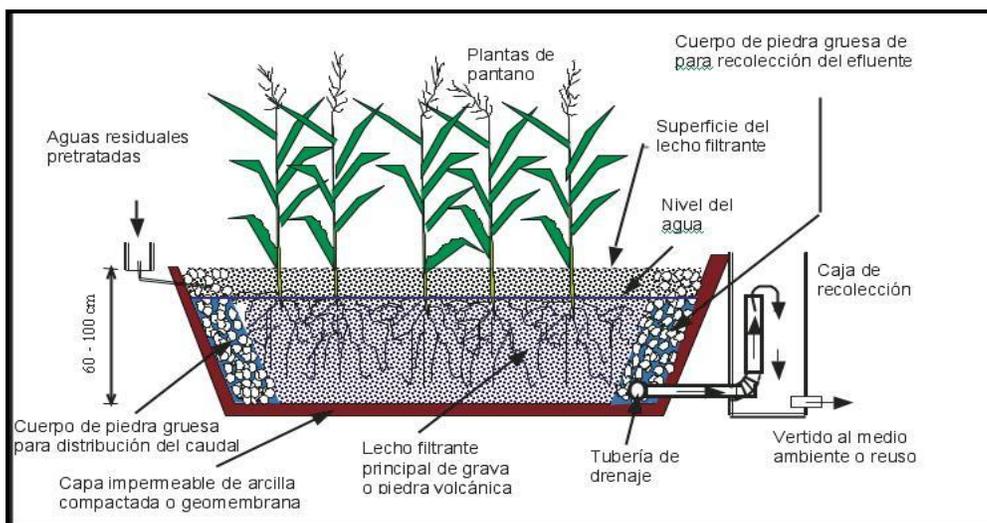


Figura 1. Sección longitudinal de un humedal artificial.

Fuente: Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial (WPS). Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd32/biofil.pdf>

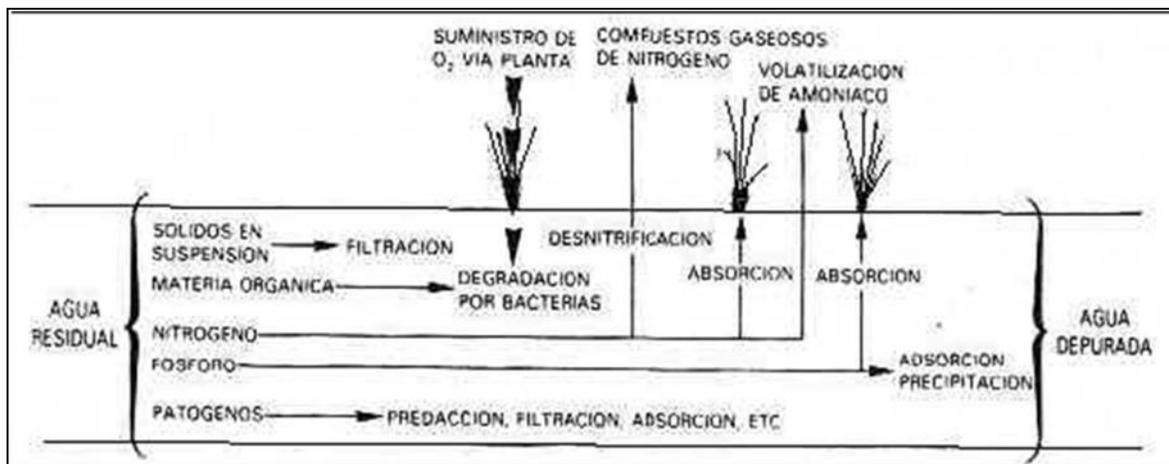


Figura 2. Proceso de tratamiento en un humedal artificial

Fuente: Diseño Del Sistema De Tratamiento Para La Depuración De Las Aguas Residuales. Universidad Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6087>

Los humedales construidos se clasifican en dos tipos, éstos dependiendo del flujo del agua que tratan; son los humedales construidos de flujo libre y los de flujo subsuperficial.

- **Humedal construido de flujo libre (HCFL).** Consisten normalmente en una o más cuencas o canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FSL incluye las espadañas y aneas (*Typha* spp.), los juncos (*Scirpus* spp.) y los carrizos (*Phragmites* spp.)⁴.
- **Humedal construido de flujo subsuperficial (HCFSS).** Son estanques o canales con el fondo generalmente impermeable sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava en el que se siembran las plantas emergentes. Las aguas residuales aplicadas a estos sistemas deben ser pretratadas. Y su nivel está siempre por debajo de la superficie de la grava. Este tipo de humedales puede ser construido con flujo horizontal subsuperficial, en el que el medio poroso se mantiene saturado por el agua, o con flujo vertical en el que el medio poroso no se encuentra saturado debido a que el agua se aplica usualmente sobre la superficie del lecho a intervalos de tiempo, lo que permite que el agua percole a través del medio, de forma similar a lo que sucede en un filtro de arena intermitente⁵.

4.2.2 Ventajas y desventajas de los humedales construidos

Ventajas⁴:

- Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados.
- Pueden ser menos costosos de construir, usualmente también son menos costosos para operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente.
- La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.
- La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semi cálidos. La configuración de los HCFSS proporciona una mayor protección térmica que los HCFL.
- Los sistemas de HCFSS no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.
- Los HCFSS 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.
- Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con los HCFSS mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga. También se elimina el riesgo que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.

Desventajas⁴:

- Un HCFSS requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
- La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales HCFSS es un proceso continuo renovable. El fósforo, los metales y algunos

compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.

- En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH_3 y NO_3 . Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la disminución de las tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico.
- La mayoría del agua contenida en los humedales HCFSS es anóxica, limitando el potencial de nitrificación del amoníaco del agua residual.
- Los sistemas de humedales HCFSS típicamente reducen al menos un orden de magnitud el contenido de coliformes fecales. Esto no es siempre suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. La desinfección con luz ultravioleta ha sido utilizada con éxito en varias aplicaciones.

4.2.3 Características de las Aguas residuales¹⁷:

Las aguas residuales poseen características físicas, químicas y microbiológicas que afectan su calidad, dichas características se deben conocer y entender para hacerle el tratamiento más adecuado.

- **Características físicas de las aguas residuales.** Las características físicas más importantes de las aguas residuales las constituyen el contenido total de sólidos (orgánicos e inorgánicos), olor, temperatura, color y turbiedad. La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia sobre el desarrollo de la vida acuática y sobre algunos usos del agua.
- **Características químicas de las aguas residuales.** Comprenden: La materia orgánica (particulada o disuelta), la materia inorgánica y los gases presentes en ella. La materia orgánica presente en las aguas residuales se puede medir determinando la demanda química de oxígeno, la demanda biológica de oxígeno. Dentro de las características químicas el valor del pH es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales, pues de su variabilidad depende la proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica.

Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales son el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2), el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3) y el metano (CH_4). Los tres primeros son gases de común presencia en la atmósfera y se encuentran en todas las aguas en contacto con la misma. Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales. De los mencionados anteriormente el oxígeno disuelto es el más importante, es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida. El Oxígeno disuelto es el principal indicador de contaminación de una masa de agua, pues la materia orgánica contenida en ellas tiene como efecto directo el consumo de oxígeno.

- **Características biológicas de las aguas residuales.** Las aguas residuales domésticas contienen gran número de organismos vivos encargados de desarrollar la actividad biológica, producen fermentaciones, descomposición y degradación de la materia orgánica e inorgánica. Estos organismos pueden ser bacterias, algas, hongos, protozoos, plantas, animales y virus. Para este estudio es importante la identificación de coliformes fecales.

4.2.4 Descripción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)²³**

Se utiliza para determinar la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar, descomponer, oxidar y estabilizar la materia orgánica disponible bajo condiciones aerobias a una temperatura y un tiempo determinados. En otras palabras, hace referencia a la cantidad de materia orgánica que puede servir de alimento a las bacterias, esta oxidación de la materia orgánica genera energía. Se mide en mg/L de O_2 . El resultado que se obtiene de los análisis de laboratorio indica cuantos mg de materia orgánica existe por cada litro de agua. La carga orgánica se expresa como carga orgánica de DBO: $(CO)_{DBO}$ en Kg/día.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)²³**

Determina la cantidad de oxígeno necesario para oxidar por vía química las sustancias orgánica presentes en una muestra de agua residual y transformarlas en dióxido de carbono y agua. Se mide en mg/L de O_2 . El resultado que se obtenga de los análisis de laboratorio indicara la cantidad en

mg de materia orgánica que tiene la muestra por cada litro de agua, ó, la cantidad en mg de oxígeno que se requieren para oxidar la materia orgánica por vía química. Conjuntamente con la prueba de DBO, la de la DQO es útil para indicar las condiciones tóxicas y la presencia de de sustancias orgánicas biológicamente resistentes.

- **Oxígeno Disuelto (OD)²³**

Cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua, es un indicador de cuán contaminada está el agua entre más alta la concentración de oxígeno el agua será de mejor calidad. En los desechos líquidos, el oxígeno disuelto es el factor que determina que los cambios biológicos sean producidos por organismos aeróbicos o anaeróbicos. Los aeróbicos usa oxígeno libre para la oxidación de la materia orgánica e inorgánica y forman productos finales inocuos mientras que los anaeróbicos llevan a cabo la reducción de algunas sales inorgánicas como sulfatos, y los productos finales generalmente son muy perjudiciales. Puesto que las dos clases de organismos están propagados por la naturaleza, es muy importante que se mantengan condiciones favorables para los organismos aerobios, de otra manera, proliferaran los organismos anaerobios y se generaran condiciones nocivas. Se mide en mg/L, la cantidad mínima que debe tener un cuerpo de agua es de 5mg/L para que exista la vida acuática según la OMS. La concentración máxima de oxígeno disuelto que se obtiene es de aproximadamente 8mg/L de O₂. Las determinaciones de oxígeno disuelto son la base para del análisis de de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La velocidad de la oxidación bioquímica se puede calcular determinando el oxígeno disuelto residual de un sistema a diferentes intervalos de tiempo.

La presión atmosférica y la temperatura intervienen en la concentración de O₂ de la siguiente manera:

>Temperatura <Oxígeno Disuelto, a mayor T, menor OD.

<Temperatura >Oxígeno Disuelto, a menor T, mayor OD.

>Presión Atmosférica >Oxígeno Disuelto, a mayor Pa, mayor OD.

<Presión Atmosférica <Oxígeno Disuelto, a menor Pa, menor OD.

Igualmente, la concentración de OD disminuye cuando la cantidad de materia orgánica aumenta.

- **Sólidos Suspendidos Totales²³**.

Este es un parámetro de gran utilidad e importancia en el análisis de las aguas residuales. Se define como el residuo que permanece después de someter una muestra de agua a un proceso de evaporación y secado a una temperatura aproximada de 103 a 105 °C. La presencia de sólidos en el agua implica cierto grado de contaminación, por lo cual se originan enfermedades hídricas por lo cual deben removerse. Se miden en mg/L. En las operaciones de control de la contaminación de las corrientes, se considera que todos los sólidos suspendidos se sedimentan puesto que el tiempo no es un factor limitante. Se espera que la sedimentación se lleve a cabo por la floculación biológica y química, y por lo tanto la medición de los sólidos suspendidos se considera por lo menos tan indicativa como la DBO.

- **Conductividad²⁴**.

Es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones sueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por ésta razón, el valor de la conductividad se unas mucho en análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos. Se mide en $\mu\text{S/cm}$.

- **Potencial Hidrógeno (pH)²³**.

Indica el grado de acidez o basicidad de una solución, se puede decir también que determina la concentración de iones H^+ en una solución. Una solución es neutra si tiene un valor de pH equivalente a 7, si es inferior a 7, corresponde a una solución ácida y si es mayor (hasta 14) corresponde a una solución alcalina. En el tratamiento de aguas residuales mediante procesos biológicos, el pH se debe mantener en un margen favorable para la supervivencia de los organismos específicos que intervienen.

- **Coliformes totales y fecales²³**.

No todos los coliformes son de origen fecal, por lo que se hizo necesario desarrollar pruebas para diferenciarlos a efectos de emplearlos como indicadores de contaminación. Se distinguen, por lo tanto, los coliformes totales —que comprende la totalidad del grupo— y los coliformes fecales —aquellos de origen intestinal—. Desde el punto de vista de la salud pública

esta diferenciación es importante puesto que permite asegurar con alto grado de certeza que la contaminación que presenta el agua es de origen fecal.

Los coliformes fecales son un grupo bacteriano presente en los intestinos de los mamíferos y los suelos, que representan una indicación de la contaminación fecal del agua. Son fáciles de identificar y contar en laboratorio por su capacidad de fermentar la lactosa. Si se aplica este criterio crecerán en el medio de cultivo principalmente *Escherichia coli* (90%) y algunas bacterias de los géneros *Klebsiella* y *Citrobacter*. La prueba de coliformes fecales positiva indica un 90% de probabilidad de que el coliforme aislado sea *E. coli*.

Las bacterias aerobias consumen O_2 al degradar la materia orgánica. Por lo tanto disminuye la DBO_5 , cuando se acaba la reserva de O_2 , éstas mueren.

- **Nitrógeno Total (NT)²³**.

El NTK es igual al nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal. La determinación de nitrógeno se hace con frecuencia para controlar el grado de purificación obtenida con los tratamientos biológicos. Al controlar la nitrificación, los costos del tratamiento aeróbico se pueden reducir al mínimo. A partir de extensas investigaciones en Iowa, Minnesota y Ohio, se concluyó que se debe limitar el contenido de nitrato. Por esta razón, la Agencia de Protección Ambiental –EPA, por sus siglas en inglés- de Estados Unidos ha establecido un nivel contaminante máximo, que impone que la concentración del nitrógeno en forma de nitrato no exceda los 10mg/L en los abastecimientos públicos de agua.

- **Fósforo²³**.

Todos los organismos que participan en los procesos biológicos del tratamiento de las aguas residuales requieren fósforo para la reproducción y síntesis de nuevo tejido celular. El agua residual doméstica contiene cantidades de fósforo que exceden con mucho la cantidad necesaria para estabilizar el limitado volumen de materia orgánica presente, hecho que se demuestra por las apreciables cantidades que se encuentran en los efluentes de las plantas de tratamiento biológico de las aguas residuales. Debido a la importancia del fósforo como nutriente en los métodos biológicos de tratamiento del agua residual, su determinación es esencial en muchos residuos industriales y en el funcionamiento de las plantas de tratamiento de residuos.

4.3 Descripción de la metodología del Índice de Calidad Ambiental

Se tomó como referencia la metodología explicada en la Guía Metodológica para la evaluación del Impacto ambiental” del Ingeniero agrónomo Vicente Conesa en su anexo 3 “estudio de factores medioambientales” subtema III “agua” en la cual se explica una metodología para estudiar la calidad ambiental del agua mediante la fórmula del Índice de Calidad Ambiental (ICA)⁶

1. Se aplicó la formula siguiente a los parámetros estudiados tanto en el afluente como en el efluente del sistema de tratamiento:

$$ICA = K \sum C_i P_i / \sum P_i, \quad \text{Donde:}$$

K= constante que se toma de los siguientes valores:

1.00 para aguas claras sin aparente contaminación

0.75 para aguas con ligero color, espumas, ligera turbidez aparente no natural

0.50 para aguas con apariencia de estar contaminada y fuerte olor

0.25 para aguas negras que presenten fermentaciones y olores

C_i = Valor porcentual asignado a los parámetros (**Tabla 1 y Tabla 2**)

P_i = Peso asignado a cada parámetro (**Tabla 1 y Tabla 2**)

Tabla 1. Valor asignado a los diez primeros parámetros propuestos por Bascaran

Parámetro	pH	Conductividad	Oxígeno Disuelto	Reducción del permanganato	Coliformes	Nitrogeno amoniacal	Cloruros	Temperatura	Detergentes	Aspecto	Valoración porcentual
A N V A L I O T R I C O	1/14	>16.000	0	>15	>14.000	>1,25	>1.500	>50 / >-8	>3,00	Pésimo	0
	2/13	12.000	1	12	10.000	1	1.000	45/-6	2	Muy malo	10
	3/12	8.000	2	10	7.000	0,75	700	40 / -4	1,5	Malo	20
	4/11	5.000	3	8	5.000	0,5	500	36/ -2	1	Desagradable	30
	5/10	3.000	3,5	6	4.000	0,4	300	32/0	0,75	Impropio	40
	6/9,5	2.500	4	5	3.000	0,3	200	30/5	0,5	Normal	50
	6,5	2.000	5	4	2.000	0,2	150	28/10	0,25	Aceptable	60
	9	1.500	6	3	1.500	0,1	100	26/12	0,1	Agradable	70
	8,5	1.250	6,5	2	1.000	0,05	50	24/14	0,06	Bueno	80
	8	1.000	7	1	500	0,003	25	22/15	0,02	Muy Bueno	90
7	<750	7,5	<0,5	<50	0	0	21 a 16	0	Excelente	100	
Unidad de Medida	Udad.	µmhos/cm	mg/ L	mg/ L	n°/100 ml	p.p.m	p.p.m.	°C	mg/ L	Subjetiva	%
Peso	1	4	4	3	3	3	1	1	4	1	
Los valores analíticos que corresponden a un valor porcentual menor que 50, se entienden como no permisibles. Se precisarían medidas correctoras											

Fuente: Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental. Vicente Conesa. Anexo 3, estudio de factores medioambientales, subtema "agua".

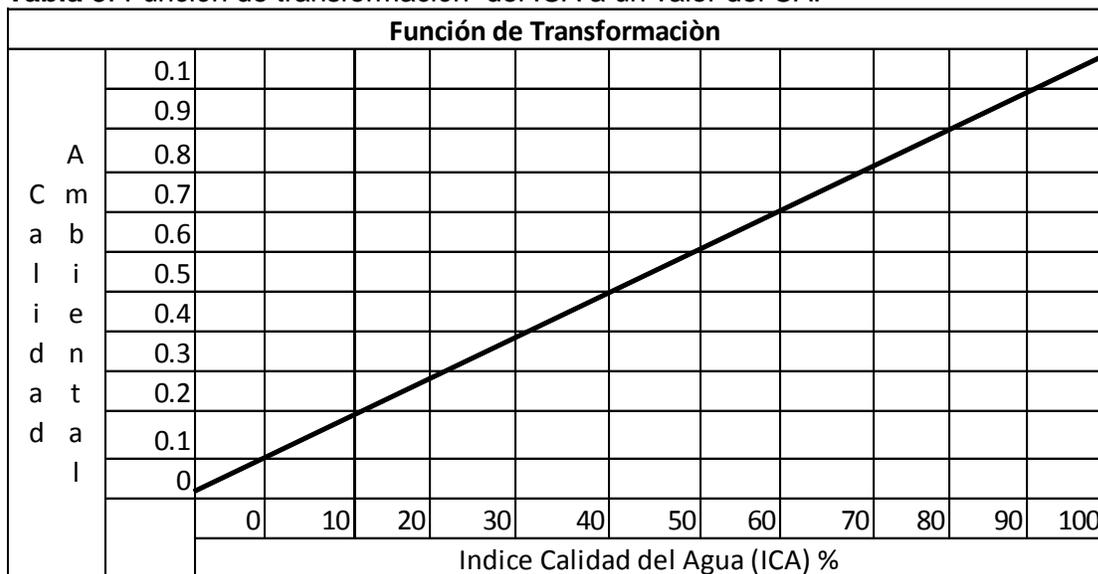
Tabla 2. Unidades porcentuales de otros parámetros que intervienen en la calidad del agua.

Parámetro	Dureza	Sólidos Disueltos	Plaguicidas	Grasas y aceites (percloroformo)	Sulfatos	Nitratos	Cianuros	Sodio	calcio	Magnesio	Fosfatos	Nitritos	DBO ₅	Valoración porcentual
A N V A L L I O T R I C O	>1.500	>20.000	>2	>3	>1.500	>100	>1	>500	>1.000	>500	>500	>1	>15	0
	1000	10.000	1	2	1.000	50	1	300	600	300	300	0,5	12	10
	800	5.000	0,4	1	600	20	0,5	250	500	250	200	0,25	10	20
	600	3.000	0,2	0,6	400	15	0,4	200	400	200	100	0,2	8	30
	500	2.000	0,1	0,3	250	10	0,3	150	300	150	50	0,15	6	40
	400	1.500	0,05	0,15	150	8	0,2	100	200	100	30	0,1	5	50
	300	1.000	0,025	0,08	100	6	0,1	75	150	75	20	0,05	4	60
	200	750	0,01	0,04	75	4	0,05	50	100	50	10	0,025	3	70
	100	500	0,005	0,02	50	2	0,02	25	50	25	5	0,01	2	80
	50	250	0,001	0,01	25	1	0,01	15	25	15	1	0,005	1	90
<25	<100	0	0	0	0	0	0	<10	<10	<10	0	0	<0,5	100
Unidad de Medida	mg CO ₃ Ca/1	mg/L	p.p.m.	p.p.m.	p.p.m.	p.p.m	p.p.m	mg/ L	mg/ L	mg/ L	mg/ L	mg/ L	mg/ L	%
Peso	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	3	

Fuente: Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental. Vicente Conesa. Anexo 3, estudio de factores medioambientales, subtema "agua".

2. Con el valor ICA obtenido de la formula, se ubico en la **Tabla 3** “Función de la transformación” el valor correspondiente para su calidad ambiental (CA)

Tabla 3. Función de transformación del ICA a un valor del CA.



Fuente: Guía Metodológica Para la Evaluación del Impacto Ambiental. Vicente Conesa. Anexo 3, estudio de factores medioambientales, subtema “agua”

3. Con el número CA dado en la **Tabla 3**, se procede a identificar la tipología de la calidad ambiental dada por el autor en la Tabla 5 y con el cual se obtiene las respectivas interpretaciones y conclusiones.

Tabla 4. Tipología de calidad ambiental

Tipología de Calidad Ambiental	
Condición del Agua	Valor CA
OPTIMA	0.8 – 1.0
BUENA	0.6 – 0.8
ACEPTABLE	0.4 – 0.6
BAJA	0.2 – 0.4
INACEPTABLE	0.0 – 0.2

Fuente: Guía Metodológica Para la Evaluación del Impacto Ambiental. Vicente Conesa. Anexo 3, estudio de factores medioambientales, subtema “agua”

4.4 Requerimientos del decreto 1594/1984 ¹⁵

El decreto 1594/84 es el que establece los parámetros de interés para el estudio de la calidad de las aguas residuales, entre ellas, las concernientes con las normas de vertimiento del artículo 72 y para reúso en riego agrícola en su artículo 40. Los parámetros estudiados se encuentran en la tabla 6.

Tabla 5. Parámetros de interés para el estudio de la calidad del agua residual para vertimientos en una fuente receptora de agua.

Parámetro de interés del decreto 1594/84	Límite Permisibles
pH	5 a 9 Unidades
Temperatura	<40° C
Sólidos Suspendedos Totales	Remoción mínima: 80% en carga
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Remoción mínima: 80% en carga
Coliformes Totales	<5000 NMP
Coliformes Fecales	<1000 NMP

Fuente: Datos tomados del Decreto 1594 de 1984.

En el artículo 75, se dan las fórmulas mediante las cuales se calculan las Cargas Máximas Permisibles (CMP) para la carga orgánica en un vertimiento. Asimismo, en el artículo 78 se establece la manera de hacerle control a los diferentes parámetros que intervienen en la calidad del agua para reúso. En dicho artículo se consigna que SST y DBO se analizaran mediante CMP. La norma entrega la siguiente fórmula:

$$A = Q * CDC * \frac{1\text{Kg}}{1000000\text{mg}} * \frac{1\text{L}}{1000\text{ml}} * \frac{84600\text{s}}{1\text{día}}$$

$$B = Q * CV * \frac{1\text{Kg}}{1000000\text{mg}} * \frac{1\text{L}}{1000\text{ml}} * \frac{86400\text{S}}{1\text{día}}$$

Donde,

A= Carga de Control, Kg/día

B: Carga en el vertimiento Kg/día

Q: Caudal

CV: Concentración en el vertimiento mg/ L

CDC: Concentración de Control

Factor de conversión:

1Kg	*	1L	*	86400 S
1000000 mg		1000 ml		1 día

4.5 Marco Legal.

En cuanto a la legislación colombiana, se tienen varios criterios para calidad del agua dependiendo del uso, ya sea recreativo, industrial, preservación de flora y fauna, reuso agrícola, transporte, entre otros. Igualmente, se tienen criterios de uso eficiente y ahorro del agua que es parte de la finalidad del estudio de la posibilidad del reúso del agua en riego agrícola. La legislación vigente que aplica a esta investigación se relaciona en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Marco legal vigente de acuerdo con la legislación colombiana

Ley- Decreto- Resolución-	Título	Editado por	Artículos
Ley 2811/1974	Código Nacional de los Recursos Naturales	Congreso de la República de Colombia	134, 135, 136, 137 Literal a, 139, 141, 142, 143, 144, 145
Ley 9 /1979	Código Sanitario Nacional	Ministerio de Salud	10, 11, 12, 14, 15
Ley 373/1997	Ahorro y uso eficiente del agua	Ministerio de Desarrollo Económico	5
Decreto 1594/1984	Uso del agua y residuos líquidos	Ministerio de Agricultura	24, 32, 40, 72, 78.
Decreto 3930/2010	Usos del agua y residuos líquidos	Ministerio del Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial.	13, 19, 24

Fuente: construida con la información de la legislación colombiana

5 Metodología

5.1 Tipo de estudio.

En el HCFSS en el municipio de Guarne se hizo un estudio exploratorio descriptivo analítico de corte transversal. Para esta investigación se utilizó un HCFSS ubicado en la vereda el Zango que fue el producto de un trabajo realizado por una estudiante egresada el programa de Administración en Salud: Gestión Sanitaria y Ambiental¹⁷¹⁷. Esta investigación es exploratoria porque hace un primer acercamiento a la calidad del agua tratada en el HCFSS, descriptiva porque se describe el HCFSS y los procesos que ocurren en él; es analítico porque se hacen análisis en base a datos obtenidos de la cuantificación de variables para determinación de la calidad del agua; y de corte transversal porque se hizo en un tiempo determinado.

5.2 Muestreos.

Se hicieron 4 muestreos en la válvula de control del afluente y 4 en la tubería de salida del efluente del HCFSS para hacer medición de 13 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, de los cuales 5 se hicieron mediante medición *in situ* (OD, Conductividad, pH, temperatura y medición de caudal). Para los otros 8 parámetros (DBO₅, SST, ST, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales) se tomaron muestras para su análisis en el laboratorio contratado para ello. Fueron en total dos puntos de muestreo (Afluente y efluente).

Para el muestreo se utilizaron los siguientes equipos portátiles:

Tabla 7. Equipos utilizados para medir parámetros fisicoquímicos *In Situ*.

Parámetro	Equipo utilizado
Oxígeno Disuelto	Equipo WTW Oxi 3205 set 1 con sensor CelloX 325
pH	Equipo WTW pH 3210 set 2 con electrodo SenTix 41
Conductividad	Equipo WTW Cond 3210 set 1 con sensor TetraCon 325

Fuente: elaboración propia

Para los parámetros medidos *in situ*, en cada punto de muestreo se tomó una muestra de 100ml con un beaker y se hizo la medición respectiva. En total fueron 160 mediciones, repartidas en 4 muestreos que corresponden a 40 mediciones por muestreo y de las cuales se tomaron 8 mediciones por cada parámetro, 4 para el afluente y 4 para el efluente. Se tuvo especial cuidado para la medición del OD ya que no se debía ingresar oxígeno a la muestra para tener resultados viables. Se

consignó la información en una matriz diseñada para recolectar los datos (**Anexo 1**).

Para los parámetros que debían ser analizados en el laboratorio (DBO_5 , DQO, SST, ST, Coliformes totales y fecales, N y P) se tomó una muestra puntual en cada punto de muestreo en los recipientes suministrados por el laboratorio contratado, para un total de 2 muestras por cada uno. Estas muestras se conservaron en refrigeración para ser custodiados hasta el laboratorio. Se tuvo cuidado al momento de tomar la muestra para DBO_5 ya que no debía ingresarle oxígeno y para la muestra de Coliformes se utilizó un frasco esterilizado, en el cual se tomó 200ml de muestra. Para éste parámetro se tomó una muestra adicional como réplica para el control de los resultados.

Se hicieron sólo 4 muestreos simples por falta de recursos y la idea era hacer una primera aproximación de la calidad del agua que sale del HCFSS.

5.3 Plan de Análisis

5.3.1 Recolección de datos.

Se utilizó una matriz de recolección de datos in situ (**Anexo 1**), también se consignaron datos en un diario de campo que se llevo durante el desarrollo de ésta investigación. Para el objetivo específico 4 se elaboró una encuesta de percepción (**Anexo 2**) con su respectivo consentimiento informado (**Anexo 3**).

5.3.2 Procesamiento y análisis de datos.

Se utilizaron hojas de Excel para consignar los datos y hacer los análisis respectivos. Se sacaron los promedios de los resultados y se elaboraron tablas en las que se agruparon y relacionaron los datos.

5.4 Fases metodológicas

5.4.1 Fase 1. Descripción del comportamiento del HCFSS (Diagnóstico)

Para ello se realizaron las siguientes actividades:

- Dimensionamiento y configuración del humedal (medición *In Situ*): se hizo la medición del humedal en cuanto al ancho, largo y profundidad. Además se estudiaron los documentos existentes del humedal construido.

- Cálculo técnico del caudal: se hizo la medición mediante la fórmula $Q = V/t$, donde Q es caudal, V es volumen y t es tiempo. Se realizó tanto en el afluente como en el efluente del sistema de tratamiento.
- Proceso de tratamiento del agua: se hizo una revisión bibliográfica del proceso de tratamiento del agua, de la remoción de materia orgánica, metales pesados y organismos vivos. Además se estudiaron los tipos de plantas se utilizan, y de que forma eliminan los agentes patógenos, igualmente se determinó la configuración de los elementos del filtro.
- Procedencia de las aguas residuales: se identificó el sitio de donde provienen y sus componentes.

5.4.2 Fase 2. Caracterización de las aguas a la entrada y la salida del sistema.

Los parámetros físicos, químicos y biológicos se seleccionaron teniendo en cuenta lo establecido en el decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Salud; para este estudio se seleccionaron los siguientes parámetros:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Sólidos Totales (ST)
- Oxígeno Disuelto (OD)
- Nitrógeno Total
- Fósforo Total
- Coliformes Fecales
- Coliformes Totales
- pH
- Conductividad.
- Temperatura
- Caudal

De acuerdo con los parámetros definidos anteriormente, se procedió a realizar el muestreo simple a la entrada y salida del sistema, el cual se llevó a cabo de la siguiente forma:

- Definición puntos de muestreo: los puntos de muestreo escogidos fueron en el afluente y el efluente del humedal.

- Aforar los caudales a la entrada y salida del sistema: con un beaker aforado se tomaron mediciones del caudal en tres tiempos diferentes para sacar un promedio del mismo.
- Toma de muestras: se hicieron 4 muestreos; cada muestreo se realizó tomando una muestra puntual en el afluente y efluente del sistema. Se midió el pH, el oxígeno disuelto, la temperatura y la conductividad eléctrica en el afluente y el efluente del humedal *In situ*.
- Cada muestra se preservó mediante refrigeración (+/- 4°C).
- Se Transportó cada muestra del sitio de muestreo al laboratorio, el mismo día de la toma de muestra.
- Se hizo entrega de cada muestra al laboratorio para analizar los demás parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

5.4.3. Fase 3. Comparación los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros medidos (físicos, químicos y biológicos), con los límites establecidos en la legislación ambiental vigente y el índice de calidad ambiental.

Análisis e interpretación de resultados de acuerdo a la legislación ambiental vigente y haciendo uso del Índice de Calidad Ambiental. Se elaboró una base de datos para organizar y analizar los datos.

La metodología del ICA se explica en detalle en el marco de referencia.

5.4.3 Fase 4. Percepción de las personas residentes cerca de la influencia del humedal construido, como sistema de tratamiento de agua residual domestica.

Se aplicó la encuesta a 17 personas. Los criterios de inclusión y exclusión fueron vivir en las cercanías del humedal (500 m a la redonda) y ser mayor de 18 años. Se escogió de manera aleatoria y contó con la aprobación del encuestado mediante el consentimiento informado (**Anexo 3**)

Se consolidaron y analizaron los resultados utilizando una base de datos elaborado con el programa Microsoft Excel, y de esa manera se hizo el análisis de la percepción que se tiene del humedal.

6 Resultados

6.1 Descripción del comportamiento del HCFSS.

6.1.1 Procedencia y composición de las aguas residuales.

Las aguas proceden de un establecimiento público “El Punto Exacto”, ubicado en la zona rural de Guarne (Antioquia). Sus residuos líquidos son consistentes con aguas residuales domésticas, las cuales contienen materia orgánica como restos de comida, cascaras de frutas y vegetales, restos de alimentos sin preparar, etc¹⁸. Las aguas residuales tienen un primer tratamiento en un pozo séptico y luego pasa a una caja de rebose, en donde se apreciaron fuertes olores y partículas en suspensión. De la caja de rebose pasa a través de una tubería agujerada tipo flauta que distribuye el agua residual doméstica en el humedal.

6.1.2 Generalidades y dimensiones.

El HCFSS después de su construcción en el año 2009, tuvo un tiempo de maduración de tres a cuatro meses, tiempo durante el cual las plantas se adaptaron y crecieron. Igualmente, durante este tiempo, se estabilizaron las comunidades microbianas responsables de parte del proceso biológico. En el humedal se trata un caudal de 60ml/s en un tiempo de retención de cinco días, además se encuentra recubierto por geomembrana de PVC de 0.5 mm y geotextil 1.600, cuyas dimensiones son 2.0 m de largo, 1.0 de ancho y 0.6 m de profundidad. **(Figura 3)**.

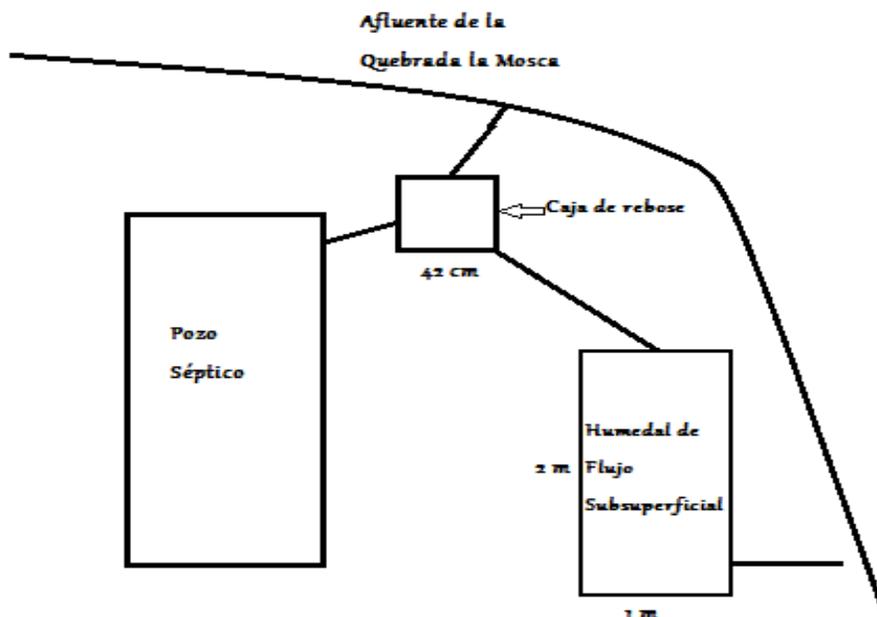


Figura 3. Esquema humedal construido de flujo subsuperficial HCFSS de Guarne
Fuente: Elaboración Propia.

Se aforaron los caudales tanto en el afluente como el afluente del sistema y se obtuvieron los resultados consignados en la Tabla 6.

Tabla 8. Caudal Diagnóstico en el afluente y efluente del HCFSS. Guarne 2011.

Caudal (Q)				
Afluente	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Q= 24 ml/s
V (ml)	100	100	100	
t (s)	5	3.36	4.12	
Caudal (Q)				
Efluente	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Q= 25.23 ml/s
V (ml)	100	100	100	
t (s)	3.76	4.2	3.93	

Fuente: Datos de campo

Es de aclarar que el Q fue variable, ya que ésta depende de la actividad que haya en el establecimiento de donde provienen las aguas residuales. Estos fueron caudales puntuales y de carácter preliminar.

6.1.3 Configuración del filtro.

En el centro del humedal, a 0.5 m de cada extremo y a lo largo de 1.0 m, se depositó grava fina de 9,52 mm de diámetro; en los extremos (50 cm) se relleno con grava gruesa de 25.4 mm.¹⁸ Se usó piedra lavada de río, este tipo de material no es calcáreo y elimina la conductividad. Se requería de un material que no interfiriera en el análisis de este parámetro.

6.1.4 Plantas utilizadas en el humedal.

En toda la extensión del humedal, cada 25 cm se plantaron *Phragmites australis*, ver figura 4. Se utilizaron estas macrofitas por su gran resistencia a las propiedades de las aguas residuales, así como por su capacidad para almacenar nutrientes, su adaptación a profundidades variables del agua y por su abundancia en humedales naturales del país¹⁸. Esta planta desarrolla un denso enlace de rizomas de altas profundidades, favoreciendo la transferencia de oxígeno. Su gran tamaño y superficie de hojas permite una mayor evapotranspiración del agua extraída del subsuelo, el lecho de raíces proporciona una vía o ruta hidráulica a través de la cual fluye el agua a tratar y permiten el desarrollo de una gran variedad de microorganismos dentro del sistema¹⁷. Al momento de la visita se encontró que estas tenían una altura aproximada de 3.0 m.



Figura 4. Imagen de las *Phragmites Australis* utilizadas en el humedal construido de flujo subsuperficial de Guarne.

Fuente: Registro original de la investigación

6.2 Caracterización del agua residual en el afluente y efluente del HCFSS

Los datos obtenidos de los 4 muestreos y las mediciones se relacionan en la Tabla 7. De igual manera, se relaciona en la tabla 9, el grado de cumplimiento del decreto 1594/84.

6.2.1 Primer Muestreo.

El día 24 de marzo, se realizó la primera medición *In Situ* de oxígeno disuelto (OD), Conductividad y pH. Asimismo, se tomaron muestras de agua para análisis en el laboratorio de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales (ST), Nitrógeno (N) y Fosforo total (P), y coliformes totales y fecales. Ese día se volvió a aforar el caudal y se tomó la temperatura del agua. Para los parámetros medidos con equipos, se tomaron 4 mediciones y se sacó un promedio (**Anexo 4**).

6.2.2 Segundo Muestreo.

El día 4 de mayo se realizó la segunda medición *In Situ* de oxígeno disuelto (OD), Conductividad y pH. Asimismo, se tomaron muestras de agua para análisis en el laboratorio de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales (ST), Nitrógeno (N) y Fosforo total (P), y coliformes totales y fecales. Ese día se volvió a aforar el caudal y se tomó la temperatura del agua. Para los parámetros medidos con equipos, se tomaron 4 mediciones y se sacó un promedio (**Anexo 5**).

6.2.3 Tercer Muestreo.

El día 19 de mayo se realizó la tercera medición *In Situ* de oxígeno disuelto (OD), Conductividad y pH. Asimismo, se tomaron muestras de agua para análisis en el laboratorio de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales (ST), Nitrógeno (N) y Fosforo total (P), y coliformes totales y fecales. Ese día se volvió a aforar el caudal y se tomó la temperatura del agua. Para los parámetros medidos con equipos, se tomaron 4 mediciones y se sacó un promedio (**Anexo 6**).

6.2.4 Cuarto Muestreo.

El día 16 de junio se realizó la cuarta medición *In Situ* de oxígeno disuelto (OD), Conductividad y pH. Asimismo, se tomaron muestras de agua para análisis en el laboratorio de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales (ST), Nitrógeno

(N) y Fosforo total (P), y coliformes totales y fecales. Ese día se volvió a aforar el caudal y se tomó la temperatura del agua. Para los parámetros medidos con equipos, se tomaron 4 mediciones y se sacó un promedio (**Anexo 7**).

Tabla 9. Resultados muestreo en agua residual. Guarne.

Resultados finales de los muestreos en Guarne											
Parámetro	Unidad de medida	Afluente					Efluente				
		Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio Afluente	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio Efluente
DBO5	mg DBO5/L	116	258	89	89	138,0	61	41	49	69	55,0
DQO	mg O2/L	310	307	304	307,122	307,1	168	61	201	213,3	143,5
OD	mg/L	1	0,417	0,967	1,085	0,9	2,16	0,942	1	1,867	1,6
SST	mg SST/L	129,1	74	72,1	41,8	79,3	29,2	13,1	39,1	<25	27,1
ST	mg/L	930	869,5	788	722	827,4	510	326	762	580	544,5
Coliformes Totales	NMP	170.000	920000	790.000	130000	2572500,0	260000	580000	1800000	560000	800000,0
Coliformes Fecales	NMP	170000	220000	490000	130000	252500,0	150000	20000	1800000	410000	595000,0
pH	Rango (1-14)	8,05	8	8	7,976	8,0	7,66	7	8	7,518	7,6
Temperatura	°C	16,6	22,24	19,5	18,46	19,2	17,14	20,55	19,15	19,61	19,1
Q	ml/s	5,35	5,85	2,25	11,37	6,2	3,14	7,05	3,69	8,93	5,7
N Total	mg N/L	307	291	329	243,187	292,6	171	113	288	257,693	207,6
P Total	mg P/L	25	24,9	25	22,087	23,8	14	9	25,289	23,087	17,8
Conductividad	µS/cm	*	3280	3335	2935	3183,3	*	1444,25	3152	2800	2465,4

Fuente: Tabla construida con la información de los resultados generados en los análisis de laboratorio y mediciones In situ.

* No se tienen registros de Conductividad para este muestreo.

6.3 Aplicación de la fórmula del ICA de los resultados obtenidos de la caracterización del agua residual del HCFSS.

Se hallaron los valores del ICA para el afluente y el efluente del HCFSS, los resultados se pueden encontrar en la tabla 11 y la tabla 12. Luego de haber obtenido el valor del ICA correspondiente del afluente y el efluente del HCFSS, se procedió a ubicar el valor de la Calidad Ambiental (CA) en la tabla 4 Función de Transformación, lo cual dio un valor de 0.12 para el afluente y de 0.26 para el efluente.

Lo anterior, de acuerdo a la Tabla 5, indica que la CA del afluente es inaceptable y para el efluente la CA es baja. En el numeral 6 de este trabajo se encuentra la discusión de los resultados de los parámetros estudiados en el agua residual del HCFSS.

6.4 Resultados de la Aplicación de la encuesta de percepción del HCFSS

El día 8 de abril, en la vereda el Zango, del municipio de Guarne, se aplicó la encuesta de percepción del humedal en la zona de influencia del humedal. Los datos están consignados en la base de datos (**Anexo 8**)

Se contactó con la comunidad, se les preguntó si estarían de acuerdo con responderla y en qué fecha y hora. Del total de encuestados, el 70.59% no reconoce un humedal construido en su entorno, el 23.53% cree que se puede tratar de un tanque de almacenamiento de agua. Un 11.76% indicó que es una ciénaga como el humedal en mención. Se hizo una breve explicación de lo que es un humedal artificial y sus funciones, se señaló el lugar donde está construido y se continuó con la encuesta. A la pregunta de la percepción de la presencia del humedal en el entorno, un 58.82% la indicó como buena.

Tabla 10. Resultados del HCFSS y su cumplimiento con el decreto

Cumplimiento del Decreto		
Parámetro de interés del decreto 1594/84	Límite	Cumple
pH	5 a 9 Unidades	SI
Temperatura	<40° C	SI
Sólidos Suspendidos Totales	Remoción 80% en carga	NO
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Remoción 80% en carga	NO
Coliformes Totales	<5000 NMP	NO
Coliformes Fecales	<1000 NMP	NO

Fuente: Datos tomados del Decreto 1594 de 1984.

Tabla 11. Índice de Calidad Ambiental agua residual en el afluente. Guarne.

ICA= $K \sum C_i \cdot P_i / \sum P_i$									K= 0,5						ICA Total Afluente
N°	Parametro	Pi	Valor muestreo 1	Ci	Ci*Pi	Valor muestreo 2	Ci	Ci*Pi	Valor muestreo 3	Ci	Ci*Pi	Valor muestreo 4	Ci	Ci*Pi	
1	pH	1	8.05	90	90	8.107	90	90	8.001	90	90	8	90	90	
2	Conductividad	4		0	0	3280	40	160	3335	40	160	2935	40	160	
3	Coliformes	3	170000	0	0	9200000	0	0	790000	0	0	13000	0	0	
4	N	3	307.44	0	0	291.130	0	0	328.720	0	0	273	0	0	
5	Temperatura	1	16.6	100	100	22.24	90	90	19.5	100	100	18	100	100	
6	Aspecto	1	Desagradable	30	30	Desagradable	30	30	Desagradable	30	30	Desagradable	30	30	
7	Solidos Disueltos	2	800,9	60	120	795.5	60	120	715.9	70	140	680,2	70	140	
8	P	1	24.508	60	60	24.977	60	60	24.820	60	60	22	60	60	
9	DBO ₅	3	116	0	0	258	0	0	89	0	0	89	0	0	
10	OD	4	1.065	10	40	0.417	0	0	0.967	10	40	1,085	10	40	
Total		23			440			550			620			620	
ICA en el afluente Por muestruos			9,565217391			11,95652174			13,47826087			13,47826087			12,11957

Fuente: Tabla Construida con los resultados de la ecuación del ICA para el afluente del Humedal Construido de Flujo subsuperficial.

Tabla 12. Índice de Calidad Ambiental agua residual en el efluente. Guarne.

ICA= $K \sum Ci \cdot Pi / \sum Pi$									K= 1						ICA Total Efluente
Nº	Parametro	Pi	Valor muestreo 1	Ci	Ci*Pi	Valor muestreo 2	Ci	Ci*Pi	Valor muestreo 3	Ci	Ci*Pi	Valor muestreo 4	Ci	Ci*Pi	
1	pH	1	7,66	90	90	7	90	90	8	90	90	8	90	90	
2	Conductividad	4	0	0	0	1444,25	70	280	0	0	0	2800	40	160	
3	Coliformes	3	260000	0	0	580000	0	0	1800000	0	0	410000	0	0	
4	N	3	171	0	0	113	0	0	288	0	0	258	0	0	
5	Temperatura	1	17,14	100	100	20,55	100	100	19	100	100	20	20	19,61	
6	Aspecto	1	Normal	50	50	Normal	50	50	Normal	50	50	Normal	50	50	
7	Solidos Disueltos	2	480,8	80	160	312,9	90	180	722,9	70	140	555	80	160	
8	P	1	14	70	70	9	70	70	25	60	60	23	60	60	
9	DBO ₅	3	61	0	0	41	0	0	49	0	0	69	0	0	
10	OD	4	2	20	80	0,942	10	40	1,372	10	40	1,867	20	80	
Total		23			550			810			480			619,61	
ICA en el efluente Por muestrros			23,91304348			35,2173913			20,86956522			26,93956522			26,7348913

Fuente: Tabla Construida con los resultados de la ecuación del ICA para el efluente del Humedal Construido de Flujo subsuperficial.

Cuando se indagó de las incomodidades proveniente por la presencia del humedal, el 35.29% indicó los malos olores como la única molestia, cabe resaltar, que la mayoría de los que asocian los malos olores al humedal es a los que lo reconocen en su entorno.

En cuanto a los beneficios, tenemos que los residentes consideran que la descontaminación de las corrientes de agua y el mejoramiento del paisajismo, es lo más importante. En cuanto a los beneficios para la vivienda, los encuestados coincidieron en que el tratamiento de las aguas residuales y la proliferación de mosquitos serían los beneficios más importantes.

A todos los encuestados les gustaría tener un humedal para tratar sus aguas residuales, y el 94.12% aceptaría capacitación para la construcción, manejo y mantenimiento del humedal, y el 76.47% estaría motivado a reusar el agua tratada. Ya que están convencidos, que se puede ahorrar agua potable. El otro 23.53% no está convencido de que la calidad del agua sea suficiente para darle un uso posterior al tratamiento.

6.5 Otros logros alcanzados durante la ejecución de este trabajo de investigación.

6.5.1 Equipos de laboratorio.

En el desarrollo de esta investigación se hizo la capacitación respectiva para el adecuado uso y mantenimiento de los siguientes equipos portátiles de laboratorio para medición *in situ* de algunos parámetros fisicoquímicos: Oxímetro, Conductímetro, pHmetro, y temperatura. Ésta capacitación fue impartida por la asesora comercial de la empresa Importechnical. Además, se replicaron los conocimientos adquiridos a otros estudiantes que realizarán trabajo de grado y requerían aprender a usarlos para sus respectivas investigaciones. **(Anexo 9)**

6.5.2 Finca la Selva de la Asociación Cristiana de Jóvenes (ACJ) (Unión, Antioquia).

Adicional al trabajo realizado en Guarne, se acordó con las directivas de la Fundación estudiar la posibilidad de construir un humedal en dicha finca. Se tomaron muestras para análisis de laboratorio y mediciones *in situ* para hacer el estudio de viabilidad entregado a la Fundación. **(Anexo 9, anexo 10, anexo 11 y anexo 12).**

Se hizo una recopilación fotográfica de la investigación en Guarne, incluyendo el trabajo realizado en la finca la Selva de la Unión y el trabajo desarrollado con las estudiantes de investigación, se pueden encontrar algunas de ellas en el anexo 9, sin embargo, el registro fotográfico completo se encuentra en un archivo en medio magnético.

7 Discusión de los resultados

7.1 Interpretación de los resultados de la caracterización del agua residual del HCFSS

Se hizo la comparación de los resultados de los parámetros estudiados con la norma 1594 de 1984: Usos del agua y residuos líquidos. Adicionalmente, se hizo el análisis con el Índice de Calidad Ambiental (ICA) con los parámetros que fueron posibles.

7.1.1 Caudal (Q).

El promedio al final del caudal en los muestreos fue de 6.20 ml/s en el afluente y de 5.70 ml/s en el efluente. Durante el desarrollo de esta investigación se comprobó que el caudal fluctúa de acuerdo al día y hora, ya que el lugar de donde provienen las aguas residuales no mantiene una población constante. La razón de su monitoreo es que el caudal se debe controlar para alimentar el humedal, para que la remoción sea lo más efectiva posible, es decir, sin el Q suficiente no se pueden garantizar las condiciones ideales para la sobrevivencia de las plantas y los microorganismos que degradan la materia orgánica y otros elementos contaminantes del agua residual.

7.1.2 Temperatura (°C) y pH.

Al final de los muestreos se observa que la temperatura promedio en el afluente fue de 19.2 °C y en el efluente de 19.11 °C, no se encontraron diferencias significativas, siendo baja la temperatura porque el lugar cuenta con un clima frío, se cumple con el requerimiento de una temperatura menor de 40°C según la norma. La temperatura incide en la actividad microbiana del proceso de tratamiento del agua residual. Igualmente, al tener una baja temperatura del agua, disminuye la solubilidad de las sales disueltas en ella, lo que conlleva a una disminución de la conductividad¹. (**Tabla 10**)

El promedio del valor del pH al final de los muestreos en el afluente fue de 8.0 y en el efluente fue de 7.6, la norma establece un rango de 5 a 9 unidades de pH para el vertimiento, el efluente del humedal cumple con este requisito de la norma. La ligera disminución del pH (del afluente al efluente) puede ser debido a la formación de ácidos orgánicos e inorgánicos, en éste último caso bicarbonato durante el proceso de biodegradación de los contaminantes. (**Tabla 10**).

7.1.3 Oxígeno Disuelto (OD).

Al final de los muestreos la cantidad, en promedio, de oxígeno disuelto en el afluente fue de 0.9 mg/l y en el efluente fue de 1.6 mg/l. Se notan valores bastante bajos, aún en el efluente del humedal. El Decreto no establece referencias en cuanto a éste parámetro si se pretende reusar para riego agrícola, sin embargo, sabiendo la concentración de oxígeno disuelto se puede hacer una idea de la calidad del agua en estudio. Según los resultados, la mayoría de los ST son sólidos disueltos (SD), tanto en el afluente como en el efluente, y para que se logre aumentar el OD en el tratamiento con el HCFSS se debe remover la mayor cantidad de SD. A esto se le debe sumar que los procesos aerobios que ocurren a lo largo del HCFSS consumen OD. Como éste parámetro está deficiente podría favorecer los procesos anaerobios.

7.1.4 Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

El promedio final de este parámetro fue de 3183.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el afluente y de 2483.08 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el efluente. El decreto no tiene un requerimiento específico para éste parámetro, sin embargo, se sabe que entre más alto sea el valor de la conductividad será más alta la contaminación, ya que la medida de conductividad da una idea de la cantidad de SD de un cuerpo de agua, siendo estas dos, directamente proporcionales²⁴. Se nota una reducción de la conductividad, por lo que se puede afirmar que se está presentando una remoción de SD, como se puede confirmar con los resultados de laboratorio.

Un agua relativamente pura o potable, es mal conductor de la electricidad debido a la baja cantidad de iones disueltos, por lo tanto, la conductividad disminuye al disminuir la cantidad de iones presentes en el agua. La temperatura también modifica éste valor, entre más bajo sea el valor de ésta, las sales se vuelven menos solubles en él, disminuyendo el valor de la conductividad¹.

7.1.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)

En el primer muestreo se observa que hubo una remoción del 47.41%; en el segundo estuvo el pico más alto con una remoción del 84.10%, para el tercero se encontró una remoción del 44.9% y, finalmente para el cuarto muestreo, se observó la remoción más baja de apenas un 22%. Estas fluctuaciones pueden ser debidas a las variaciones del Q de ingreso del agua al HCFSS, ya que a grandes caudales como en el cuarto muestreo, produce un ingreso alto de carga de contaminantes que hace que la población microbiana disminuya su actividad de degradación. En el artículo 72 se dictan las normas de vertimiento para las aguas

residuales a un cuerpo de agua, en el que para la DBO₅ debe haber una remoción del 80%.

(CO)DBO ₅ Kg/día=	Q * CV *	$\frac{1\text{Kg}}{1000000 \text{ mg}}$	*	$\frac{1\text{L}}{1000 \text{ ml}}$	*	$\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}}$
---------------------------------	----------	---	---	-------------------------------------	---	---

Para el vertimiento del pozo séptico al HCFSS se tiene:

B= (CO)DBO ₅ Kg/día=	6.2 ml/s	*	138 mg/L	*	$\frac{1\text{Kg}}{1000000 \text{ mg}}$	*	$\frac{1\text{L}}{1000 \text{ ml}}$	*	$\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}}$
(CO)DBO ₅ = 0.07392 Kg/Día									

Con el vertimiento del HCFSS a la quebrada la Mosca se tiene:

Para la carga en el vertimiento,

B= (CO) DBO ₅ Kg/día=	5.7 ml/s	*	55 mg/L	*	$\frac{1\text{Kg}}{1000000 \text{ mg}}$	*	$\frac{1\text{L}}{1000 \text{ ml}}$	*	$\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}}$
(CO) DBO ₅ = 0.00270 Kg/Día									

El HCFSS se encuentra construido en jurisdicción de Cornare, entidad que regula el manejo ambiental en la zona oriental del departamento de Antioquia, cuya entidad exige una remoción mínima del 95% de DBO₅ sin embargo, el decreto 1594 de 1984 establece que se debe calcular la Carga Máxima Permisible (CMP), con las fórmulas que se dan en el artículo 75. Cornare no tiene concentraciones de control para DBO₅, pero si Corantioquia²⁵ que aplicándolas el vertimiento del HCFSS se tiene **(Anexo 13)**:

A=	5,7 ml/s	*	300 mg/l	*	$\frac{1\text{Kg}}{1000000 \text{ mg}}$	*	$\frac{1\text{L}}{1000\text{ml}}$	*	$\frac{84600\text{s}}{1 \text{ día}}$
A= 0,14774Kg/día									

El decreto 1594 establece que la CMP es la menor de los valores entre A y B, por lo tanto, la CMP para DBO₅ es de 0.00270 Kg/día para éste humedal.

Para esta investigación se encontró que, en el resultado al final de los muestreos, el HCFSS remueve un promedio del 60% de DBO₅, de acuerdo a esto, no cumple con el requisito legal. (Tabla 10)

El HCFSS cuenta con una alta remoción de la materia orgánica, traducida en la capacidad que tiene los microorganismos para hacerlo. Sin embargo, al no alcanzar el requisito legal, indica que el HCFSS en sus condiciones actuales no es efectivo para el tratamiento del agua residual y, por lo tanto la calidad de su efluente, en términos de remoción de DBO_5 , no es suficiente para ser utilizada en riego agrícola.

Esto podría deberse a que las bacteria aerobias, que son las que degradan la DBO_5 eficazmente, consumen el poco OD del que disponen, y al acabarse, mueren. Dando así paso a una proliferación de bacterias anaerobias que son incapaces de hacer una buena degradación de la DBO_5 ²⁶.

7.1.6 Sólidos Suspendidos Totales (SST).

En el primer muestreo se observa que hubo una remoción del 77.3%; en el segundo hubo una remoción del 82.29%; para el tercero se encontró una remoción del 45.76% y, para el cuarto muestreo la remoción fue más baja, de 40.19%. Éste parámetro tiene un comportamiento similar a la DBO_5 , fluctúa de un muestreo a otro y no presenta un patrón. Lo cual es debido como ya se dijo, a la variación del Q, y el cual se debe controlar y garantizar que no sobrepase con el cual fue diseñado el HCFSS.

Se aplica la fórmula que brinda la norma para el vertimiento que hay del pozo séptico al HCFSS, lo cual arroja los siguientes resultados:

B= SST Kg/Día=	6.2ml/s	*	79.3 mg/L	*	$\frac{1Kg}{1000000 \text{ mg}}$	*	$\frac{1L}{1000 \text{ ml}}$	*	$\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}}$
SST: 0.004247 Kg/Día									

Luego se aplica al vertimiento del HCFSS a la quebrada la Mosca. Se obtiene lo siguiente:

B= SST Kg/Día =	5.7ml/s	*	27.1 mg/L	*	$\frac{1Kg}{1000000 \text{ mg}}$	*	$\frac{1L}{1000 \text{ ml}}$	*	$\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}}$
SST: 0.0013346 Kg / Día									

Al igual que el cálculo de CMP para DBO_5 , se utilizó para SST la facilitada por Corantioquia:

A=	5,7 ml/s	*	350mg/l	*	$\frac{1\text{Kg}}{1000000 \text{ mg}}$	*	$\frac{1\text{L}}{1000\text{ml}}$	*	$\frac{84600\text{s}}{1 \text{ día}}$
A= 0,172368 Kg/día									

El decreto 1594 establece que la CMP es la menor de los valores entre A y B, por lo tanto, La CMP para SST es de 0.0013346 Kg/día para éste humedal.

Se encontró que, al final del muestreo, el HCFSS remueve un 65.82% del total de los SST, y la norma requiere una remoción mínima del 80%. Por lo tanto, el HCFSS tampoco cumple con este requerimiento del Decreto en sus condiciones actuales.

El HCFSS sólo alcanza a hacer una remoción del 66% de los SST, lo que indica, al igual que con la DBO_5 la remoción se está haciendo de manera insuficiente. Cuando se diseña un humedal para una remoción específica de DBO_5 se espera una remoción comparable de SST, aquí se ve la relación de los dos parámetros.²⁷ (Tabla 10)

7.1.7 Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Los resultados por muestreos son los siguientes: para el primer muestreo, se encontró una remoción de 45%; en el segundo muestreo hubo una remoción del 80.14%; en el tercer muestreo se obtuvo una remoción del 34.57% y el resultado del último muestreo arrojó un total de 30.52% de remoción. El promedio obtenido al final de los muestreos es de 39.95% el decreto 1594/1984 no tiene consignado algún límite como tal para éste parámetro. Sin embargo, sabemos que éste parámetro es siempre más alto que la DBO_5 ya que es más la cantidad de materia orgánica que se puede oxidar por vía química. Al igual que con la remoción de la DBO_5 y SST, la fluctuación de a remoción de la DQO se debe a la Variación del Q.

7.1.8 Nitrógeno Total (N) y Fósforo total (P).

Estos dos compuestos son asimilados por las plantas y bacterias presentes en el proceso de tratamiento de las aguas residuales pues, al ser nutrientes esenciales son vitales para el crecimiento y reproducción de éstas.

Para el N encontramos una remoción promedio de 29.04% con un pico en el segundo muestreo de 61.15%, asimismo, la remoción más baja fue en el cuarto muestreo con un 5.67%.

La materia orgánica está compuesta del 40 al 60% de proteínas, y el N es esencial para la síntesis de éstas. Cuando la cantidad de oxígeno disponible es poca, las bacterias no alcanzan a degradar todo el N disponible; dentro del HCFSS ocurre que hay sólo una remoción de 85 mg N/l en promedio al final de los 4 muestreos, lo que demuestra que el nivel de OD, y el aumento del Q (por aumento de las cargas) está afectando la remoción del N.

Con el P se tuvo la más alta remoción del 63% en el segundo muestreo, también se obtuvo un valor negativo en el cuarto muestreo, de -1.6%, lo cual puede ser debido al aumento del Q en ese muestreo. Hay que tener en cuenta que los compuestos fosforados ayudan en la proliferación de algas nocivas, por lo que se vuelve importante la remoción del P en el tratamiento de aguas residuales.

7.1.9 Coliformes totales y fecales.

En las diferentes muestras fluctúa mucho en el Numero Más Probable (NMP) de coliformes fecales y totales, notándose un aumento considerable de éstas del afluente al efluente. Esto indica la necesidad de añadirle un proceso adicional de desinfección al agua tratada del humedal.

Es preocupante el comportamiento de los coliformes en el proceso de tratamiento del HCFSS, ya que es considerablemente alta la proliferación de éstas en el sistema, el del NMP de coliformes tuvo aumentos de 77.96% para los coliformes totales y de 95% para los coliformes fecales. Esto indica que el HCFSS en sus condiciones actuales está favoreciendo el aumento de éstos patógenos no permiten el reuso del agua tratada del HCFSS.

Uno de los objetivos de ésta investigación era analizar el efluente del HCFSS para usarse en riego agrícola que según el decreto 1594 de 1984 en su artículo 40 de las condiciones de calidad que debe cumplir el agua para su reuso en riego agrícola. Los coliformes totales no deberá exceder de 5.000 cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto; y el NMP de coliformes fecales no deberá exceder 1.000 cuando se use para el mismo fin anterior.¹⁵ Sin embargo, el HCFSS claramente no cumple con éste criterio.

Algo que puede explicar el aumento de los coliformes, es el OD. Cuando un sistema de tratamiento excede la capacidad depuradora que tienen los microorganismos en el agua, disminuye el OD, consecuentemente los coliformes que se sabe que son facultativas, en ausencia de O₂, empiezan procesos de degradación anaerobia permitiendo la proliferación de una cantidad de población microbiana incapaz de degradar la materia orgánica de manera eficiente.

Igualmente, los rayos UV son de gran utilidad al actuar como bactericidas²⁶, sin embargo, el humedal al ser de flujo subsuperficial y al contener una gran densidad de *Phragmites Australis*, muy poca cantidad de luz solar entra en contacto directamente con el agua del HCFSS.

La temperatura incide en el comportamiento de las bacterias que intervienen en el proceso biológico de descontaminación del agua. En verano, aumenta la depuración del agua por parte de éstas, lo contrario ocurre en invierno. Lo que podría explicar el porqué la degradación de la materia orgánica no es más elevada que la que se presenta (60% Remoción de la DBO₅)

7.2 Alternativas de mejoramiento para el HCFSS

Los parámetros de interés para el reúso del agua en riego agrícola son los SST, DBO₅ y DQO indicadores de la MO presente en el agua residual, lo cual es de mucha importancia en el tratamiento de agua residual para reúso. Sin embargo, para que el OD aumente se debe disminuir ostensiblemente los SD. Igualmente, como lo demuestran los resultados de los muestreos, el NMP de los Coliformes totales y fecales en el efluente, son elevados y esto indica la necesidad de agregarle un proceso de desinfección con el fin de mejorar la calidad del efluente que permita su reúso.

8 Conclusiones

El HCFSS no cumple con los requisitos necesarios para hacer uso de su efluente en riego agrícola, como se planteó en esta investigación, ya que no cumple con el número máximo de coliformes permitidos ni con la remoción mínima de DBO_5 y SST establecidos en el decreto 1594 de 1984. Aunque la remoción es buena, del 60% para DBO_5 y de 66% para SST, no es suficiente.

Con respecto a la Carga Máxima Permisible, Cornare tiene establecido una remoción mínima del 95% para SST y DBO_5 mayor que lo establecido en el decreto 1594 de 1984, y el HCFSS en sus condiciones actuales no está cumpliendo lo establecido por Cornare.

En caso de que el efluente del HCFSS cumpliera con los parámetros fisicoquímicos debería hacerse una desinfección para eliminar los patógenos presentes en el agua. Igualmente, el caudal del humedal es muy fluctuante, lo que perjudica la eficiencia del tratamiento en especial cuando se supera al Q de diseño del HCFSS.

El HCFSS cumple con los parámetros de temperatura y de pH, siendo los únicos parámetros que no presentan problemas con el requisito legal. La temperatura del agua tratada del humedal está por debajo de los 20°C , lo que da oportunidad a la supervivencia de las bacterias responsables en parte del proceso biológico de tratamiento secundario dentro de HCFSS.

Esta investigación fue a manera exploratoria, para tener alguna idea de lo que ocurría con la MO y los Coliformes dentro del humedal, por lo que se recomienda hacerle un seguimiento más extenso y minucioso al afluente y efluente del humedal con más cantidad de muestreos y que sean de tipo compuesto, para garantizar la exactitud en la información y tener más claro que está ocurriendo dentro del HCFSS.

En cuanto a la precepción de la comunidad del HCFSS, éste cuenta con poco reconocimiento dentro del entorno, y aquellos que lo identifican, no están seguros que es o cual es su función. Algunos asocian malos olores como provenientes del HCFSS, otros lo ven como un tanque de almacenamiento de agua. Aproximadamente el 95% de los encuestados aceptarían capacitación para la construcción, manejo y mantenimiento del humedal, pero aproximadamente el 77% estaría motivado a reusar el agua tratada.

Agradecimientos

A mi profesora, Ruth Marina Agudelo Cadavid, quien me introdujo a este maravilloso tema, siempre fue la guía en todo el desarrollo de mi investigación, y quien pacientemente aclaró mis dudas, profe, muchas gracias.

A la Fundación Aurelio Llano, por creer en esta investigación dando el respaldo económico que se requería.

A Mónica Lucía Jaramillo, su familia y la comunidad de la vereda el Zango, por abrirme las puertas y recibirme con su inmensa cordialidad;

A todos lo que de una u otra manera, fueron importantes para el desarrollo de ésta investigación.

Referencias Bibliográficas

1. Seoáñez M. Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales. España. Editorial Mundi Prensa. 1999.
2. Fraume N. ABC Ilustrado de Ecología y Medio Ambiente. Lugar de publicación. Avanza- Bogotá (Colombia) 2008.
- 3 . Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Bogotá. 2007.
4. Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales, humedales de flujo superficial. [Internet] Consultado: 2010/05/13. Disponible en: http://www.epa.gov/owm/mtb/cs_00_024.
- 5 . Rodríguez C. Humedales construidos, estado del arte I. [Internet] Consultado: 2010/05/24. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/ispjae/humedales1.pdf>
- 6 . Conesa V. Guía Metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Lugar de Publicación: Madrid (España). 1997.
7. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 3930 de 2010. Por medio de la cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9° 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.
8. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). La agricultura y la escasez del agua: enfoque programático de la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola. [Internet]. Consultado: 2010/05/13 Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd25/cultivos.pdf>
9. Reynolds, K. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica, identificación del problema. [Internet] Consultado: 2010/05/24. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/reynolds.pdf>

10 . Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial (WPS). Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades. [Internet]. Consultado 2010/10/ 20. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd32/biofil.pdf>

11 Agurrín F. Uso eficiente del agua. [Internet] consultado: 2010/10/22. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsair/e/repindex/rep48/uso/uso.html>

12. Llagas W, Gómez E, Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). FIGMMG. 2006; Vol. 15 (Nº17): 85 - 96.

13 Trujillo A. Tratamiento de aguas residuales en el trópico mediante lagunas de estabilización y su reuso para riego agrícola. Consultado: 2010/05/13 [Internet] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/i-193.pdf>

14. Lahora, A. Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: la EDAR de los gallardos (Almería). [Internet] Consultado: 2010/05/16. Disponible en: http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=2244838&orden=78643

15. Colombia. Ministerio de Agricultura. Decreto 1594 de 1984, junio 26, por el cual se reglamenta parcialmente el Título 1 de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la parte III - Libro I - del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a Usos del Agua y Residuos Líquidos. Bogotá. 1984

16. Suematsu, G. Parámetros de calidad para el uso de aguas residuales, guías de calidad de efluentes para la protección de la salud. [Internet] Consultado: 2010/05/13 Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aya2/tema04.pdf> .

17. Jaramillo M. Remoción del carbono orgánico disuelto en humedales piloto de flujo subsuperficial y superficial para el tratamiento de aguas residuales. [Administración en Salud: énfasis sanitario y ambiental] Medellín. Universidad de Antioquia. 2009

18. Agudelo R, Jaramillo M, Peñuela G, Aguirre N, Remoción del Carbono Orgánico Disuelto en Humedales Piloto de Flujos Subsuperficial y Superficial. Rev. Fac. Nac. Salud Pública. 2010; 28 (1): 21-28

-
19. Comunicación telefónica con Mónica Jaramillo Gallego. 24/05/2010.
20. Sitio oficial de Guarne en Antioquia, Colombia. [Internet]. Guarne. [Consultado: 2010/05/13] Disponible en: <http://www.guarne-antioquia.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=m1t2--&x=1560967>
21. Olivares V. Gestión sostenible de humedales. [Internet]. Consultado: 2010/05/13. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022009000100008&lang=pt
22. Frers C. el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. [Internet] Consultado 2010/07/30. Disponible en <http://www.produccion-animal.com.ar/sustentabilidad/71-humedales.pdf>
23. Sawyer C. McCarty P. Parkin G. Química para Ingeniería Ambiental. Cuarta edición. Bogotá. 2001.
24. Romero, J. Calidad del Agua. Segunda Edición. Bogotá 2002
25. Comunicación con Adriana Cifuentes, el día 03/10/2011 a las 10:30 am.
26. Marín R. Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. España. Editorial Díaz de Santos S. A.; 2003.
27. Lara A. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales [Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental] Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 1999.