

**ANÁLISIS DE LA REMOCIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES A TRAVÉS DE UN FILTRO
BIOLÓGICO PARA TRATAR EFLUENTES PROVENIENTES DE PROCESOS
PRODUCTIVOS AGROPECUARIOS DE GANADERÍA PORCINA.**

Presentado por:

**JHENNY KATHERINE HUETIO PASSOS
MAURICIO FERNANDO ORTIZ SARRIA**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES, ECONOMICAS Y ADMINISTRATIVAS
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
POPAYAN CAUCA
2016**

ANÁLISIS DE LA REMOCIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES A TRAVÉS DE UN FILTRO BIOLÓGICO PARA TRATAR EFLUENTES PROVENIENTES DE PROCESOS PRODUCTIVOS AGROPECUARIOS DE GANADERÍA PORCINA. ii

Presentado por:
JHENNY KATHERINE HUETIO PASSOS
MAURICIO FERNANDO ORTIZ SARRIA

Director de proyecto:
Carlos Arturo Granada Torres Ph.D (c)

UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES, ECONOMICAS Y ADMINISTRATIVAS
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
POPAYAN CAUCA
2016

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios por brindarme la oportunidad de vivir y guiar mis pasos.

A mi mejor amiga mi Mama Cecilia Passos que desde el cielo siempre me acompaña y por ser mi más grande inspiración.

A mi abuelito José Pazos por sus consejos y bendiciones que aún permanecen.

A mi Papa Esteban Cerón por todo su apoyo y sacrificio.

A mi Hermana Melissa Cerón por creer en mí siempre.

A mi Abuelita Ligia por sus buenos deseos y energía.

A Mis tíos: Jaime Pazos, Nhora Pazos, Alba Pazos, Julio Piamba, Elsy Ordoñez, y mis primas Jessica Pazos , Lady Solarte y Alexandra Solarte, por ser mi mejor equipo y mis compañeros inseparables.

A todos ellos este proyecto, que sin ellos, no hubiese podido ser.

Jhenny Katherine Huetio Passos

En primer lugar a Dios por guiar mi camino siempre y en todo momento; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia.

A mi Abuelita Hercilia por sus buenos deseos y oraciones.

A mi Madre Adielia Sarria por su apoyo incondicional, voces de aliento y ejemplo de vida.

A mi Padre Aldemar Álvarez por su apoyo y enseñanzas.

A mi Hermano Camilo Álvarez, por su ejemplo de superación y persistencia.

A mi Esposa Piedad Hoyos, por ser ese gran soporte, y compañera ideal.

A mi hija Isabela Ortiz, por ser la luz de mis días, mi felicidad y mayor orgullo.

Mauricio Fernando Ortiz Sarria

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este documento agradecen a:

A la Universidad de Manizales, Director de proyecto de grado Doctor. Carlos Arturo Granada Torres. Por su entrega, paciencia y apoyo durante todo el proceso.

Al Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Regional Cauca, Centro Agropecuario, por permitirnos desarrollar e instalar el proyecto de investigación.

A todos los profesores del programa Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible por instruirnos a lo largo de nuestra carrera.

A nuestra familia, por ser persistentes y creer en nuestros logros; Padres, Hijos, Hermanos y Amigos, por su apoyo.

A nuestros compañeros y a todas las personas que de una u otra manera nos acompañaron en todo el proceso académico.

The purpose of this study was to analyze pollution loads a biological filter with implantation of *Azolla Anabaena Pinnata*, which receives wastewater from agricultural production processes piggery on the farm the agricultural center of the National Learning Service SENA, in the municipality of Popayan, Cauca Department.

This work was developed at the level of field and laboratory characterization of the effluent twelve composite samples where made at time intervals of twenty minutes samples were taken for 6 hours in accordance with established protocol waters of IDEAM were made, samples were evaluated by determining physical and chemical parameters such as phosphorus, nitrogen, organic matter expressed as BOD5, COD and TSS, temperature, pH, conductivity, and dissolved oxygen and measurement of maximum and minimum daily flow.

The average results of the physical parameters were: pH ranged from 5.85 ± 1.88 ; sample temperature of 19.4 ± 1.285 ° C, and settleable solids 46.053 ml / L. Chemical parameters had the following average; Dissolved oxygen (DO) 1,967 mg / L, biochemical oxygen demand (BOD 5) 6,070 mg / L, chemical oxygen demand (COD) 41.739 mg / L.

Despite growing up in the pilot system, *Azolla* not adapted to the environment in the most appropriate way because the effluent did not present the requirements for optimal development (nutrients and environmental conditions), evaluating the removal percentages for the parameter BOD5 an average value of 33.3% indicating that the plant removes some contaminants in their process however is outside the provisions of the current environmental regulations was obtained.

Keywords: Wastewater Treatment Plant, Production Unit, Animal Feed, *Azolla Anabaena*, Physicochemical parameters, Evaluation, Quality, Biofiltro.

RESUMEN	12
INTRODUCCION	13
JUSTIFICACIÓN	15
OBJETIVOS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
1. REFERENTE TEÓRICO CONCEPTUAL	18
1.2 Fundamentación teórica	19
1.2.1 Parámetros importantes en el tratamiento de aguas residuales	19
1.2.2 Aguas residuales en porcicultura	21
1.2.3 Descripción de los parámetros de calidad	24
1.2.4 Biofiltración en sistemas agrícolas	25
1.3 Tipos de biofiltros	27
1.4 Sistemas de película biológica	28
1.5 Las Plantas Acuáticas	29
1.5.1 Azolla (<i>Azolla microphylla</i> L.)	29
1.6 Beneficios ambientales de la aplicación de los filtros de macrófitas en flotación para la depuración de aguas residuales.	33
1.6.1 MARCO LEGAL	34
2. DISEÑO METODOLOGICO DE LA INVESTIGACION	37
2.2 Tipo de Investigación	37
2.3 Hipótesis.	38
2.4 Área de estudio	38
3. Diseño Unidad de Análisis, o Población y Muestra.	40
3.2 Procedimiento	40
3.2.1 Fuentes y Técnicas para la recolección de Información	40
3.2.2 Parámetros de diseño del Biofiltro.....	41
3.3 Diseño y desarrollo del plan de muestreo	46
4. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE MUESTREO	49
4.2 Procesamiento y análisis de información.....	49
5. CARACTERIZACION DEL EFLUENTE	50
5.2 Resultados	51
5.2.1 Temperatura	56
5.2.2 Potencial de hidrógeno (pH).....	56
5.2.3 Oxígeno Disuelto (O.D).....	57
5.2.4 Fósforo Total (PT)	58
5.2.5 Correlación fosforo entrada y fosforo salida	59
5.2.6 Correlación nitrógeno total entrada y nitrógeno total salida.....	60
5.2.7 Correlación NH ₃ entrada y NH ₃ salida	61
5.2.8 Correlación DQO entrada y DQO salida	62
5.2.9 Correlación DBO ₅ entrada y DBO ₅ salida	63
5.2.10 Crecimiento de la biomasa de <i>Azolla</i> durante el periodo de evaluación del sistema.....	65
5.2.11 Contaminación vs crecimiento de biomasa.....	65
5.2.12 Eficiencias de remoción de DBO ₅	66

5.3	Prueba No Paramétrica (Kruscal,Wallis, <i>Fridman</i>).....	68
6.	CONCLUSIONES	70
7.	RECOMENDACIONES	71
	Listas de Referencias	72
	ANEXOS	78

Tabla 1. Características fisicoquímicas de aguas residuales porcinas	22
Tabla 2. Marco normativo colombiano.....	33
Tabla 3. Marco normativo Colombiano, subsector Porcícola recurso hídrico.....	34
Tabla 4. Dimensionamiento del sistema de tratamiento.....	41
Tabla 5. Dimensiones asumidas del tanque – Biofiltro.....	42
Tabla 6. Parámetros para la caracterización del efluente.....	45
Tabla 7. Protocolo de Muestreo.....	46
Tabla 8. Análisis Organoléptico.....	34
Tabla 9. Análisis químico, físico y microbiológico.....	34
Tabla 10. Parámetros del Biofiltro Granja Centro Agropecuario.....	35
Tabla 11. Resultado prueba no paramétrica Kruscal, Wallis, Fridman.....	46

Lista de figuras

ix

Figura 1. Biofiltro Modelo de Flujo Horizontal.....	17
Figura 2. Formación de película microbiana aerobia y anaerobia en el medio de soporte de un biofiltro..	18
Figura 3. Diseño Metodológico de la investigación.....	25
Figura 4. Imagen satelital o mapa geográfico con la ubicación. Adaptado PIGA – SENA 2014.....	26
Figura 5. Planta piloto (Diseño preliminar Biofiltro).....	28
Figura 6. Correlación fosforo entrada y fosforo salida.....	39
Figura 7. Correlación nitrógeno total entrada y nitrógeno total salida.....	40
Figura 8. Correlación NH ₃ entrada y NH ₃ salida.....	41
Figura 9. Correlación DQO entrada y DQO salida.....	42
Figura 10. Correlación DBO ₅ entrada y DBO ₅ salida.....	43
Figura 11. Diagrama de cajas para crecimiento de biomasa de Azolla.....	60

Lista de Gráficos

Grafico 1. Comportamiento temperatura entrada y salida del sistema.....	36
Grafico 2. Comportamiento Potencial de Hidrógeno entrada y salida del sistema.....	37
Grafico 3. Comportamiento Oxígeno Disuelto entrada y salida del sistema.....	38

Capítulo 1**INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO****Título:**

Análisis De La Remoción De Cargas Contaminantes A Través De Un Filtro Biológico Para Tratar Efluentes Proveniente De Procesos Productivos Agropecuarios de ganadería porcina.

Estudiantes:

Jhenny Katherine Huetio Passos.

Mauricio Fernando Ortiz Sarria

Director:

Doctor: Carlos Arturo Granada

Lugar de investigación:

Servicio Nacional de Aprendizaje Sena, Granja Centro Agropecuario

Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Universidad del Cauca y Laboratorio de Ciencias Básicas, SENA Cauca.

Duración del proyecto:

Seis meses – fase de campo (muestreos)

Tipo de proyecto:

Investigación Analítica y aplicada

Financiación:

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro Agropecuario, Regional Cauca.

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue analizar las cargas contaminantes de un filtro biológico con implantación de *Azolla Anabaena Pinnata*, que recibe aguas residuales provenientes de procesos productivos agropecuarios de ganadería porcina en la granja del centro agropecuario del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, en el Municipio de Popayán, Departamento del Cauca.

Este trabajo se desarrolló a nivel de campo y laboratorio, la caracterización del efluente se realizaron doce muestreos compuestos, donde se tomaron muestras compuestas a intervalos de tiempo de veinte minutos, durante 6 horas conforme a lo establecido con el protocolo de aguas del IDEAM, las muestras se evaluaron mediante la determinación de parámetros físicos y químicos como Fósforo, nitrógeno, materia orgánica expresada como DBO₅, DQO y SST, Temperatura, pH, conductividad, y oxígeno disuelto y la medición del caudal máximo y mínimo por día.

Los resultados promedios de los parámetros físicos fueron: pH, varió de 5,85 ±1,88; temperatura de la muestra de 19,4 ±1,285 °C, y sólidos sedimentables 46,053 ml/L. Los parámetros químicos tuvieron los siguientes promedio; oxígeno disuelto (OD) 1,967 mg/L, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) 6,070 mg/L, demanda química de oxígeno (DQO) 41,739 mg/L.

A pesar de haber crecido en el sistema piloto, *Azolla* no se adaptó al medio de la manera más adecuada debido a que el efluente no presentó los requerimientos necesarios para su óptimo desarrollo (nutrientes y condiciones ambientales), evaluando los porcentajes de remoción para el parámetro de DBO₅ se obtuvo un valor promedio de 33,3% lo que indica que la planta elimina algunos contaminantes en su proceso sin embargo se encuentra por fuera de lo establecido en la normatividad ambiental vigente.

Palabras Claves: Aguas Residuales, Planta De Tratamiento, Unidad Productiva, Porcicultura, *Azolla Anabaena*, Parámetros Físicoquímicos, Evaluación, Calidad, Biofiltro.

INTRODUCCION

En la actualidad la conservación de los recursos del ambiente es de gran preocupación ya que son la base de la sustentabilidad económica de los países. La destrucción de la base productiva de la naturaleza y la lucha por acceder a los recursos naturales (tierra, agua, bosques, etc.), son agudas y tienden a agravarse, provocando la extinción y disminución en las poblaciones de las especies silvestres de fauna y flora, debilitando el abastecimiento de materias primas necesarias para el mantenimiento de la población mundial. Es pues el gran desafío de la humanidad usar de una manera racional los recursos naturales disponibles; entre estos recursos el agua se destaca como el más importante porque es esencial para la vida en el planeta.

El crecimiento desordenado de las ciudades y la idea de que el agua es inagotable, han contribuido de manera firme a la degradación de la mayoría de los ríos y arroyos. El resultado de esa situación hace que se requieran acciones para volver a recuperar la calidad de las aguas. (De Oliveira, 2005) y darle a estas la vía adecuada para su utilización y posible re-utilización.

Por eso es de vital importancia la depuración de aguas residuales ya que es una necesidad imperiosa de la sociedad moderna debido al peligro que significan estas aguas. Sin embargo, en los países en vías de desarrollo los métodos convencionales para su tratamiento son impracticables, debido a sus altos costos de operación y mantenimiento, de aquí la necesidad de buscar métodos de bajo costo con los que pueda obtenerse algún subproducto.

Los sistemas de tratamiento acuáticos son una variante adecuada para la depuración de estas aguas, En ellos las plantas acuáticas funcionan como filtros biológicos removiendo sustancias tanto biodegradables como no biodegradables, nutrientes, sustancias tóxicas y microorganismos patógenos. Por otra parte las plantas cosechadas en los sistemas de tratamiento pueden ser utilizadas en la alimentación animal entre otras alternativas como es en el caso de Azolla. (Tchobanoglou, 1991; citado por Rodríguez et al., 2001).

Azolla es un helecho acuático con pequeñas hojas alternas, que vive en simbiosis con cianobacterias, las cuales fijan el nitrógeno atmosférico y poseen generalmente una alta concentración de nutrientes; este puede ser usado con alta eficacia para abastecer de nutrientes a los cultivos y mejorar los sustratos (Castro et al., 2006).

Este trabajo de grado evaluó el desempeño de *Azolla Pinnata* plantada sobre Biofiltro tipo Humedal como sistema de tratamiento de efluentes del procesos agropecuarios como es en el ganado porcino, se observó su proceso de crecimiento, capacidad de fijación y su evolución teniendo en cuenta parámetros como DBO5, DQO, sólidos suspendidos, fosfatos, nitratos, pH, turbiedad, temperatura y conductividad; a escala piloto en la Granja del Centro Agropecuario del Servicio Nacional de Aprendizaje

SENA

(Popayán).

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la escasez del agua hace que cada vez más sea necesario ahorrar este recurso. Muchas industrias están intentando re emplear el efluente de los sistemas del tratamiento, entre los procesos de tratamiento las plantas acuáticas, humedales y biofiltros aparecen como la alternativa para poder reusar el efluente mejorando la calidad de estos. (Cassiano, 2005).

El uso de filtros biológicos como tratamiento de aguas del sector agropecuario en América se encuentra en fase de investigación, además algunos trabajos en Brasil y Colombia, señalan que existe gran potencial para diferentes actividades agrícolas así como para comida en animales. (Navas et al., 2000).

La disposición inadecuada de las aguas residuales generadas por la producción de porcicultura, han logrado diariamente la alteración y modificación de las características fisicoquímicas y microbiológicas en los cuerpos receptores de las aguas, ya que en el transcurso y ejecución de sus actividades para; el crío, cuidado y comercialización de los cerdos, realizan diferentes procedimientos que permiten lograr el éxito y los propósitos para su producción, debido a estas actividades se generan una serie de aspectos ambientales, uno de ellos es la generación de los vertimientos líquidos los cuales presentan características contaminantes que nos permite analizar parámetros como ; el color, olor, turbiedad, conductividad, PH, DQO,DBO, coliformes totales, entre otros.

La producción de porcicultura tiene el propósito de cambiar y corregir actividades que puedan alterar y contaminar las condiciones de los recursos naturales y la salud humana, uno de ellos es el recurso agua ya que no cuenta con los controles pertinentes de las aguas que se vierten a los cauces. Para ello, se han diseñado sistemas de tratamiento de aguas residuales que permitan minimizar y controlar las cargas contaminantes que se generan. La implementación de estos tratamientos logra remover parte de las cargas contaminantes y cumplir los propósitos de las autoridades ambientales y la legislación ambiental vigente.

Una de las alternativas para el control y manejo de las aguas residuales de la producción agropecuario, es la elaboración y ejecución de tecnologías ambientales que permitan un desarrollo sustentable para el ambiente como lo es el BIOFILTRO, el cual han demostrado ser una tecnología

apropiada para el tratamientos de estos vertimientos y garantizar una eficiencia en la remoción de la materia orgánica generada.

Esta tecnología se implementó a una unidad productiva del Centro Agropecuario SENA, los cuales tienen el objetivo de contribuir a las buenas prácticas ambientales para cumplimiento de la política y los programas ambientales que se ejecutan para la prevención, mitigación y la mejora continua de la institución. Las evaluaciones se basaron en los resultados de análisis físico- químicos del efluente buscando optimizar de esta manera el recurso del efluente de la Granja.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la remoción de cargas contaminantes a través de un filtro biológico para tratar efluentes provenientes de procesos productivos agropecuarios de ganadería porcina.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes como, Fósforo y nitrógeno, materia orgánica expresada como DBO₅, DQO y SST en un biofiltro.
- Valorar el comportamiento del sistema de tratamiento, mediante la medición de parámetros físico químicos como Fósforo, nitrógeno, materia orgánica expresada como DBO₅, DQO y SST, Temperatura, pH, conductividad, y oxígeno disuelto.
- Evaluar el crecimiento y adaptabilidad de *Azolla A. Pinnata*, en un biofiltro destinado al tratamiento de efluentes de procesos productivos.

1. REFERENTE TEÓRICO CONCEPTUAL

En América Latina, sólo el 13.7% de las aguas residuales recolectadas son tratadas en sistemas de tratamiento antes de descargarse en los ambientes acuáticos o usarse en riego agrícola. Además de perjudicar la salud de la población, este hecho impide reutilizar el recurso hídrico.

La situación descrita se torna mucho más crítica en las pequeñas ciudades y comunidades rurales concentradas, donde la agricultura es una de las actividades tradicionales y las aguas residuales sin tratamiento son utilizadas para fines de riego. A ello hay que agregar que los remanentes son conducidos a los ríos más próximos, lo que ocasiona la contaminación los recursos hídricos más cercanos esto unido a los altos índices de enfermedades diarreicas en estas zonas son consecuencia de este problema.

Sin embargo, además de la promoción de prácticas de higiene para el uso adecuado de las aguas residuales, existen tecnologías alternativas de bajo costo para su tratamiento que pueden ser adoptadas y manejadas por los pequeños municipios u organizaciones de usuarios, como es el caso del biofiltro y humedales artificiales.

Platzer (2002), investigo la aplicación de la tecnología de Biofiltro para el tratamiento de las aguas residuales domésticas donde construyó el primer sistema de Biofiltro a escala piloto en la ciudad de Masaya con el objetivo de investigar la viabilidad técnica y económica de la aplicación de esta tecnología en las regiones tropicales de Centro América. Este sistema ha sido monitoreado cuidadosamente, lo cual ha proporcionado una amplia base de datos que ayudará en el diseño, operación y mantenimiento de futuros sistemas de tratamiento de este tipo y su aplicación en otros sitios. Al mismo tiempo se desarrolló un programa de investigación sobre la calidad microbiológica de productos agrícolas irrigados con el efluente del Biofiltro. Los resultados obtenidos hasta el momento indican que esta tecnología constituye una alternativa más efectiva y menos costosa que otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales aplicadas, permitiendo además el reuso de aguas residuales tratadas en el riego agrícola.

La utilización de Biofiltros de flujo horizontal (BFH) para el tratamiento de aguas residuales domésticas ha proporcionado excelentes resultados respecto a la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos, además de constituir la alternativa de tratamiento entre las tecnologías que actualmente se utilizan en el país que proporciona los mejores resultados en la remoción de patógenos y de nutrientes. Sin embargo, los resultados obtenidos en una planta piloto construida en

la ciudad de Masaya en el año de 1996 muestran que la remoción de nitrógeno y fósforo es baja, alrededor de 40% y 20% respectivamente. Ensayos realizados a pequeña escala con un Biofiltro de flujo vertical (BFV) mostraron que este tipo de Biofiltros es eficiente para nitrificar a altos niveles cuando se alimenta de forma intermitente debido al eficiente mecanismo de aireación. Por otro lado, debido a la existencia de una mayor proporción de zonas anóxicas en el lecho filtrante, un BFH es eficiente en el proceso de desnitrificación. En base a estos antecedentes, se construyó un BFV en serie con un BFH con el propósito de lograr una mayor remoción de nitrógeno mediante el aumento del mecanismo de nitrificación-desnitrificación, esperando también que la remoción de fósforo se incrementara debido a la adsorción adicional proporcionada por el lecho filtrante del BFV.

Se han efectuado ensayos alimentando el sistema de forma continua y de forma intermitente, con intervalos de alimentación de 1, 2 y 3 horas. Los resultados mostraron que la remoción de amonio aumenta en la medida en que aumenta el intervalo entre descargas cuando se utiliza alimentación intermitente, alcanzando valores superiores al 80% y concentraciones menores que 5 mg/L en el efluente, mientras que la remoción de fósforo total aumentó de 20% obtenido en un BFH individual a 52% proporcionado por la combinación BFV-BFH.

1.2 Fundamentación teórica

De acuerdo a Metecalf y Eddy (1995) “Las aguas residuales o residuales líquidos, son esencialmente aquellas aguas de abastecimientos cuya calidad se ha deteriorado por diferentes usos. Se pueden definir como la combinación de agua y residuos, procedentes de las viviendas, instituciones públicas y establecimientos industriales, agropecuarios y comerciales, a los que pueden agregarse, de manera eventual, determinados volúmenes de aguas subterráneas, superficiales y pluviales”

1.2.1 Parámetros importantes en el tratamiento de aguas residuales

1.2.1.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. En condiciones normales de laboratorio, esta demanda se cuantifica a 20 °C, el ensayo estándar se realiza a cinco días de incubación y se conoce convencionalmente como DBO, con valores numéricos expresados en mg/L O₂ (Romero, 2004).

La DBO es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del

agua, para diseñar unidades de tratamiento biológico, para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras (Romero, 2004). La mayor parte de las aguas usadas para acueductos contiene DBO estándar menor de 7 mg/L. Es un parámetro necesario en la evaluación de aguas residuales, de los procesos de tratamiento y de los efectos de contaminación. No se usa como parámetro de control en aguas potables (Romero, 2002).

1.2.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno se usa para medir el oxígeno equivalente para oxidar la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura. Para la oxidación de ciertos compuestos orgánicos resistentes se requiere la ayuda de un catalizador como el sulfato de plata (Romero, 2002).

1.2.1.3 Nitrógeno

Nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Las formas de interés en aguas residuales son las de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y nitratos. Todas son formas interconvertibles bioquímicamente y componentes del ciclo del nitrógeno. Se denomina NTK nitrógeno total Kjeldhal, al nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal. Los datos del nitrógeno son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos; un agua residual insuficiente de nitrógeno puede requerir la adición de nitrógeno para su adecuada descomposición. En otros casos, cuando se exige control de eutrofización de las fuentes receptoras, la remoción de nitrógeno en el agua residual, puede ser una condición del tratamiento (Romero, 2004).

La forma predominante del nitrógeno en aguas residuales domésticas frescas es el nitrógeno orgánico; las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y, si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos. El predominio de nitratos indica que el residuo se ha estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno. Los nitratos, sin embargo pueden ser utilizados por las algas y otros organismos acuáticos para formar proteínas y, por ello, puede necesitarse la remoción del nitrógeno para prevenir dichos crecimientos. En los intestinos humanos, el nitrato es reducido a nitrito, adsorbido por el torrente sanguíneo y causante de la meta hemoglobinemia infantil o de la formación de nitrosaminas, las cuales son cancerígenas.

Se considera nitrógeno amoniacal todo el nitrógeno existente en solución como amoníaco o como ion amonio, dependiendo del pH de la solución.

En aguas residuales tratadas la concentración de nitratos puede ser del orden de 30 mg/LN. La presencia de nitrógeno amoniacal en exceso de 1.600 mg/L es considerada inhibitoria para muchos microorganismos existentes en el proceso de lodos activados (Romero, 2004).

1.2.1.4 pH

Medida de la concentración de ion hidrógeno en el agua, expresada como el logaritmo negativo de la concentración molar del ion hidrógeno. Aguas residuales en concentraciones adversas del ion hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras y eventualmente son fatales para los microorganismos. Aguas con pH menor de seis, en tratamiento biológico favorecen el crecimiento de hongos sobre las bacterias. A pH bajo el poder bactericida del cloro es mayor, porque predomina el HOCl; a pH alto la forma predominante del nitrógeno amoniacal es la forma gaseosa no iónica (NH₃), la cual es toxica, pero también removible mediante arrastre con aire, especialmente a pH de 10,5 a 11,5. El valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6,5 a 8,5.

Para descarga de efluentes de tratamiento secundario se estipula un pH de 6,0 a 9,0; para procesos biológicos de nitrificación se recomiendan valores de pH de 7,2 a 9,0 y para desnitrificación de 6,5 a 7,5 (Romero, 2004).

1.2.2 Aguas residuales en porcicultura

Aguas Residuales de Cerdos: “Se define como el líquido formado por las orinas de los animales y lo que rezuma del estiércol. También se le define como la mezcla de excretas en conjunto con el agua con que se lavan los planteles donde se crían los cerdos, se caracterizan por su alta carga de nutrientes, y porque pueden llegar a ocasionar problemas ambientales tales como la eutrofización en masas de agua existentes, problemas de saturación de suelos, lo que dificulta el crecimiento e incluso la supervivencia de algunas especies, generan emisiones de gases causantes del efecto invernadero y cuya descarga a cursos de agua naturales exceden los límites de la normativa vigente en el país”. (López., 2009)

Análisis fisicoquímico: Según Navas y Arciniegas (2008, p. 32), “con el análisis Fisicoquímico, se puede conocer las características básicas de algún producto, tales como el PH, la acidez, los sólidos, la viscosidad, los cloruros, el almidón, la fibra, la proteína, la grasa, la humedad y los carbohidratos; información que puede servirle como “Indicador de Calidad” y/o parámetro de medición para una producción estandarizada, y que le será útil, además, para complementar la ficha técnica del producto”.

Biorremediación: Atlas y Unterman (1999, p. 73) afirman que, “la biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (fundamentalmente bacterias, pero también hongos y levaduras) y plantas para transformar contaminantes orgánicos en

compuestos más simples poco o nada contaminantes, y, por tanto, se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas. Su ámbito de aplicabilidad es muy amplio, pudiendo considerarse como objeto cada uno de los estados de la materia”

De acuerdo a Valencia, E ; et al.(2009). La contaminación producida por una explotación porcina puede variar de acuerdo al estado fisiológico de los animales y al tipo de alimentación utilizada. El grado en que esta contaminación afecta a las fuentes de agua, depende de la cantidad de agua usada, de si se hace separación de sólidos o no y del manejo dado a los residuos. La contaminación promedio producida por día en una explotación porcina para 100 kg de peso vivo, es 0.25 kg de DBO, 0,75 kg de DQO, 0.60 kg de SST, 0.75 kg de ST y 0.045 kg de N. (Chara, 1998).

Tabla 1. Características fisicoquímicas de aguas residuales porcinas

Parámetro	Unidad	Valor
pH	unidades	6 – 8
DBO	mg / L	8000 - 50000
DQO	mg / L	10000 - 200000
ST	mg / L	1200 – 5000
SV	mg / L	500 – 5000
N total	mg / L	1500 – 5000
P	mg / L	1000 – 3000
K	mg / L	1000 – 3000
Densidad estiércol	g /cm ³	1.01 – 1.03

Fuente:Valencia, E ; et al.(2009)

El problema de la disposición sanitaria de los desechos porcícolas es de una gran magnitud por la gran cantidad que de estos se produce debido a que dos tercios de los alimentos suministrados a los cerdos se convierten en desechos (Magaña.1995).

Estudios realizados para el tratamiento de efluentes porcícolas como el de Chao (2008) reportan un 71 % de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) para un biodigestor operando con TRH de 15.9 días y una temperatura ambiente promedio de 24.7 °C. Mejía (1986) reporta un 90 % de remoción de materia orgánica en un reactor anaerobio de flujo ascendente de laboratorio operando con TRH de dos días. Cordero (2010) al evaluar dos sistemas de tratamiento para el tratamiento de efluentes porcícolas.(Escalate. 2010)

Según Minambiente (2006) los diferentes sistemas existentes para el tratamiento de aguas residuales, son eficaces ante cualquier vertido con productos orgánicos, siendo más o menos sensibles ante la presencia de productos fitotóxicos o nocivos para la fauna dulce acuícola.

Vertidos que se pueden tratar con humedales:

- Aguas de minas metálicas.
- Aguas de minas de carbón.
- Pluviales contaminadas con productos fitotóxicos o muy diluidos
- Aguas de industrias del metal que no generen productos directamente fitotóxicos.
- Aguas de industrias agroalimentarias con fuerte carga orgánica.
- Aguas de industrias o de actividades ganaderas:
 - Granjas.
 - Mataderos.
 - Lácteas
 - Aguas procedentes de tratamientos primarios
 - Aguas procedentes de tratamientos secundarios
 - Aguas de industrias peleteras (tenerías, etc.).
 - Aguas de industrias conserveras.
 - Aguas residuales de piscicultura
 - Aguas de industrias de los hidrocarburos (petroquímicas).
 - Aguas residuales de industrias papeleras.
 - Lixiviados de vertedero (relleno sanitario).
 - Aguas residuales urbanas.
 - Aguas residuales de refinerías de petróleo.
 - Aguas residuales de laboratorios químicos.
 - Aguas residuales de industrias azucareras.

De acuerdo al trabajo investigación de Macol, K. et al (2015), encontró que Chará (2007), asegura que tanto el drenaje directo del estiércol de cerdos hacia las aguas superficiales como la filtración desde suelos saturados afectan la calidad del agua, esto debido a que los nitratos se filtran hacia las aguas subterráneas por lo cual se generan peligros para la salud humana. No obstante Arias et al., (2010), asegura que la producción porcícola en Colombia genera en el desarrollo de sus actividades diversos problemas y el tratamiento de las aguas residuales provenientes de esta actividad es uno de ellos, pues su mal manejo produce el deterioro de los suelos cuando son regados con estas causando

con ello la contaminación de aguas subterráneas y superficiales por escorrentía. Además afirman que la carga orgánica presente en estas aguas, origina una variación en las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo y del agua, lo cual suscita un desequilibrio ecológico que difícilmente se puede remediar en el corto plazo. Otro de los impactos ambientales es generado por los malos olores que de ellas y de los campos regados se desprenden como producto de la descomposición de las excretas porcinas. Por esta razón se hace necesario contar con un sistema de tratamiento factible de construir en zonas rurales que permita la remoción de contaminantes y a su vez cumplir con la legislación ambiental sobre vertimientos líquidos.

Androvetto (2003) afirma En las granjas porcinas generalmente no se aprovechan los recursos disponibles en las fincas de los pequeños y medianos productores. La producción de cerdos incluye: el encierro; el programa de alimentación; algunos aspectos de manejo y el sistema de tratamiento de las aguas residuales.

La producción de cerdos se caracteriza por tener: a. Un encierro que facilita la alimentación del animal, su manejo y su salida oportuna al mercado b. Una alimentación controlada y compuesta por una porción mínima de concentrado y una alimentación de cuidado, formada por productos y subproductos agropecuarios. Un manejo de los animales dentro del módulo que permite sacar los cerdos al mercado de 6 a 7 meses de edad, incluyendo dentro de ese manejo, sus cuidados sanitarios.

1.2.3 Descripción de los parámetros de calidad (Recalde. 2006)

1.2.3.1 Propiedades Físicas

La calidad de aguas está dada por una serie de variables físicas, tales como los sólidos, temperatura, turbidez, color y olor que ésta posea. Estas variables interactúan entre si y determinan las propiedades químicas y viceversa. la mayoría de las propiedades químicas están dadas por el contenido de sólidos en el agua, estén éstas disueltas, suspendidas o precipitadas en el fondo de las masas de aguas.

La temperatura cumple un papel muy importante en la calidad de aguas, ya que inciden en la fauna y la flora del medio, así como sobre la velocidad en que se desarrollen las distintas reacciones químicas), la solubilidad del oxígeno se ve afectada por la variación de la temperatura, pudiendo el agua aumentar la solubilidad de oxígeno en un 40 % al bajar la temperatura de 25 °C a 0 °C, debido a que en el agua fría, las moléculas retienen en sus estructuras, mayor cantidad de oxígeno.

1.2.3.1 Propiedades Químicas

El oxígeno disuelto es utilizado por la fauna y flora acuática, tanto en su metabolismo como en la descomposición de materiales orgánicos y desarrollo de reacciones. Las altas demandas bioquímicas de oxígeno (cantidad de oxígeno disuelto consumido por los microorganismos, DBO) y demanda química de oxígeno (cantidad de oxígeno necesario para oxidar las sustancias orgánicas del agua, DQO) no solo conlleva a la generación de problemas de malos olores, sino también a la pérdida de las vidas presentes en el medio. Las plantas y las algas toman los nitratos durante la síntesis de proteínas para la formación de tejidos. Cuando estos organismos mueren, éstas se descomponen primero en amonio, seguidamente a nitritos y finalmente a nitratos. Así, las altas concentraciones de amonio y nitritos en las masas de aguas son evidencias de contaminación

Así mismo, el fósforo interviene activamente en la formación de las estructuras de organismos, en forma de ácidos nucleicos y moléculas de ATP. Con tan solo miligramos de concentraciones de fósforo, es suficiente para disparar el crecimiento del fitoplancton del medio, los cuales reducen el oxígeno del medio y modifican el ecosistema.

La capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica y la cantidad de sales disueltas en el agua, impactan considerablemente la calidad de uso del agua. Éstos pueden provocar problemas de adaptación de organismos que habitan el sistema acuático, debido no solo al déficit de oxígeno al que se halla ligado al segundo factor, sino también por sus mecanismos de osmoregulación.

El pH del agua influye directamente en los organismos presentes en el agua, así como también en el desarrollo de reacciones químicas y disponibilidad de nutrientes.

1.2.4 Biofiltración en sistemas agrícolas

Los sistemas agrícolas son unos de los grandes productores de aguas residuales en el país. Con la intensificación de la agricultura, se ha venido aumentando el aporte de insumos externos en dichas explotaciones, dando lugar a distintas formas de impureza del agua. Entre ellas puede nombrar: las impurezas físicas (disueltas y por suspensión), químicas (orgánicas e inorgánicas) y biológicas (plantas, animales y protistas) (Kiely 2003).

La contaminación orgánica se produce por el vertido de grandes cantidades de materia orgánica a los cauces de aguas. La descomposición de ésta reduce los niveles de oxígeno disuelto en el agua y liberan grandes cantidades de nitratos y fosfatos. Esto produce la multiplicación de bacterias anaeróbicas que reducen la materia orgánica, cuyos productos son tóxicos para otros organismos (Kiely 2003).

Los primeros diseños de procesos y plantas de tratamiento se basaban en el empleo secuencial de métodos físicos y químicos, removiendo gran parte de los contaminantes de las aguas residuales. Estas tecnologías de descontaminación fisicoquímica son muy costosas y requieren de infraestructura muy especial para realizarse. Muchas veces no es factible realizarlos por la elevada inversión requerida (Fontúrbel e Ibáñez 2004).

Los primeros reportes del uso de los sistemas de biofiltración datan de 1923 y se utilizaron para remover el azufre (H_2S) proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales. Los primeros biofiltros fueron sistemas abiertos en los que se empleaba suelo poroso como soporte. Se hacían huecos en el suelo y se colocaba un sistema de tubos perforados en la base que dejaban pasar aire a través del suelo. Para ciertas aplicaciones, aún se siguen utilizando variantes de este diseño. La primera patente de esta tecnología se registró en 1934, para el tratamiento de compuestos olorosos. A partir de 1950 se publican los fundamentos de la tecnología de la biofiltración y se difunde en los Estados Unidos de América y Alemania occidental. En esta década, se instalan biofiltros de tierra para el tratamiento de olores en California, E.U.A. y en Nuremberg, Alemania (Leson y Winer 1991).

En la década de 1970, los nuevos diseños de biofiltros permitieron mayores cargas de olores y compuestos volátiles. Estos diseños se desarrollaron principalmente en Alemania y en los Países Bajos. Los sistemas seguían siendo abiertos pero con una modificación en la distribución del aire para evitar el taponamiento y se utilizaron nuevos materiales de empaque, tales como mezclas de compostas y trozos de madera. En los años 80 se desarrollaron sistemas cerrados, algunos con sistemas de control computarizados y empleando medios filtrantes inorgánicos novedosos, tales como el carbón activado granular, el poliestireno y las cerámicas. A mediados de esa década se publican también diferentes modelos matemáticos que permiten optimizar y comprender mejor los sistemas de biofiltración (Ottengraff *et Al* . 1986).

La evolución de los diseños de los biofiltros ha permitido el tratamiento de mayores cargas de contaminantes. Ejemplo de ello son los biofiltros que se han instalado en Alemania y en los Países Bajos. La optimización de los bioreactores también ha sido posible mediante el estudio de diversos materiales filtrantes que proporcionan el medio adecuado para el desarrollo de los microorganismos y entre los que se encuentran materiales orgánicos (como compostas, turbas y suelos contaminados) o bien materiales sintéticos (carbón activado granular, poliestireno y cerámicas). En los últimos años, las investigaciones se han enfocado a la creación de sistemas con mejor control de los

procesos, al estudio de las cinéticas de degradación de los compuestos recalcitrantes o bien al estudio de modelos matemáticos que permiten optimizar y comprender mejor los sistemas de biofiltración.

Existen actualmente numerosas aplicaciones a nivel industrial de la biofiltración para una gran variedad de aplicaciones, como es el caso de los Estados Unidos de América, Canadá, Alemania, Holanda, Italia, Nueva Zelanda, Dinamarca, Australia, Inglaterra, Colombia y México (Devinny et al . 1999, Leson y Winer 1991, Revah y Hugler 1998).

1.3 Tipos de biofiltros

Un biofiltro es un humedal artificial de flujo subterráneo, sembrado con plantas de pantano en la superficie del lecho filtrante, por donde las aguas residuales pretratadas fluyen en forma horizontal o vertical. El presente documento se enfoca en los biofiltros de flujo horizontal.

Un biofiltro de flujo horizontal consta de pilas rectangulares con profundidades que oscilan entre 60 y 100 cm, con un relleno de material grueso (5 a 10 cm de diámetro) en las zonas de distribución (entrada) y recolección (salida). La fracción principal del lecho filtrante, ubicada entre las zonas de material grueso, es homogénea y más fina, normalmente de 0.5 a 15 mm de diámetro, tal como se muestra en la Figura 1.

En este tipo de biofiltro, las aguas residuales pretratadas fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, con una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta llegar a la zona de recolección del efluente. Durante este recorrido, que dura de tres a cinco días, el agua residual entra en contacto con zonas aeróbicas (con presencia de oxígeno) y anaeróbicas (sin presencia de oxígeno), ubicadas las primeras

Alrededor de las raíces de las plantas, y las segundas en las áreas lejanas a las raíces.

Durante su paso a través de las diferentes zonas del lecho filtrante, el agua residual es depurada por la acción de microorganismos que se adhieren a la superficie del lecho y por otros procesos físicos tales como la filtración y la sedimentación.

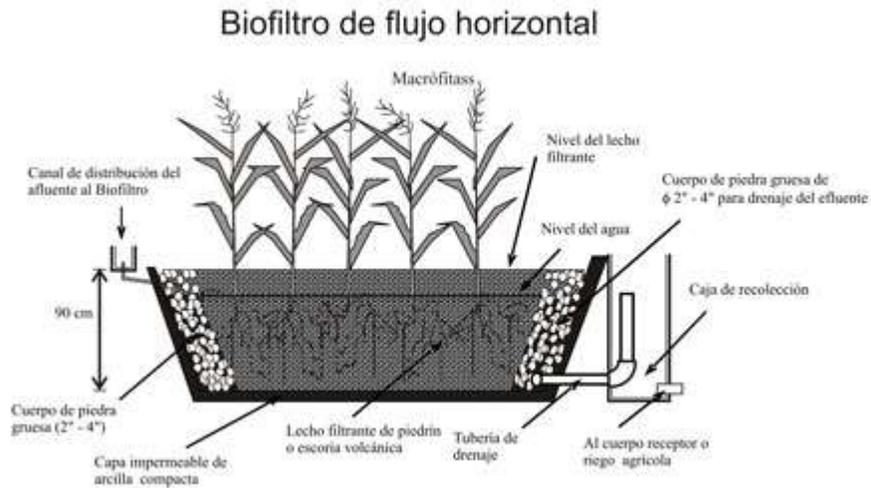


Figura 2. Biofiltro Modelo de Flujo Horizontal.

1.4 Sistemas de película biológica

El tratamiento de aguas residuales se puede efectuar en reactores de película biológica, poniendo en contacto dichas aguas con una población microbiana mixta, en forma de una película biológica adherida a la superficie de un medio sólido de soporte. En cualquier superficie en contacto con microorganismos donde se tengan los nutrientes necesarios, se desarrolla una capa biológicamente activa y en consecuencia, las películas biológicas adheridas constituyen una característica de todo tipo de reactor biológico.

Los sistemas de películas adheridas se pueden considerar de dos tipos diferentes: sistemas estacionarios de película de medio fijo, y sistemas de película de medio en movimiento. En ambos tipos de sistemas, el agua residual se mueve en relación con la película microbiana y el soporte sólido al que está adherida. En el primer caso, el agua residual pasa sobre el medio estacionario y en el segundo caso, el medio se mueve a través del líquido. Los reactores de película biológica en medio fijo han estado en uso desde hace mucho tiempo para el tratamiento de las aguas residuales, pero los sistemas de medio en movimiento son relativamente recientes.

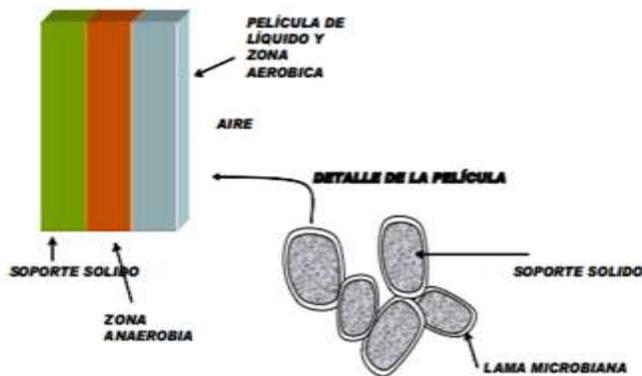


Figura 2. Formación de película microbiana aerobia y anaerobia en el medio de soporte de un biofiltro.

1.5 Las Plantas Acuáticas

Son plantas que viven flotando en el agua. Su papel es la absorción de los nutrientes, aparte de descontaminar el agua, son alimento para los animales. Algunas plantas acuáticas de mayor importancia son: lirio acuático o jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), lechuga de agua o lechuguilla (*Pistia stratiotes*), azolla (*Azolla microphylla*), espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) y oreja de ratón (*Salvinia minima*).

1.5.1 Azolla (*Azolla microphylla* L.)

Azolla microphylla es una planta acuática flotante de la familia *Azollaceae*. La planta tiene 1 a 5 cm de tamaño. Se reproduce tanto de forma vegetativa como sexual (Van Hove and Lejeune 2002; citado por Nimukunda *et al.*, 2005).

Azolla es un helecho acuático con pequeñas hojas alternas, que vive en simbiosis con cianobacterias, las cuales fijan el nitrógeno atmosférico y poseen generalmente una alta concentración de nutrientes, este puede ser usado con alta eficacia para abastecer de nutrientes a los cultivos y mejorar los sustratos (Castro *et al.*, 2006). Esta puede fijar de 100 a 1564 kg de N₂/ha·año (Quintero- Lizaola y Ferrera-Cerrato, 2000; citado por Castro *et al.*, 2008).

La planta ha sido empleada en la limpieza de acuíferos por su habilidad de fijar N₂ y remover P de los ecosistemas (Shiomi y Kitoh, 1987; citado por Castro *et al.*, 2008). También se utiliza como biofiltro de elementos tóxicos en sistemas con agua circulante. Su uso potencial en bioremediación se basa en sus estrategias de sobrevivencia y proliferación en acuíferos contaminados (Uheda *et al.*, 1995; citado por Castro *et al.*, 2008). Ladha y Reddy (2003) (citados por Castro *et al.*, 2008) mencionan que *Azolla* puede ser usado como purificador de

agua y su aplicación biotecnológica requiere de selección de biotipos y desarrollo y mejoramiento de híbridos.

Azolla es un género de pequeños helechos acuáticos cuyos individuos son capaces de asociarse simbióticamente con el alga verde-azul fijadora de nitrógeno *Anabaena azollae*. Este género tiene un amplio intervalo altitudinal de distribución desde el nivel del mar hasta 5.000 m de altitud. En general, *Azolla* prefiere condiciones frías y semisombreadas y se desarrolla mejor en contenidos altos de fósforo, tanto en el agua como en el suelo.

Existen siete especies de *Azolla* ampliamente distribuidas a nivel mundial. Esta distribución ha sido fuertemente influenciada por el hombre, debido a la introducción indiscriminada del helecho de un área a otra. Previo a la dispersión humana, *A. caroliniana* fue reportada en América del Norte y el Caribe; *A. filiculoides* en Sur América y oeste mediterráneo, incluyendo a Alaska; *A. microphylla* en América tropical y subtropical; *A. mexicana* en el norte de Sur América y oeste de Norte América; *A. nilotica* desde el Nilo hasta Sudan; *A. pinnata* en Asia y costas de África Tropical; *A. japónica* en Japón (Espinoza *et al.*, 2006).

De acuerdo a Becking (1986) (citado por Espinoza *et al.*, 2006) la fijación de nitrógeno de la simbiosis varía con el tipo de especie de *Azolla*. Sin embargo, Reynaud (1985) y Watanabe *et al.* (1983) (citados por Espinoza *et al.*, 2006) encontraron que los factores ambientales ejercen gran influencia sobre esta capacidad y la de producción de grandes cantidades de biomasa. Tanto la fijación de nitrógeno como la alta tasa de crecimiento le permitieron producir en poco tiempo gran cantidad de biomasa rica en nitrógeno. Esta propiedad ha motivado su estudio como biofertilizante para cultivos desarrollados en condiciones de inundación. El FONAIAP inició en 1991 un proyecto de investigación para evaluar la potencialidad de la asociación *Azolla-Anabaena* como biofertilizante para arrozales, para lo cual se planteó la necesidad de recolectar y desarrollar un banco de germoplasma de las especies de *Azolla* (Espinoza *et al.*, 2006).

1.5.1.1 Azolla Pinnata

Proviene de la familia Salviniaceae, y es conocida comúnmente como helecho del mosquito; es un helecho de agua libre-flotante con aproximadamente 0.8-2.5 centímetros de largo, con hojas con muy pequeñas lobadas de color verde o rojo, dando a menudo la apariencia rojiza a la superficie de agua. El tallo principal con las ramas de *pinnate*; las más largas hacia la base que da una forma triangular a la planta. Produce varones y esporas hembras (Arora, 2002).

Según Arora y Singh (2002) la especie *Azolla Pinnata* tiene la tasa de crecimiento relativo más baja en comparación con la actividad nitrogenosa de otras especies, pero en condiciones adecuadas puede llegar a tener una alta producción como afirman Massod *et al.*, (2005) quienes aseveran que *Azolla* posee una distribución mundial y se produce bien en hábitats de agua dulce de las regiones templadas, tropicales, subtropicales y cálidas; además la especie *Azolla* es un cultivo simple y barato, que crece en todos los ambientes acuáticos de las aguas residuales contaminadas ya que posee capacidad de concentración de nutrientes (Arora y Saxena, 2005).

Distribución: esta planta es nativa de África tropical, África Sur, India, China, Japón, Malasia, Filipinas, Vietnam, Nueva Guinea, Australia; aunque también se encuentra en Bangladesh, Pakistán, Sri Lanka, Corea, el Sudeste Asia y Nueva Zelanda (Arora, 2002).

Hábitat: subtropical y tropical; presente en lagos, en arroyos y ríos lentos, pantanos, estanques, y se pueden incorporar en wetlands (Arora, 2002).

La planta *Azolla Pinnata* se ha usado durante siglos en el Sudeste Asia como un fertilizante en la producción de arroz. Los beneficios para el arroz se basan en la relación de la simbiosis con la cianobacteria *azollae* de *Anabaena* que compone el nitrógeno y que crece en una cavidad del lóbulo dorsal de las hojas del helecho por esta razón se ha usado para mejorar fertilidad de la tierra y la producción de arroz (Wagner, 1997; citado por Zhang *et al.*, 2008). Se conoce que *Azolla* tiene una capacidad alta para acumular metales pesados como Cd, Cr, Cu, Ni y Zn (Sela, 1989; citado por Zhang *et al.*, 2008), y puede usarse para quitar los metales pesados del agua residual (Bennicelli *et al.*, 2004; Arora, 2005; Rakhshae *et al.*, 2006; citados por Zhang *et al.*, 2008); sin embargo, la habilidad de *Azolla* de aumentar estos en el agua no se ha evaluado en detalle.

La información disponible que se tiene de esta planta es muy limitada, no se conocen detalles de su acumulación, tolerancia y de los mecanismos que se desarrollan en ella, así como la comparación entre diferentes especies. Lo que se puede encontrar es básicamente su utilización eficaz en sistemas de riego para cultivos de arroz donde actúa como biofertilizante (Zhang *et al.*, 2008).

La planta *Azolla Anabaena* es importante desde el punto de vista de la agronomía ya que es usada en cosechas por su habilidad de fijar el nitrógeno atmosférico en proporciones altas así como los beneficios que posee por sus bajos costos, la habilidad de adaptarse y desarrollarse en una forma global en hábitats templados tropicales, subtropicales y calientes. Sin embargo,

la salinidad es una amenaza seria para la agricultura en general, aproximadamente 100 millones de hectáreas de la taza mundial de tierra han sido afectadas por esta (Ghassemi *et al.*, 1995; citados por Masood *et al.*, 2005).

1.5.1.2 Factores que afectan el desarrollo de Azolla

Temperatura: la óptima se encuentra alrededor de los 25 °C para *A filiculloides*, *A Microphylla* y *A Pinnata*. Por encima de 30-33 ° C o por debajo de 10 ° C, el crecimiento es retrasado. *Azolla* puede tolerar (sobrevivir) hasta -5 °C (Watanabe, 2005).

Luz: en ambientes deficientes de nutrientes y condiciones de luz fuerte, *Azolla* se cambia a un tono rojo. Durante el verano o el frío de invierno, también se convierte en rojo o rojo parduzco. En virtud de las condiciones de sombra o en condiciones ricas en nutrientes, sigue siendo verde.

Nutrición mineral: Anabaena-*Azolla* absorbe los nutrientes del agua, cuando está flotando en ella. Debido a la difusión de fósforo del suelo al agua que es lento, el campo de la población flotante *Azolla* es generalmente deficientes en fósforo. La aplicación de fertilizantes de fósforo es eficaz para mejorar su crecimiento. El efecto de la deficiencia de P y Ca en el crecimiento y fijación del N es más intenso que la deficiencia de K y el Mg (Tandon y Roy; 2004)

pH: *Azolla* prefiere medios ligeramente ácidos hasta pH 4. Un pH de 5-8 resulta óptimo, aunque esta puede sobrevivir en un rango de pH de 3.5 - 10.0. El efecto del pH está relacionado con su impacto sobre la disponibilidad de nutrientes. (Tandon y Roy, 2004)

Daños por insectos: *Lepidoptera*, *Pyralidae* son la mayoría de las plagas de insectos nocivos que atacan *Azolla*. En los trópicos, *Webworm-Elophyla* y el 32 gusano - *Epheosispsis* son las principales plagas que atacan a la planta. A mayor temperatura (30°C), el daño puede ser grave, debido a que la velocidad de crecimiento de las larvas se aumenta poniendo en peligro la estructura de *Azolla* (Watanabe, 2005).

Las concentraciones de sal exógenas altas: causan un desequilibrio de los iones celulares que producen toxicidad (Cheeseman, 1988; Navari-Izzo *et al.*, 1988; Cramer *et al.*, 1994; citados por Masood *et al.*, 2005). Sin embargo, las plantas desarrollan las estrategias de defensa contra la tensión de sal (Dionisio-Sese y Toba, 1998; citados por Masood *et al.*, 2005). La salinidad es uno de los factores que afecta el desarrollo de *Azolla*. Este campo aún no se ha explorado totalmente, por lo tanto no se puede inferir la adaptabilidad y tolerancia de la planta en diferentes medios (Masood *et al.*, 2005).

1.6 Beneficios ambientales de la aplicación de los filtros de macrófitas en flotación para la depuración de aguas residuales.

Según el informe Layman (2005) en el cual se realizó un estudio de nuevos filtros verdes con macrófitas en flotación; se consideró que *Azolla* puede ser utilizada como biofiltro sin tener efectos nocivos para el ambiente donde estas macrófitas se desarrollan; también en otro informe y según la Environmental Protection Agency (EPA, 2000), la implementación de macrófitas acuáticas como sistemas de descontaminación de aguas residuales también pueden tener beneficios positivos para el medio ambiente. Estos beneficios se traducen en mejoras tanto para el medio ambiente como para las comunidades o empresas que hacen uso de este tipo de tecnologías limpias; avances positivos como: bajos costos, facilidad de mantenimiento y operación entre otros.

Estos sistemas de macrófitas son de fácil operación y mantenimiento; debido a su naturaleza; además no se requiere de equipos mecánicos; como resultado su operación es en su mayoría pasiva y demanda poca intervención del operador. La operación consiste en procedimientos simples similares a los requeridos para el funcionamiento de lagunas. Por ejemplo mantenimiento de la uniformidad del flujo, gestión de la vegetación, control de plagas y los insectos entre otros. En cuanto a economía la EPA (2000) apunta a que estas tecnologías se caracterizan por ser de bajo costo ya que son fácilmente operables, debido a que el funcionamiento del sistema es posible de efectuarse con mano de obra disponible a nivel local y no se requiere de personal altamente calificado.

Otro aspecto importante para tener en cuenta es que este tipo de sistemas naturales no requiere de inversión en compra de equipos de alto costo para su funcionamiento y mantenimiento, lo que involucra un mínimo de consumo a nivel energético; además que estos sistemas con macrófitas son fáciles de implementar ya que implican principalmente movimiento de tierras, excavaciones y rellenos; por lo que la mayoría de los equipos y procedimientos son los mismos que los empleados para la construcción de lagunas simples. También factores ambientales como el nivel de ruido se reduce debido a que no se tienen equipos mecánicos durante la etapa de operación del sistema que generen perturbaciones, así como también bajo impacto visual ya que la vegetación proporciona apariencias de ambientes naturales (Fernández *et al.*, 2004)

En el caso de sistemas naturales con lagunas de *Azolla* existe la facilidad de cosechar las macrofitas que se encuentran en flotación, ya sea por medios manuales o de control biológico;

esto implica que el sistema no se destruirá como en otros casos de sistemas naturales con macrófitas enraizadas. También hay que resaltar la capacidad que tienen las macrófitas acuáticas de suministrar el oxígeno al proceso de depuración desarrollando mecanismos adaptativos a las condiciones del medio; estos procesos se realizan generalmente en el sistema radicular (Layman, 2005), lo que crea un microambiente aerobio en el agua próxima a estas raíces y que autorregula estos sistemas naturales.

1.6.1 MARCO LEGAL

A continuación se hace una descripción de los aspectos más importantes del ordenamiento legal ambiental del país:

Tabla No. 2. Marco normativo colombiano.

MARCO NORMATIVO	DESCRIPCIÓN
Constitución Política Nacional 1991, Título 2, Capítulo 3	De los derechos colectivos y del ambiente.
Ley 9 De 1979	Código Sanitario Nacional.
Decreto Único 1076 De 2015	Decreto único 1 del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible
Decreto Ley 2811 De 1974	Código de los Recursos naturales Renovables y Protección al Medio Ambiente

Normatividad Ambiental vigente que regular al subsector Porcícola, recurso hídrico.

Tabla No. 3. Marco normativo Colombiano, subsector Porcícola recurso hídrico.

MARCO NORMATIVO	DESCRIPCIÓN
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Ley 9 de 1979	Por medio de la cual se expide el código sanitario.
Resolución 2400 de 1979	Disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad industrial en establecimientos de trabajo

Decreto 1594 de 1984	Por medio del cual se reglamentan los usos del agua y residuos líquidos.
Constitución Política de Colombia de 1991	Consagra obligaciones y deberes para el Estado y las personas de proteger el medio ambiente, como principio fundamental.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
Ley 388 de 1997	Establece el cumplimiento obligatorio de los planes de ordenamiento territorial adoptados por los municipios
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua
Decreto 475 de 1998	Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable.
Decreto 3100 de 2003	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de éstas.
Resolución 1023 de 2005	Por la cual se adoptan guías ambientales como instrumento de autogestión y autorregulación
Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
Resolución 1096 de 2000	Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico, RAS.
Decreto 4728 de 2010	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010.
Resolución 631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones

Gestión ambiental calidad de agua. NTC-ISO 5667-10	muestreo de aguas residuales domésticas e industriales
CONPES 3177 de 2002	Acciones Prioritarias Y Lineamientos Para La Formulación Del Plan Nacional De Manejo De Aguas Residuales.

2. DISEÑO METODOLOGICO DE LA INVESTIGACION

2.2 Tipo de Investigación

Se realizó un estudio de investigación tipo básico aplicado (Analítico), ya que en él se evaluaron las variables más relevantes que puedan afectar la remoción de cargas contaminantes de un filtro biológico (Humedal) que recibe efluentes provenientes de procesos productivos agropecuarios como es el de ganadería porcina, ubicados en la granja del SENA Cauca.

Para realizar la caracterización del efluente se elaboró el protocolo de muestreo, con el fin de obtener una muestra compuesta en la salida y entrada del sistema de tratamiento de aguas residuales, la frecuencia del muestreo fue de veinte (20) minutos por un periodo de seis (6) horas hasta obtener la muestra completa. Para la recolección de la muestra se utilizaron recipientes de plástico de 2 litros, respectivamente marcados y rotulados conforme a los establecido en el protocolo de aguas del IDEAM, se transportaron dentro de una nevera de icopor con bolsas de gel congeladas para garantizar la conservación de la muestra a una temperatura de hasta cuatro grados centígrados. Para caracterizar el efluente, Los parámetros de Temperatura, Oxígeno Disuelto, pH y Conductividad Eléctrica se midieron en campo utilizando la sonda multiparamétrica de marca HQ40 y cuyos datos se reportaron en formatos de campo (ver anexo 1.) y los demás parámetros se analizaron en el laboratorio de Ciencias básicas de la granja SENA; utilizando metodologías del Standard Methods.1998.Edición 20 Esta caracterización se realizó dos veces por semana como se indica en la en la descripción estadística.

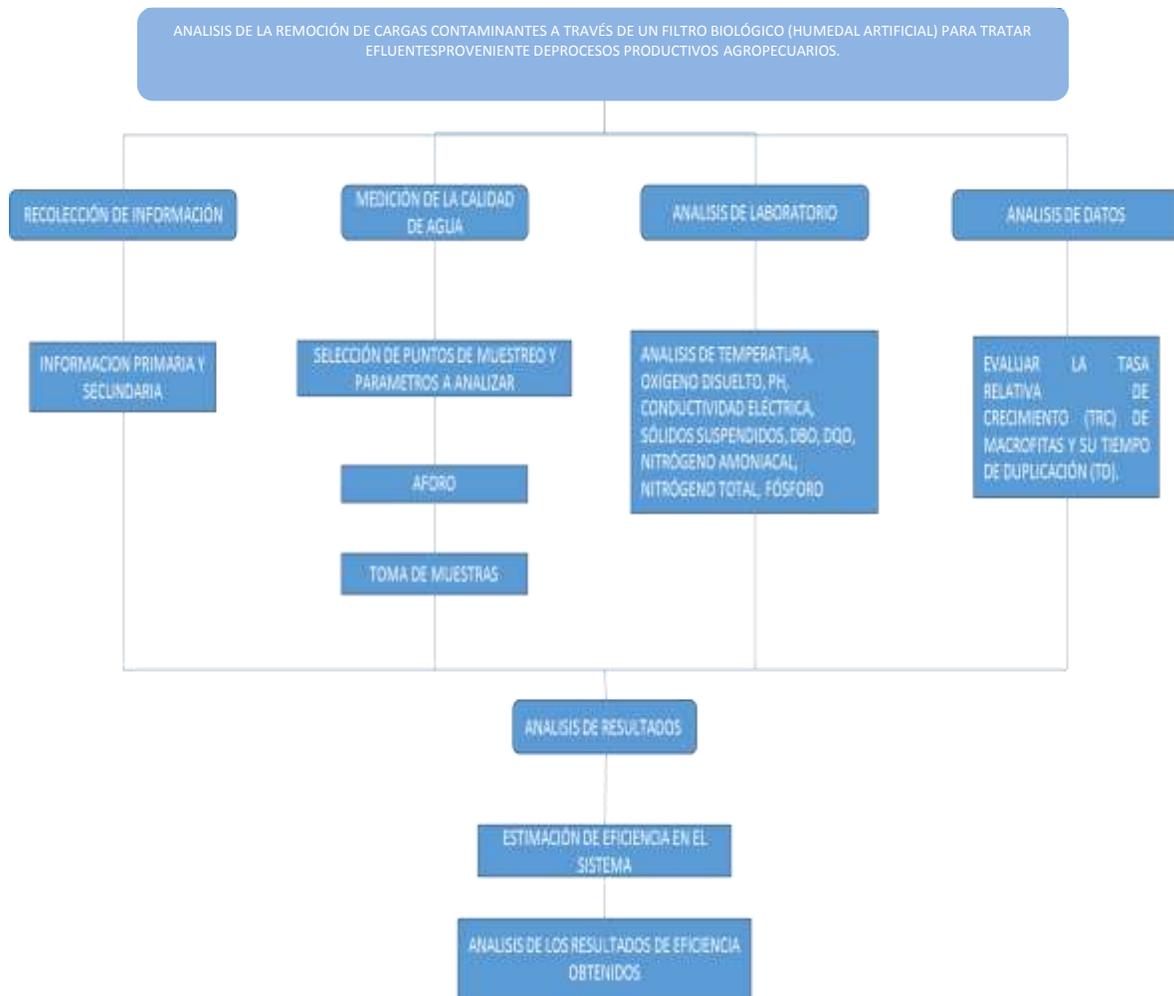


Figura 3. Diseño Metodológico de la investigación

2.3 Hipótesis.

Se disminuyen las concentraciones de procesos agropecuarios como es el de ganadería porcina mediante la implementación de un filtro biológico (humedales artificiales) con Azolla Anabaena (macrófita acuática) como método para depurar aguas residuales no domésticas.

2.4 Área de estudio

El estudio se implantó en la Granja del SENA, Centro Agropecuario, que limita al norte con la calle 74N de la vía que conduce a la penitenciaría San Isidro con la zona de retiro de la penitenciaría, la vía Panamericana, la calle 71N, la calle 73BN, la vía que conecta el barrio Villa del

Norte, la facultad de agroindustrial de la Universidad del Cauca, en el área residencial tiene influencia directa con la zona comercial y de servicios, un gran porcentaje de establecimientos educativos como el Instituto Toribio Maya , entre los barrios aledaños se encuentra: La Paz, Matamoros, Lame, San Isidro, El Placer, pertenecientes al Municipio de Popayán Departamento del Cauca. En la actualidad se encuentra fuera del perímetro sanitario y su desarrollo estará supeditado a la construcción del acueducto de Palacé, puesto que se prevé incluir el servicio de alcantarillado al proyecto de descontaminación de la Ciudad cuya viabilidad se tendrá al mediano plazo de acuerdo a los establecido en el plan de saneamiento y manejo de vertimientos de la ciudad de Popayán (P.S.M.V) con un plazo hasta el año 2020. En el sector se evidencia contaminación por aguas residuales domesticas sobre la quebrada lame que circunda por el sector.

El centro Agropecuario del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, cuenta con un total de 6 unidades productivas donde se pueden encontrar estanques de piscifactoría, caprinos, bovinos, bioabonos, porcinos y planta de procesamiento de lácteos, donde las de mayor relevancia por contaminación ambiental son las zonas de porcicultura y planta de producción de lácteos; para este estudio se trataron los vertimientos provenientes de la unidad porcícola que cuentan con disposición final sobre la Quebrada Lame.

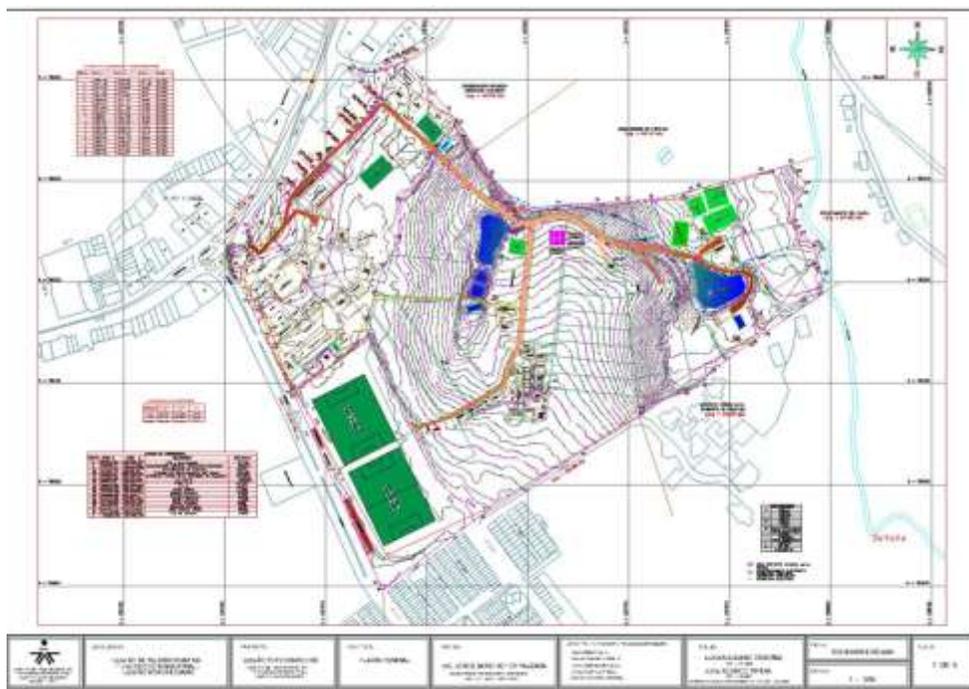


Figura 4. Imagen satelital o mapa geográfico con la ubicación. Adaptado PIGA – SENA 2014.

3. Diseño Unidad de Análisis, o Población y Muestra.

3.2 Procedimiento

3.2.1 Fuentes y Técnicas para la recolección de Información

En el estudio se utilizaron fuentes primarias como la observación para identificar el manejo de las aguas residuales dentro de la Granja del Centro Agropecuario, para definir diseño del sistema de tratamiento mediante implementación de filtros biológicos así como su ubicación, frecuencia de muestreo, los responsables de dichos procesos son los maestrantes, Jhenny Katherine Huetio y Mauricio Fernando Ortiz.

Se tomaron fuentes secundarias como estudios relacionados con plantas de tratamiento utilizando el método de filtros biológicos para encontrar la mejor manera de evaluar el diseño y artículos de investigación.

El sistema está compuesto por un filtro biológico (humedal), para el montaje se utilizó tubería PVC Sanitaria de ½ pulgada, una válvula de bola de ¾ de pulgada y una válvula globo de ½ pulgada para facilitar el manejo del caudal.

El Biofiltro es de doble compartimento, el primero está compuesto por un sedimentador que evita la resuspensión de las partículas provenientes de las áreas productivas y disminuye la carga de sólidos que va hacia el sistema de Biofiltro, se evalúa la remoción de Nitrógeno y Fósforo que pueda estar generando contaminación en el cuerpo de agua receptor, Quebrada “Lame”

Para realizar la caracterización del efluente proveniente de las unidades productivas se elaboró el protocolo de muestreo, con el fin de obtener una muestra compuesta en la salida y entrada del sistema de tratamiento de aguas residuales, la frecuencia del muestreo fue de veinte (20) minutos por un periodo de seis (6) horas hasta obtener la muestra completa. Para la recolección de la muestra se utilizaron recipientes de plástico de 2 litros, respectivamente marcados y rotulados conforme a los establecido en el protocolo de aguas del IDEAM, se transportaron dentro de una nevera de icopor con bolsas de gel congeladas para garantizar la conservación de la muestra a una temperatura de hasta cuatro grados centígrados.

Para caracterizar el efluente, Los parámetros de Temperatura, Oxígeno Disuelto, pH y Conductividad Eléctrica se midieron en campo utilizando la sonda multiparamétrica de marca HQ40 y cuyos datos se reportaron en formatos de campo (ver anexo 1.) y los demás parámetros se analizaron en el laboratorio de Ciencias básicas de la granja SENA; utilizando metodologías del

Standard Methods.1998.Edicion 20 Esta caracterización se realizó dos veces por semana como se indica en la en la descripción estadística.

La unidad experimental está conformada por un Biofiltro, construido en concreto (rectangular de 2,10 metros de largo, 1,20 metros de ancho y 0,50 metros de profundidad) y debidamente impermeabilizado, acondicionados con lecho de grava y de arena; en el cual se sembró una macrófita acuática denominada *Azolla A. Pinnata*.

La estructura de entrada del afluente al sistema de tratamiento consta de un canal de longitud de 9,25 metros (en este canal se encuentran un sistema de cribado que consta de dos rejillas con diferente separación, una para residuos sólidos grandes y la siguiente para retener sólidos pequeños), el Biofiltro consiste en un tanque en concreto que contiene material filtrante, dentro del cual se da un proceso biológico realizado por bacterias que se encuentran de manera natural dentro del mismo; durante el recorrido que realizan las partículas de agua, el agua residual está en contacto con zonas aerobias y anaerobias, lo que permite la degradación de microbiológica y procesos fisicoquímicos. (La sección empacada consta de roca (0.15 m), grava (0.15 m) y arena (0.20 m) para una sección empacada con una altura de 0.50 metros, un largo de 1.50m y un ancho de 1.20m); una caja de inspección (0.30m por 0.30m) al final del tratamiento, se lleva a cabo la etapa de acondicionamiento para permitir la adaptación del sistema.

Una vez instalado el sistema combinado de biofiltro y humedal se procede a distribuir la *Azolla A. Pinnata* de manera uniforme para favorecer su dispersión sobre el área superficial del humedal en un 70% de la capacidad del humedal, se colocó 470 gramos de *Azolla* fresca, garantizando una densidad inicial de 256,83 gramos/m²; la grava hace parte de la sección empacada filtrante (La sección empacada consta de roca (0.15 m), grava (0.15 m) y arena (0.20 m) para una sección empacada con una altura de 0.50 metros.

3.2.2 Parámetros de diseño del Biofiltro.

Para el diseño del sistema de tratamiento, Biofiltro se tomó como referencia la *Guía Para El Diseño Y Construcción De Un Humedal De La Agencia de protección ambiental de los Estados unidos EPA*.

Tabla No 4. Dimensionamiento del sistema de tratamiento.

DATOS DE DISEÑO		Valor	Unidad
Demanda Biológica De Oxígeno	DBO ₅	39,09	mg/L
Demanda biológica de oxígeno requerida	DBO REQ	7,8	mg/L
Caudal promedio diario	Q	0,09	m ³ /día
Profundidad del lecho	H LECHO	0,5	m
Porosidad de la estructura del filtro con plantas	N	0,35	%
Relación largo - ancho	L	2	
	W	1	
Profundidad media del agua en el humedal	D	0,4	m
Constante de temperatura a 20°C	K20	1,10	
Constante	E	1,06	
Temperatura promedio agua	T	19,4	°C
Constante de temperatura de Ar	Kt	1,062	
Área superficial del humedal	As	1,00	m ²
Ancho real	W real	0,71	m
Longitud real	L real	1,41	m
Conductividad hidráulica	Ks	33335,00	m ³ /m ² /día
Área transversal del humedal	A	0,3536	m ²
Gradiente hidráulico	S	0,0354	
Capacidad hidráulica del humedal	Q cond	416,69	m ³ /día
Tiempo de retención	TR	0,00042	días

Tabla No 5. Dimensiones asumidas del tanque – Biofiltro.

DIMENSIONES ASUMIDAS DEL TANQUE		Valor	Unidad
Demanda Biológica De Oxígeno	DBO	39,09	mg/L
Demanda biológica de oxígeno requerida	DBO REQ	7,8	mg/L
Caudal promedio diario	Q	0,09	m3/día
Profundidad del lecho	H LECHO	0,5	m
Porosidad de la estructura del filtro con plantas	N	0,35	%
Relación largo - ancho	L	2	
	W	1	
Profundidad media del agua en el humedal	D	0,4	m
Constante de temperatura a 20°C	K20	1,10	
Constante	E	1,06	
Temperatura promedio agua	T	19,4	°C
Constante de temperatura de Ar	Kt	1,062	
Área superficial del humedal	As	1,83	m2
Ancho real	W real	1,22	m
Longitud real	L real	1,50	m
Conductividad hidráulica	Ks	33335,00	m3/m2/día
Área transversal del humedal	A	0,61	m2
Gradiente hidráulico	S	0,03333	
Capacidad hidráulica del humedal	Q cond	677.134	m3/día
Tiempo de retención	TR	1	días

Diagrama sistema de tratamiento Biofiltro.

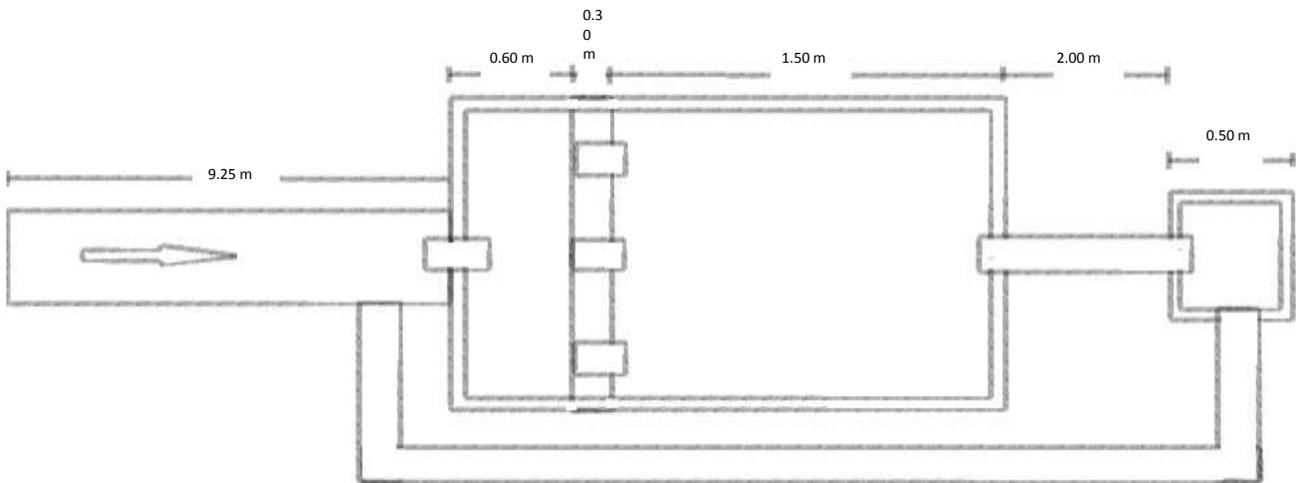


Diagrama 1. Dimensionamiento del sistema de tratamiento Biofiltro

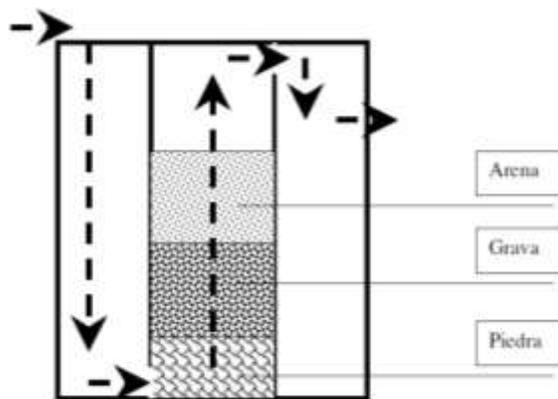


Figura 5. Planta piloto (Diseño preliminar Biofiltro)

Para el desarrollo del estudio se realizó visitas semanales a la planta piloto durante un periodo de estabilización promedio de un semestre, estas se llevaron a cabo de la siguiente manera teniendo en cuenta los tiempos de retención hidráulica:

Tabla No. 6. Parámetros para la caracterización del efluente.

Parámetro	Nº de Análisis	Método Estándar
Temperatura	12	2550
Oxígeno Disuelto	12	4500-O-G
pH	12	4500-H+B
Conductividad Eléctrica	12	2510 B
Sólidos Suspendidos	12	2540D
DBO	12	5210-B
DQO	12	5220-D
Nitrógeno Amoniacal	12	4500
Nitrógeno Total	12	4500
Fósforo	12	4500-P-H

El aforo de caudal se realizó mediante el método volumétrico para los puntos de entrada y salida; antes de realizar el aforo se limpiaba la tubería abriendo totalmente las válvulas, luego se ajustaba el caudal y se iniciaba el aforo tomando 3 muestras para determinar el caudal promedio equivalente a 0.025L/s.

Después de haber instalado el Biofiltro se procedió a sembrar una macrófita acuática *Azolla Anabaena* en un 70% de la capacidad del humedal, se colocó 470 gramos de *Azolla*, garantizando una densidad inicial de 256,83 gramos/m², con el fin de coadyuvar en el proceso, y evaluar la tasa relativa de crecimiento de estas plantas; ya que estas plantas acuáticas se duplican en masa alrededor de cada 8 días compitiendo con el oxígeno y demás nutrientes.

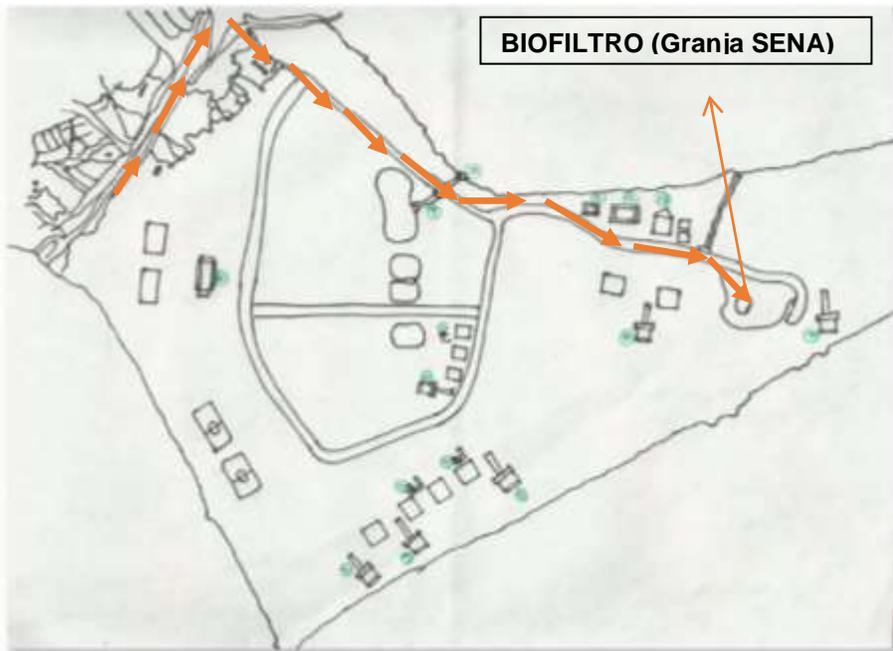
Se hicieron dos visitas semanales durante un periodo de tres meses, iniciando 24 de febrero de 2015 y finalizando el 3 de abril de 2015. Durante las visitas se pesaron las plantas a la misma hora durante dicho periodo, y a medida que se debía retirar biomasa de *Azolla Anabaena* se dejaba en el sistema un 70% de la área superficial para evitar la sobrepoblación de la macrofita, ya que estas plantas acuáticas se duplican en masa alrededor de cada 5 - 8 días compitiendo con el oxígeno y

demás nutrientes, dada la alta radiación solar del municipio de Popayán la planta cambia a su color natural a una coloración rojiza, dando la sensación de una alfombra.

3.3 Diseño y desarrollo del plan de muestreo

El vertimiento tratado proviene de las actividades de la unidad porcícola donde se tiene una capacidad instalada para la crianza de hasta doce cerdas de cría; instalaciones en las cuales se retiran las heces fecales en medio seco para llevar a un proceso de compostaje, luego se hace el lavado de las instalaciones dos veces al día; y lavados adicionales cuando las cerdas están por parir por requerimientos de asepsia de los mismos animales.

Tabla 7. Protocolo de Muestreo

PARÁMETROS	Ver parámetros en Procesamiento y análisis de información		
<p>SITIO DE MUESTREO</p>	<p>La muestra a realizar se efectuará en el Humedal del Centro Agropecuario Alto Cauca, ubicado al Nor-orienté de la Granja, frente al espacio destinado para Agricultura Urbana.</p>  <p>BIOFILTRO (Granja SENA)</p>		
	Materiales para la toma de muestras	Materiales para evaluación del sitio	Material de Bioseguridad

PREPARACIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES	1. vidrio microbiológico 1. plástico para el físico 1. plástico para el químico	Cámara Agenda para apuntes Cartografía Sonda Multiparametro, Balde Cronometro Termómetro Cinta métrica	Jabón Guantes Gafas Botas Ropa impermeable Tapabocas Alcohol antiséptico
DESCRIPCIÓN Y USO DE MATERIALES	EQUIPO A UTILIZAR EN CAMPO		
	Elemento	Uso	
	Cámara fotográfica	Registro visual del lugar de muestreo	
	Agenda de apuntes	Registro	
	Balde Cinta métrica Cronometro	Se usa para hacer las mediciones de Caudal, por el método volumétrico.	
	Recipiente de vidrio para análisis microbiológico	El recipiente previamente esterilizado se lleva a campo y se introduce en el agua y se abre la tapa bajo el agua para tomar la muestra, es necesario evitar remover el sustrato para no alterar la calidad de la muestra. Se rotula y refrigera	
	Recipiente de plástico para análisis físico-químico	Igual que la metodología anterior pero la muestra debe ser de mínimo 2 litros.	
	Recipiente volumétrico y cronometro	Para la medición de caudal se toma el volumen (1000mL) por X tiempo. En el análisis se describe los valores obtenidos	
	Elementos de Bioseguridad	Guantes, tapabocas, gorra, gafas y botas. Las cuales son elementales en la toma de muestras porque se desconoce el nivel de contaminación del agua y puede considerarse un factor de riesgo	
Rótulos y ficha de campo	Para marcar los recipientes y describir los aspectos relevantes Ver ANEXO 1		
EQUIPO A UTILIZAR EN LABORATORIO			

Equipo	Uso
pHmetro	Medición de Ph
Termómetro	Temperatura
Espectrofotómetro	Equipo de análisis químico para diferentes parámetros (color, alcalinidad, DQO, entre otros)
Conductímetro	Medición de conductividad eléctrica
FRECUENCIA	Para la toma de muestra de agua puntual se realizara en un tiempo y lugar determinado en una sola jornada.
MUESTREO	<p>Puntual</p> <p>Son las que se toman en un tiempo y lugar determinado para su análisis individual.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  </div>
MÉTODOS	<p>Se elige el lugar de muestreo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se describe el medio circundante del lugar de muestreo ver ficha de

	<p>campo 001.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Se toma la velocidad con el método del flotador que consiste en medir un área y con un objeto flotante medir el tiempo que gasta en llegar de un punto a otro. 3. Se mide caudal con el método volumétrico. 4. Toma de muestra puntual, en recipiente de vidrio para análisis bacteriológico con un volumen de 500 cc y en recipiente plástico para análisis físico y químico con un volumen de 2 litros. 5. Se rotulan las muestras. 6. Se refrigera la muestra para no alterar los resultados.
IDENTIFICACIÓN Y REGISTRO	Para efectos de esta actividad se desarrolló un formato de trabajo de campo que describe varios aspectos necesarios en la toma de muestras ver anexo 1.
PRESERVACIÓN	<p>DQO, H₂SO₄ a pH<2, 4°C.</p> <p>DBO₅: 4°C.</p> <p>Coliformes fecales y totales: 4°C, 0,008% Na₂S₂O₃</p>
ALMACENAMIENTO	Al tomar las muestras y rotularlas se almacenan en una nevera a 4°C y se llena registro de cadena de custodia
CONSERVACIÓN	Se conservan en un refrigerador hasta que se procede a análisis es recomendable realizar la muestra inmediatamente para que los resultados sean óptimos.

4. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE MUESTREO

El biofiltro se encuentra ubicado al lado de la unidad Porcícola, en el caen vertimientos de aguas residuales no domesticas del área de porcicultura, el sistema contiene instalado en un 70% de macrófitas acuáticas como *Azolla Anabaena* que coadyuva en el proceso de biorremediación.

4.2 Procesamiento y análisis de información

Con el fin de evaluar la remoción de cargas contaminantes a través de un filtro biológico para tratar efluentes provenientes de procesos productivos agropecuarios de ganadería porcina durante el periodo de muestreo, se realizaron comparaciones entre datos de cada uno de los parámetros fisicoquímicos analizados, se aplicaron las pruebas estadísticas paramétricas de Tukey y pruebas no paramétricas post hoc (Kruskal- Wallis). Estas se realizaron con el programa SPSS versión para Windows.

Los diferentes parámetros indicadores de contaminación o calidad de aguas clasificándolos según la naturaleza de la propiedad o especie que se determina. Los podemos dividir en: Parámetros de carácter físico:

- Características organolépticas
- Sólidos suspendidos
- Temperatura
- Conductividad

Parámetros de carácter químico:

- PH
- Oxígeno disuelto
- Medidores de materia orgánica: DBO, DQO
- Nitrógeno
- Amoníaco
- Fosforo

5. CARACTERIZACION DEL EFLUENTE

Se tuvo en cuenta para la investigación el tiempo de retención manejado; el cual se estableció en un día, dado que el tiempo de retención hidráulica calculado en el diseño del humedal fue inferior a un día y conforme a lo establecido por el título E del Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico Ras 2000 referente Humedales artificiales de flujo sumergido donde se recomienda entre uno o dos días como tiempo de retención hidráulico.

Se utilizaron dos procedimientos: el primero consistió en la adecuación de una cámara de carga que tuvo como propósito mantener el nivel constante del agua que entra al sistema y así garantizar caudales uniformes; en segunda instancia y con el objetivo de minimizar errores se reguló el caudal del flujo de por medio de una válvula tipo globo; además los caudales fueron determinados diariamente por la persona encargada; para este procedimiento se utilizó un método volumétrico.

Para el desarrollo del estudio fue necesario realizar 2 visitas semanales al Biofiltro durante un periodo de 3 meses, los cuales se dividieron en dos fases: Parámetros In situ y parámetros Ex situ; para estos últimos fue necesario transportar las muestras hasta el laboratorio donde se analizaron utilizando la metodología consignada en el Standar Methods. (1998).

Tabla No. 8 Parámetros y método para la caracterización del efluente

Parámetro		Método Estándar	Equipo
In situ	Temperatura	2550	Sonda multiparámetro
	Oxígeno disuelto	4500-O-G	Sonda multiparámetro
	pH	4500-H+B	Sonda multiparámetro
	Conductividad eléctrica	2510 B	Sonda multiparámetro
	Sólidos suspendidos	2540D	Standard Methods- Filtro whatman 934-AH Espectrofotómetro Nova 60 Merck
Ex situ	DBO ₅	5210-B	Standard Methods-Volumétrico
	DQO	5220-D	Standard Methods-Colorimétrico
	Nitrógeno amoniacal	4500- NH ₃ B	Unidad de destilación automática UDK 142 Velp Scientifica
	Nitrógeno total	4500 Norg B	Digestor DK6 Velp Scientifica Unidad de destilación Automática UDK 142 Velp Scientifica
	Fósforo	4500-P-H	Standard Methods-Cloruro estañoso

Fuente: Standard Methods for the examination of Water and wastewater 20Th Edition.

5.2 Resultados

En la etapa de inicio no se evidencio el crecimiento microbiano en la formación de biopelícula, aunque estaba bajo condiciones adecuadas de temperatura, humedad y/o aire, principalmente, por lo que se necesitó de un lapso de tiempo para alcanzar el desarrollo de la biopelícula sobre el medio; además de la siembra de Macrofitas como *Azolla A. Pinnata* y su fase de adaptación y crecimiento.

Como era de esperarse al principio, la eficiencia fue baja, por el proceso de adaptación de los microorganismos, pero aumento a medida que creció y se desarrolló la biopelícula y la azolla; debido a las condiciones favorables y disposición de los nutrientes para el desarrollo de los microorganismos y de las plantas.

Para el incremento de la biopelícula se hizo un mediante inspección ocular de incremento o disminución en la aparición de la biopelícula; esta revisión se llevaba a cabo dos veces por semana empezando el día 24 de febrero de 2015 y finalizando el 3 de abril de 2015; De acuerdo a lo observado y al incremento de *Azolla*, se pesaba y se determinaba si se retiraba o no el exceso de

biomasa; si era necesario retirar la biomasa se extraía con una malla (tipo colador) retirando el exceso de agua luego de 10 minutos de secado pesar y retirar el exceso para dejar nuevamente la cantidad inicial sembrada de 470 gramos de macrófita, garantizando una densidad inicial de 256,83 gramos/m²

Tabla 6. ANÁLISIS ORGANOLÉPTICO

Parámetro	Descripción	Análisis
Olor	Fétido	Típico de aguas residuales
Color	Amarilla con turbiedad	Típico de aguas residuales
Aspecto	Turbia, con presencia de solidos suspendidos.	Aguas residuales

Tabla 7. ANÁLISIS QUÍMICO, FÍSICO Y MICROBIOLÓGICO

Parámetro	Unidad	Decreto 1594 de 1984	Análisis
Coliformes totales	25.000 NMP	20.000 NMP	Emisión de gas metano a la atmosfera por descomposición de materia orgánica. Contaminación a la quebrada Lame, microcuenca Rio Blanco y Rio Cauca.
Coliformes fecales	2.500	2.000 NMO	
Ph	8.0	6.5 – 8.5	
Temperatura Ambiente	24°C	28-32°C	-
Temperatura Muestra	21°C	-	-

Los análisis microbiológicos indican contaminación por Coliformes fecales en los dos puntos de muestreo, lo cual podría atribuirse a las deficiencias en el manejo y disposición de los residuos sólidos y líquidos agropecuarios y domésticos, el rango de las variables están por encima del parámetro que establece el Decreto 1594 de 1984, el vertimiento es descargado en la quebrada lame que acuerdo al método de Índice de Calidad de Aguas ICA se determinó que la calidad del agua de la quebrada lame es muy mala, las pruebas se realizaron en el laboratorio de ciencias básicas del SENA Centro Agropecuario.

Tabla 8. Parámetros del Biofiltro Granja Centro Agropecuario.

ENSA YO	FECHA MUEST REO	ESTADIST ICOS DESCRIPT IVOS	O.D (mg/ L)	pH (uni d)	CON D (μ S/c m)	T ($^{\circ}$ C)	SS (mg/ L)	PO ₄ (mg/ L)	NT (mg/ L)	NH ₃ -N (mg/ L)	DB O (mg/ L)	DQ O (mg/ L)
1	24/02/2015	Entrada	0,12	6,79	18	21,4	26,4	0,15	6,9	6,41	25,02	202
		Salida	0,26	6,15	12,4	21	26,4	0,16	3,94	2,96	23,61	64
2	27/02/2015	Entrada	0	4,79	13,4	23,2	49,5	0,12	5,91	3,94	23,76	52
		Salida	0	4,87	7,2	23,1	18,25	0,09	6,9	4,93	26,06	58
3	03/03/2015	Entrada	3,47	6,1	15,4	24,8	42,6	0,11	4,44	0,49	11,96	62
		Salida	4,69	6,15	10,4	23,9	4,5	0,04	3,94	1,97	7,05	88
4	06/03/2015	Entrada	5,54	7,08	16,6	22,1	61,5	0,07	1,48	0,99	3,71	42
		Salida	5,82	6,55	8,6	22,2	14	0,04	1,97	1,97	3,34	26
5	10/03/2015	Entrada	4,85	5,97	2	21,1	23	0,05	3,45	2,96	5,94	48
		Salida	5,96	5,56	7,9	20,4	31,8	0,04	0,49	0,49	3,19	4
6	13/03/2015	Entrada	4,12	5,5	17,1	21,1	63,5	0,06	1,48	0,99	8,91	8
		Salida	5,5	5,06	14,9	21	35,7	0,03	3,45	2,96	3,94	50
7	17/03/2015	Entrada	4,24	6,84	16	19,9	48	0,07	8,87	0,49	5,05	-32
		Salida	5,52	6,81	13,2	22	37	0,03	7,39	2,22	2,82	122
8	20/03/2015	Entrada	5,11	6,44	13,7	20,6	61	0,07	3,58	3,14	4,01	30
		Salida	6,14	6,37	11,5	20,3	33,83	0,01	4,93	3,58	2,23	26
9	24/03/2015	Entrada	0	6,8	11,1	22,6	80	0,06	3,14	2,69	19,08	20
		Salida	0	6,7	12,3	21,8	31,4	0,03	16,13	7,62	17,23	60
10	24/03/2015	Entrada	5,41	7,57	13,6	21,7	134,6	0,23	10,84	4,44	8,08	366
		Salida	6,93	6,21	12,9	20,5	86,6	0	5,91	0,99	-2,26	316
11	27/03/2015	Entrada	3,92	6,4	8,6	20,4	147,9	0,11	3,45	2,46	17,7	94
		Salida	4,42	6,6	7,4	19,1	128,7	0,07	2,96	2,46	14,5	14
12	31/03/2015	Entrada	0	7,86	12,9	21	143,2	0,1	15,28	14,29	39,09	124
		Salida	0	6,82	12,9	20,9	54,2	0,06	1,48	0,49	37,9	132

En los parámetros evaluados se presentó un dato inusitado el 17 de marzo de 2015, para el parámetro de DQO, El dato negativo obedece principalmente al crecimiento acelerado de la macrófita, saturando el medio de tal manera que no se alcanzó a retirar el exceso de biomasa, lo cual permitió que se aumentaran los niveles de materia orgánica en el sistema superando el valor de entrada. Se efectuó pesaje de la biomasa cada quince días, para corroborar densidad de siembra

inicial y retirar la macrofita que estuviera en exceso con un colador, para luego disponerse en la composteras de procesamiento de abono orgánico de la granja SENA.

Tabla No. 9. Gramos de *Azolla Anabaena* en el sistema

ENSAYO	FECHA MUESTREO	PESO AZOLLA EN EL SISTEMA (gramos)
1	24/02/2015	470
2	03/03/2015	855,4
3	10/03/2015	627
4	17/03/2015	527
5	24/03/2015	512
6	27/03/2015	642

Inicialmente se observa una fase de adaptación de la macrofita, seguido por una fase donde aumenta su crecimiento aprovechando los nutrientes como el nitrógeno amoniacal para su desarrollo; en el momento que la macrofita se acerca al punto de saturación del sistema desciende su crecimiento, haciendo necesario retirar parte de la biomasa en exceso para que se recupere.

Teniendo en cuenta el comportamiento, *Azolla Anabaena* aumenta su producción de biomasa al encontrar una carga de nutrientes orgánicos, aumentando su crecimiento. Así mismo, al utilizar menor cantidad de material vegetativo el crecimiento es más acelerado, probablemente, porque el área del espejo de agua y la cantidad de nutrientes es proporcionalmente mayor, lo cual disminuye la competencia intraespecífica y aumenta la producción de biomasa.

5.2.1 Porcentaje de Crecimiento de Azolla

Tabla No. 10. Crecimiento Azolla

DIA DE SIEMBRA	PESO AZOLLA EN EL SISTEMA (gramos)	Diferencia en peso	Crecimiento gramos/día	Porcentaje de crecimiento de Azolla en el sistema
0	470	0	0	0
1	855,4	385,4	25,7	82,0
2	627	157	10,5	33,4
3	527	57	3,8	12,1
4	512	42	2,8	8,9
5	642	172	11,5	36,6
Porcentaje promedio de crecimiento				34,6

En el Biofiltro (humedal artificial) se utilizó una cobertura del 70% de la superficie con *Azolla* por periodos de quince días, este tiempo es apropiado ya que según las investigaciones, los tiempos de duplicación de esta se producen en los primeros 10 días con un área de cobertura del 75% mostrando una mayor extracción de nutrientes como N y P s (Da Silva, 2006). La macrófita muestra un comportamiento creciente, en el proceso inicial de crecimiento el efluente se encuentra con todos los nutrientes aportados por el proceso. Nutrientes como nitrógeno y fósforo que enriquecen el cuerpo de agua y evidentemente esto se ve reflejado en el crecimiento de *Azolla*.

En la Tabla No.10 se muestra como el porcentaje promedio de crecimiento para el periodo de evaluación del sistema en un 34,6% aproximadamente, este comportamiento podría estar influido por la cantidad de nutrientes que contiene el medio donde se desarrolla *Azolla*, esto puede ser soportado con el análisis de los parámetros fósforo, nitrógeno y materia orgánica los cuales son los más influyentes en el desarrollo de *Azolla*. La concentración de los parámetros estuvo por debajo de los requerimientos que la macrófita *Azolla* necesita para su óptimo crecimiento; así lo han demostrado estudios de la tasa relativa de crecimiento donde se afirma que *Azolla* puede crecer bien en las aguas residuales domésticas si hay suficiente fósforo (Costa et al.,1999) este hecho hace que *Azolla* sea viable como alternativa para el tratamiento de aguas residuales por sus ventajas en comparación con otras herbáceas angiospermas (Brix y Schierup, 1989. Korner Vermaat, 1998; Lambers y Poorter, 1992. Citados por Forni et al., 2001), bajo costo y fácil mantenimiento, sin embargo para efluentes de procesos de ganadería porcina no se recomienda dado la baja eficiencia en la remoción de los nutrientes.

En este estudio *Azolla* presentó un crecimiento de acuerdo a los días de siembra y retiro del exceso de biomasa del sistema en 25,7 g/día, 10,5 g/día, 3,8 g/día, 2,8 g/día, y 11,5 g/día, en promedio de 10,8 g/día, haciendo la comparación con la tasa de crecimiento obtenida por García (2012), quien trabajo con *Azolla* y obtuvo un crecimiento similar de 12.29 g/d considerado poco favorable, estos valores estuvieron influenciados posiblemente por la baja disponibilidad de nutrientes en el efluente (Quintero y Ferrara 1998, 2000; citados por Espinoza y Gutiérrez, 2006), lo que interfiere en el óptimo progreso de crecimiento de *Azolla*, además de algunos factores ambientales importantes para el desarrollo de la macrófita.

5.2.2 Temperatura

La temperatura en la entrada y la salida del Biofiltro presentó pequeñas variaciones durante el periodo muestreo en el cual se registraron valores entre 19,1 y 24.8 °C, esto se puede apreciar en el grafico 1; sin embargo el análisis factorial demuestra que la T° no tuvo incidencia significativa en el comportamiento general del sistema.(P> 0.05 ver anexo).

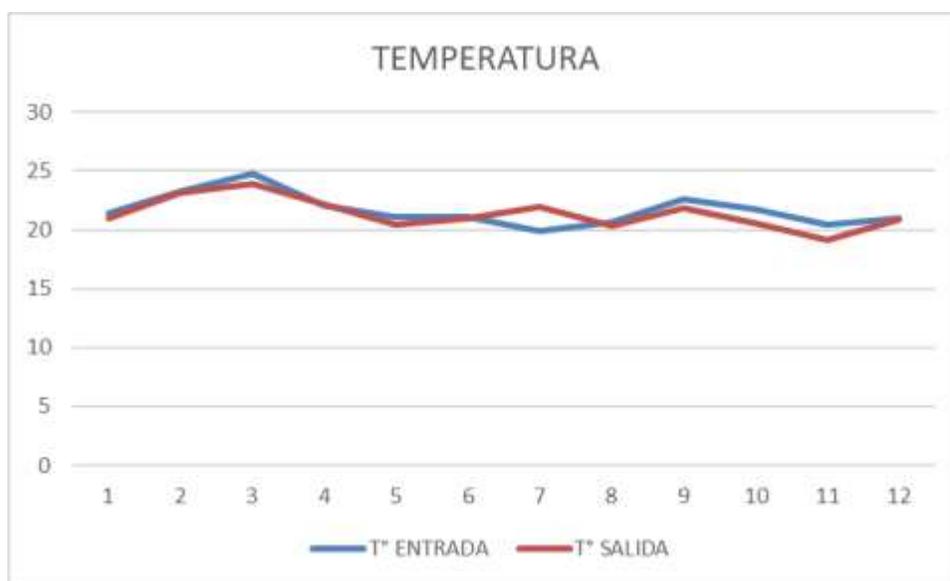


Grafico 1. Comportamiento temperatura entrada y salida del sistema

Cary y Weerts (1992) estudiaron el comportamiento de *Azolla* en ambientes acuáticos demostrando que esta macrófita se desarrolla satisfactoriamente en este medio cuando se tienen temperaturas que se encuentran entre 20 y 25°C; además Romero (2004) afirma que el aumento de temperatura del agua afecta la disposición de oxígeno generando mayor competencia entre los diferentes organismos que conforman la vida acuática del lugar, para el caso del estudio de *Azolla* con lagunas en serie para efluentes provenientes de procesos piscícolas, la temperatura media registrada en el sistema $19,4^{\circ}\text{C} \pm 1,285$ se encuentra dentro del rango establecido de lo que se puede deducir que el comportamiento de este parámetro fue favorable durante el periodo de muestreo. Evaluando este parámetro según el Decreto 1594 de 1984 el efluente, se puede descargar directamente al cuerpo de agua receptor ya que la temperatura es menor a 40°C.

5.2.3 Potencial de hidrógeno (pH).

El pH a través del biofiltro no cambió significativamente y tuvo una tendencia decreciente como se puede observar en el grafico 2. El valor promedio obtenido fue de $5,85 \pm 1,88$ unidades de tal modo

que este efluente no causará impactos negativos sobre un cuerpo de agua receptor; debido a que este valor se encuentra dentro del rango permitido por la normatividad colombiana como lo indica el artículo 72 del decreto 1594 de 1984 el cual especifica que todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, con un rango en cuanto a potencial de hidrógeno de 5 a 9 unidades.

Igualmente tomando como referencia este rango y compararlo con la Resolución 631 de 2015 que nos establece los parámetros y valores permisibles; el pH en la salida del Biofiltro se mantiene en un rango cercano a 6 unidades, valores que se mantienen dentro del rango permisible.

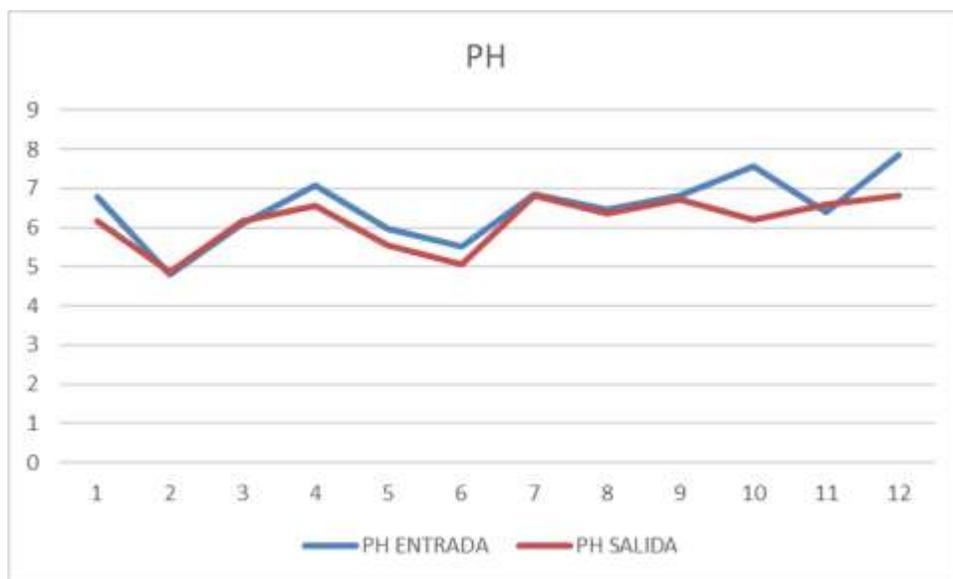


Grafico 2. Comportamiento Potencial de Hidrógeno entrada y salida del sistema

El comportamiento de pH durante el periodo de muestreo varió de tal forma que se encontraron valores mínimos de 4.8 unidades; estas reducciones del pH en el período de muestreo se debieron posiblemente al aumento de materia orgánica en forma de hojas y raíces de *Azolla* muertas (Da Silva, 2006).

Finalmente es de gran importancia mencionar que el sistema de lagunas de *Azolla* baja gradual y levemente el pH apreciándose este comportamiento en el grafico 2, fenómeno que pudo estar influenciado por el aumento de materia orgánica ocasionada por la degradación de *Azolla* (Da Silva, 2006).

5.2.4 Oxígeno Disuelto (O.D)

El oxígeno disuelto promedio en la entrada del Biofiltro fue de 1,6 mg/L y en la salida el promedio fue de 1,97 mg/L se registra un aumento leve. Las diferencias entre los dos son positivas como se puede observar en el Grafico 3. Ya que se recupera el oxígeno disuelto del efluente en cerca de 0.4 mg/L.

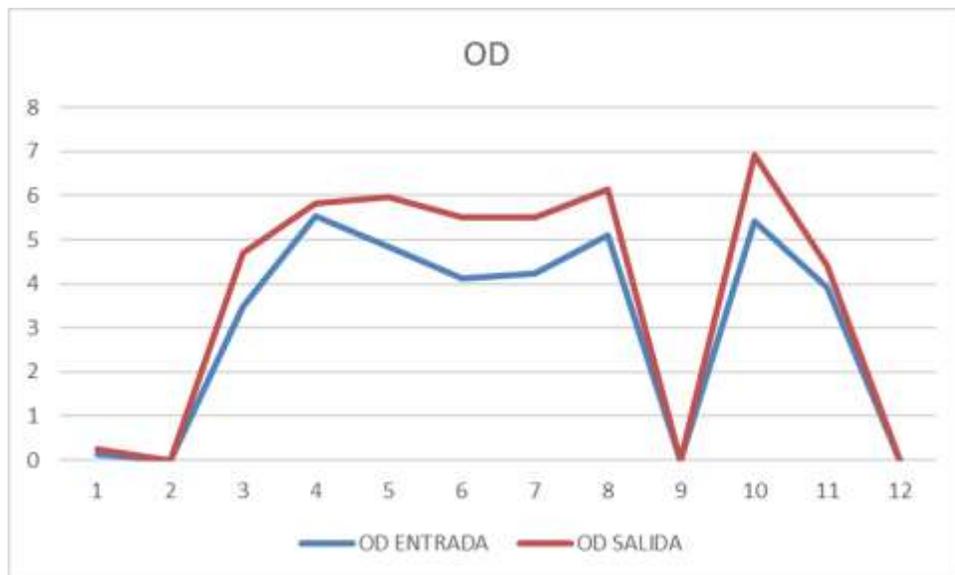


Grafico 3. Comportamiento Oxígeno Disuelto entrada y salida del sistema.

Las concentraciones de oxígeno también pueden variar de acuerdo al comportamiento de *Azolla* ya que esta evita el paso de iluminación solar directa y en consecuencia dificulta la fotosíntesis la cual está estrechamente relacionada con la producción de oxígeno (Martínez, 2008).

Según el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS (2000) en el título E, donde se refiere al tratamiento de aguas residuales, la concentración de oxígeno disuelto no debe ser menor de 1.0 mg/L, incluso en plantas de tratamiento de aguas residuales grandes con una buena operación. Si el contenido mínimo de oxígeno baja de este valor, pueden esperarse trastornos en el proceso de degradación biológica, en el caso de la investigación presente con *Azolla* se presentó un mínimo promedio del valor de oxígeno disuelto de 1,6 mg/L para el cuerpo de agua receptor según la norma RAS 2000.

5.2.5 Fósforo Total (PT)

Durante el periodo de muestreo se presentaron fluctuaciones en este parámetro encontrando valores máximos de 0.230 mg/L en la entrada del Biofiltro y máximos en la salida de 0.160 mg/L y valores cercanos a 0 mg/L o posiblemente no detectados por el método de medición utilizado. Aunque se obtuvieron variaciones altas, la prueba estadística descriptiva la varianza ($P > 0.004$ ver anexo

estadístico descriptivo P), muestra una relación de baja significancia en concordancia con los datos entre la entrada y la salida del Biofiltro.

5.2.6 Correlación fosforo entrada y fosforo salida

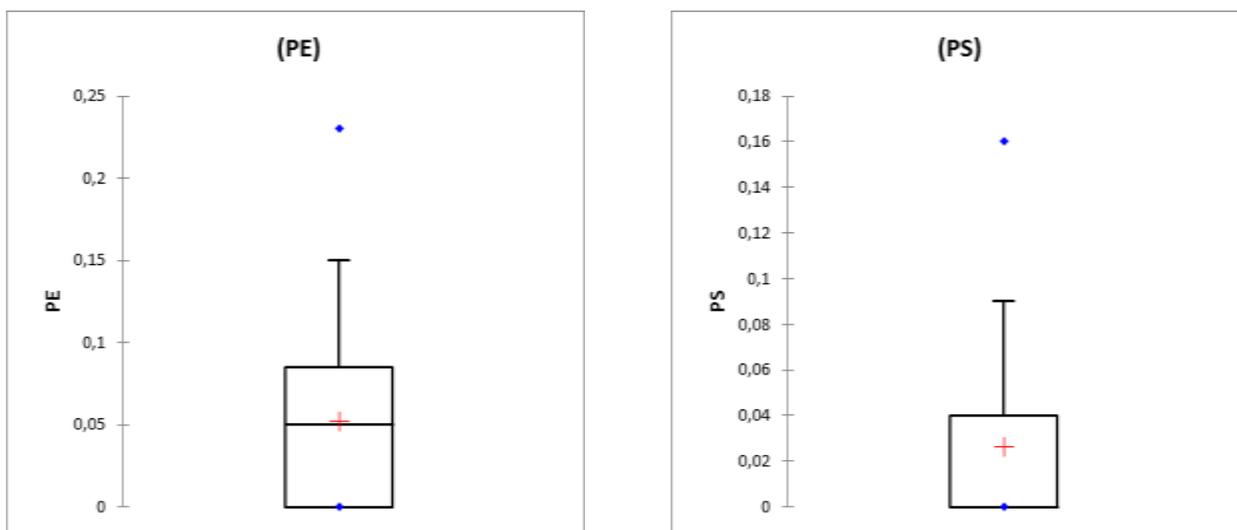


Figura 6. CORRELACIÓN FOSFORO ENTRADA Y FOSFORO SALIDA

En la Figura 6 se puede apreciar el comportamiento del fosforo dentro del biofiltro con la Azolla, en el cual se nota a nivel general que a pesar que este parámetro tiene pequeñas fluctuaciones, existe un decrecimiento a medida que el flujo pasa por el Biofiltro; este hecho se presentó debido a diferentes procesos a los cuales es sometido el fosforo total en el tratamiento natural con Azolla. Las macrófitas degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los nutrientes (Nitrógeno, Fosforo), pero también proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se fijan compuestos que generan eutrofización de las aguas (Layman, 2005). Dichos procesos generalmente están relacionados con la absorción y adsorción de nutrientes (Nitrógeno, Fósforo) por parte de las raíces de Azolla, las cuales actúan como filtro biológico tomando y removiendo sobre todo el fósforo del medio donde estas macrófitas se desarrollan.

El efluente después de entrar en el Biofiltro reduce la concentración de fósforo total considerablemente ya que este efluente sale del sistema con 0.03 mg/L en promedio. El comportamiento en la remoción del fosforo total dentro del Biofiltro, se debió posiblemente a la actividad de crecimiento Azolla, la cual toma los nutrientes necesarios (N, P) para su desarrollo.

Es importante tener en cuenta que si por motivos de escasez de agua potable en el área de influencia del estudio de lagunas en serie con Azolla y si solo se dependiera de este parámetro se pensara en retomar este efluente con fines de potabilización; los valores de fosfatos encontrados cumplirían

con los rangos establecido por la normatividad colombiana (Resolución 2115 de Junio de 2007) para la destinación de este recurso para consumo humano y doméstico, debido a que el fosfato admisible es 0.2 mg/L.

5.2.7 Correlación nitrógeno total entrada y nitrógeno total salida.

El nitrógeno total es la suma del nitrógeno presente en los compuestos orgánicos y en el amoníaco. En un medio aerobio se necesita en una proporción de carbono 100 mg/L, nitrógeno 5mg/L y fósforo 1mg/L (C100/N5/P1) para que exista crecimiento de la biomasa (Seoáñez, 2005). En el biofiltro con presencia de *Azolla pinnata* los valores promedio de nitrógeno total fueron de 2,992 mg/L.

El valor del nitrógeno total que entra al Biofiltro repta un promedio de 2,992 mg/L, y al salir del sistema es en promedio de 2.587 mg/L dando una eficiencia de remoción 13,56%, esto se debe a que ecológicamente *Azolla* durante su vida útil fija nitrógeno y cuando muere, lo confiere al agua (Montaño, 2005).

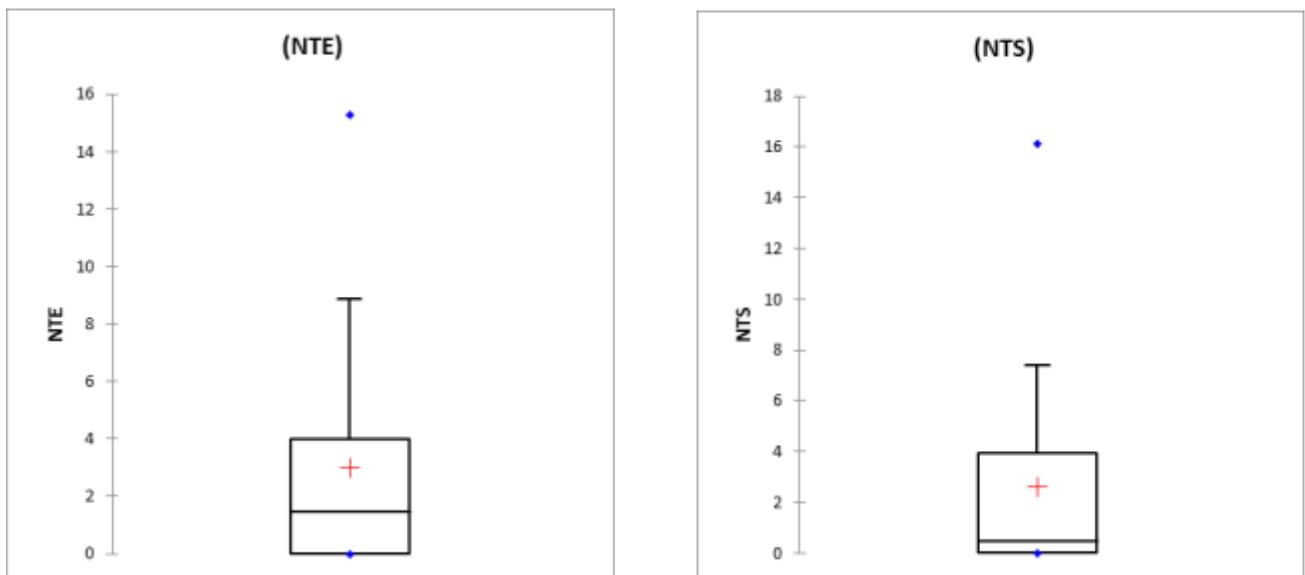


Figura 7. CORRELACIÓN NITROGENO TOTAL ENTRADA Y NITROGENO TOTAL SALIDA

Durante el periodo de ensayo se determinó que se evidencia una remoción de NT, pero en el día número 15 del ensayo los valores aumentan por lo tanto se hace necesario retirar biomasa para que el sistema no se vea afectado y siga presentando porcentajes de remoción positivos.

Aunque según el decreto 1594 de 1984 el nitrógeno se encuentra entre los valores admisibles, este parámetro puede causar detrimento sobre la calidad del agua y las diferentes formas de vida que se desarrollan dentro de este medio (FAO, 2003).

Azolla Pinnata ha sido utilizada en la limpieza de acuíferos por su habilidad de fijar N₂ y remover P de los ecosistemas (Shiomi y Kitoh, 1987; citados por Castro, 2008), es capaz de usar su propia energía fotosintética para fijar el nitrógeno atmosférico y producir amonio, este hecho hace que *Azolla* tienda a contener niveles relativamente altos de nitrógeno (Ly, 2004). De ahí que los niveles de nitrógeno hayan aumentado, posiblemente en este caso *Azolla* tomó el nitrógeno del aire lo fijó sustancialmente pasándolo al medio.

La eutrofización es el proceso natural de envejecimiento que se produce en los lagos y arroyos, proceso que se acelera por los excesos nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo (Forni et al., 2002) Como existe un aumento del 13,56% de este nutriente se puede esperar que con el tiempo exista eutrofización ya que este elemento si no es eliminado causa este fenómeno en el agua (Ferdoushi et al., 2008). Aunque *Azolla Pinnata* ha demostrado gran potencial para ser utilizada en el tratamiento de estas aguas (Sutton y Ornes, 1975. Citados por Ferdoushi et al., 2008) se evidenció que no se cumplió con el objetivo para el cual fue propuesta, esto es corroborado por Da Silva 2006 quien afirmó que *Azolla* no reduce sustancialmente nutrientes como nitrógeno y fósforo.

5.2.8 Correlación NH₃ entrada y NH₃ salida

El nitrógeno amoniacal presente en la entrada del sistema un promedio máximo de 1,88 mg/L; y al salir del sistema es en promedio de 1.419 mg/L dando una eficiencia de remoción 24,52 %, esto se debe a que ecológicamente *Azolla* utiliza el nitrógeno amoniacal como nutriente para su crecimiento, lo que explicaría el porcentaje de remoción que aunque se esperaba que fuera mayor, se podría considerar que el porcentaje de remoción fue bajo; el cual puede ser afectado por factores hidráulicos como el tiempo de retención, el tamaño del sistema; los cuales pueden afectar los porcentajes de remoción.

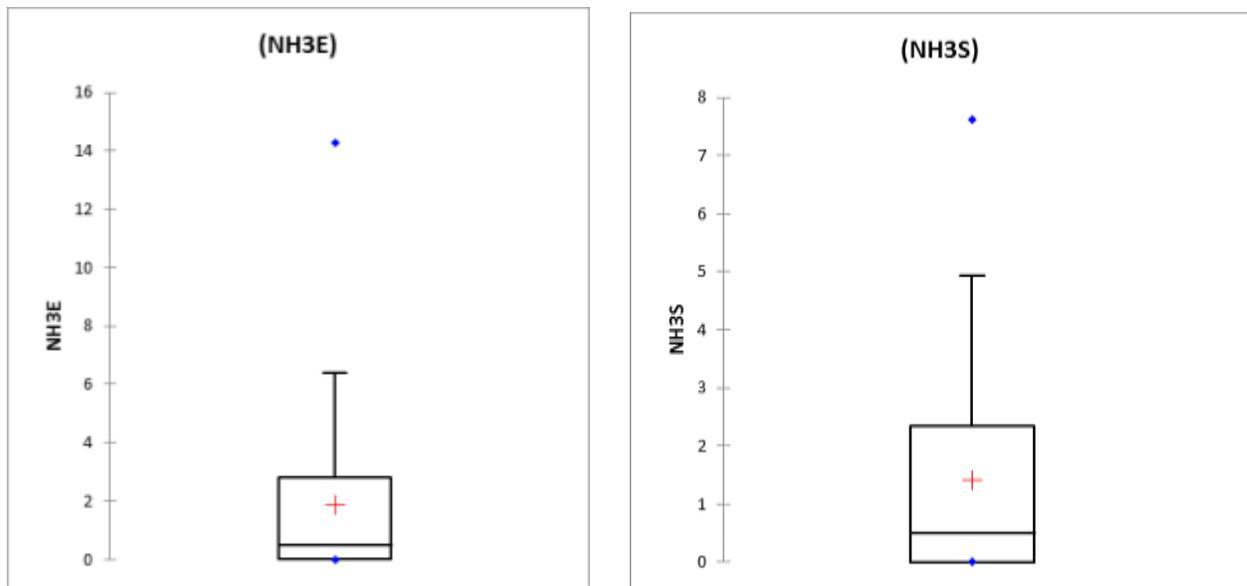


Figura 8. CORRELACIÓN NH_3 ENTRADA Y NH_3 SALIDA

Azolla Pinnata es un helecho acuático que forma simbiosis con la cianobacteria *Anabaena*, la cual vive dentro de su fronda y puede fijar de 100 a 1564 kg de N_2 /ha año (Quintero y Ferrera, 2000; citados por Castro, 2008). Debido a esto ha sido empleada en la limpieza de acuíferos por su habilidad de fijar N_2 y remover P de los ecosistemas (Shiomi y Kitoh, 1987; citados por Castro, 2008). Esta además es capaz de usar su propia energía fotosintética para fijar el nitrógeno atmosférico y producir amonio, lo que es aprovechado para cubrir sus propios requerimientos de nitrógeno; así mismo, la relación simbiótica entre el helecho y la cianobacteria permite que *Azolla* sea relativamente independiente de utilizar nitrógeno de su entorno, este hecho hace que *Azolla* tienda a contener niveles relativamente altos de nitrógeno (Ly, 2004).

5.2.9 Correlación DQO entrada y DQO salida

El comportamiento de la demanda química de oxígeno; muestra que la implementación del Biofiltro tiende a reducir la concentración de este parámetro, este proceso de remoción es de forma gradual y muestra una tendencia decreciente dentro del sistema evaluado. El valor promedio de los datos de DQO a la salida de la planta piloto fue de 41,739 mg/L, este valore según Metcalf y Eddy (1995), citados por Bolaños *et al.* (2008), tienden a patrones de contaminación baja y media respectivamente (alrededor de 0-500mg/L).

Durante el muestreo se encontraron valores máximos de DQO de 366 mg/L, los cuales pudieron estar influenciados por algas y material orgánico, pero también se encontraron valores mínimos de -

32 mg/L, los cuales se obtuvieron debido a condiciones ambientales como temperatura, pH y precipitaciones; lo que pudo influir en las características fisicoquímicas del agua.

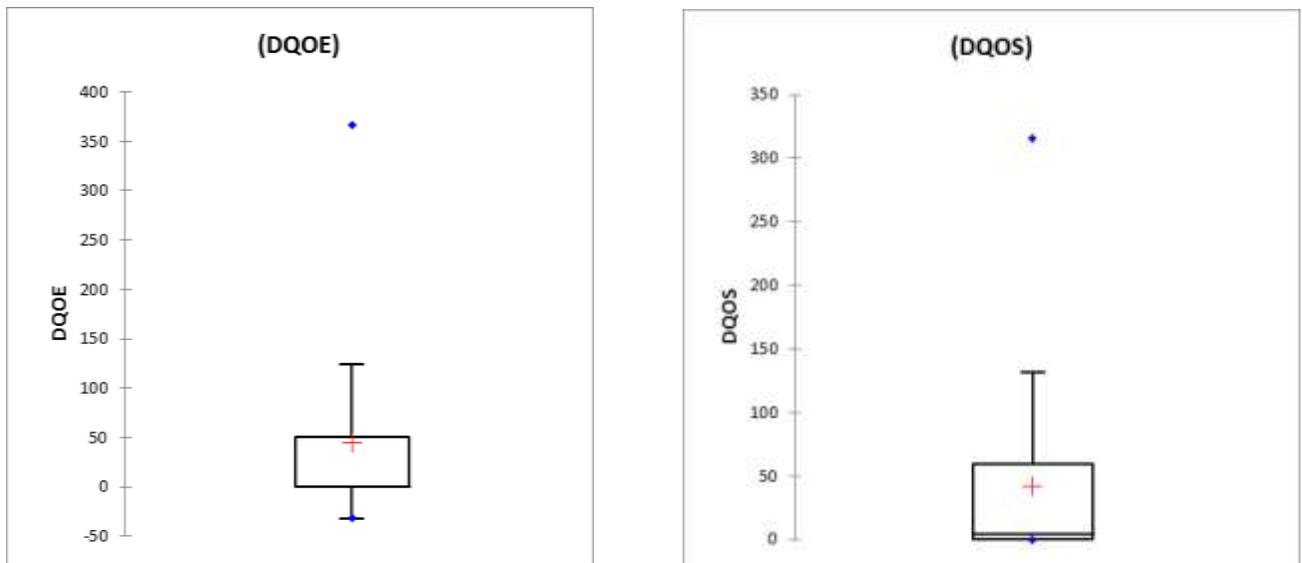


Figura 9. CORRELACIÓN DQO ENTRADA Y DQO SALIDA

En general el efluente después del proceso de tratamiento natural con *Azolla* presentó una reducción de la DQO cerca del 6 %; este porcentaje es muy bajo para el esperado y esto se debe a que se presentaban periodos de 15 días donde los valores de los parámetros fisicoquímicos aumentan, se identificaron estos periodos donde no se brinda el tiempo suficiente para que se den los procesos de degradación de materia orgánica se desarrollen de manera adecuada.

Los valores que se encontraron están por debajo del encontrado por Leal et al. (1993) quienes trabajaron con *Azolla* obteniendo un porcentaje de remoción del 44% para efluentes provenientes de porcicultura. De lo que se puede inferir que la *Azolla* se comporta mejor para la remoción de la DQO en aguas con niveles de contaminación bajos o medios.

5.2.10 Correlación DBO₅ entrada y DBO₅ salida

La DBO₅ promedio de entrada fue de 7.42 mg/L, alcanzando valores máximos de 39.09 mg/L y mínimos cercanos a 0 mg/L dentro del Sistema lo que puede indicar que este parámetro tuvo un comportamiento similar al de la DQO con bajos porcentajes de remoción ya que por los tiempos de saturación de la *Azolla* que no son lo suficientes para el desarrollo de los microorganismos que permitirían aumentar los porcentajes de remoción.

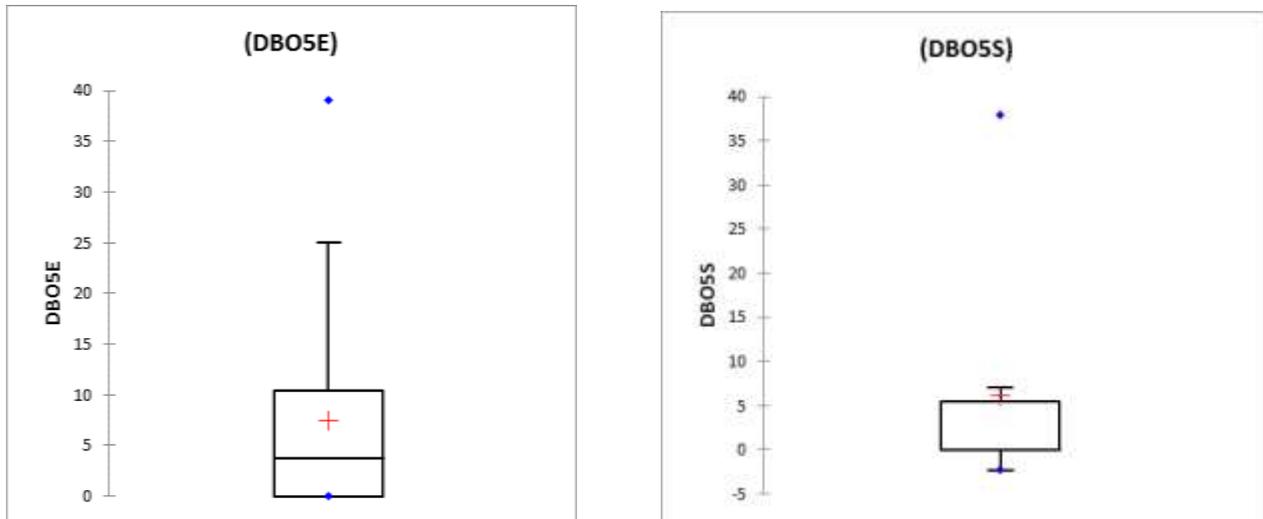


Figura 10. CORRELACIÓN DBO5 ENTRADA Y DBO5 SALIDA

La DBO₅ al salir de la planta piloto tuvo un valor promedio de 6.070 mg/L, que según Freire, 2009 indica que esta se encuentra en un rango de aguas poco contaminadas (5 a 50 mg/L); sin embargo, este efluente no es apto para su potabilización ni para reuso acuícola en caso de requerirlo para estos procesos; pero si con fines de uso agrícola o como riego de cultivos.

En cuanto a remoción *Azolla* logró llegar a reducir la demanda bioquímica de oxígeno en un 19 %; esta remoción se pueden considerar altas teniendo en cuenta que el efluente es altamente diluido y por consiguiente su tratamiento en cuanto a este parámetro (DBO₅) por las características mencionadas se hace muy difícil y costoso utilizando tratamientos convencionales.

Según Rodríguez *et al.*, 2001 investigando sobre algunas macrófitas para la depuración de agua residuales domésticas encontró que *Azolla* puede remover cerca del 70% de la DBO₅ lo que indica que la *Azolla* se comportó de una manera bastante eficiente a medida que la cantidad de nutrientes en el medio aumentó, esto puede ser visto positivamente como un mecanismo viable en caso de tratarse de eliminar solo este parámetro; gracias a las altas tasas de remoción que se puede lograr con este sistema.

5.2.11 Crecimiento de la biomasa de *Azolla* durante el periodo de evaluación del sistema.

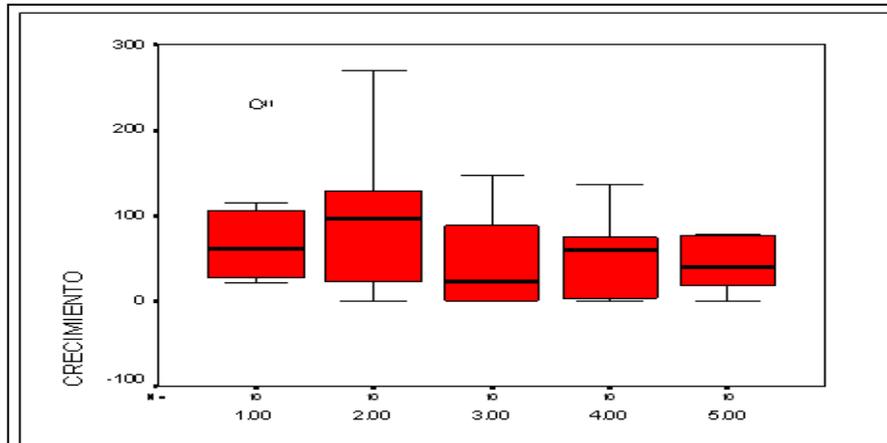


Figura 11. Diagrama de cajas para crecimiento de biomasa de *Azolla*

En la primera fase del inicio del sistema se observa una fase de adaptación, seguido por una fase donde aumenta su crecimiento aprovechando los nutrientes como el nitrógeno amoniacal para su desarrollo; en el momento que la macrofita se acerca al punto de saturación del sistema descende su crecimiento, haciendo necesario retirar parte de la biomasa en exceso para que se recupere.

Teniendo en cuenta el comportamiento *Azolla Anabaena* aumenta su producción de biomasa al encontrar una rica carga de nutrientes orgánicos, encontrando el mayor crecimiento. Así mismo, al utilizar menor cantidad de material vegetativo el crecimiento es más acelerado, probablemente, porque el área del espejo de agua y la cantidad de nutrientes es proporcionalmente mayor, lo cual disminuye la competencia intraespecífica y aumenta la producción de biomasa.

5.2.12 Contaminación vs crecimiento de biomasa.

La correlación entre la masa de *Azolla* con la remoción de DQO, se esperaría que la remoción hubiese sido mayor; pero se encuentra una relación entre el aumento de la biomasa y la remoción de materia orgánica, aunque al controlar los parámetros fisicoquímicos observamos que cuando la macrofita se acerca a su punto de saturación la eficiencia baja.

Con respecto a la correlación entre la masa de *Azolla* con la remoción de DBO encontramos un comportamiento similar al de la DQO solo que sobre este parámetro se evidencia un poco más de eficiencia

La correlación entre la masa de *Azolla* con la remoción de NT se observa una disminución de la concentración de este parámetro ya que la azolla tiene la capacidad de incorporar el nitrógeno en su sistema, retirándolo del vertimiento.

La correlación entre la masa de *Azolla* con la remoción de NH₃ se observa una disminución de la concentración de este parámetro ya que la macrófita utiliza el nitrógeno amoniacal para su desarrollo, contribuyendo al aumento de la biomasa y disminución del NH₃.

5.2.13 Eficiencias de remoción de DBO₅

	DBO ₅ kg /mes											
Entrada	0,054	0,051	0,026	0,008	0,013	0,019	0,011	0,009	0,041	0,017	0,038	0,084
Salida	0,051	0,056	0,015	0,007	0,007	0,009	0,006	0,005	0,037	-0,005	0,031	0,082
% Remoción	5,63	-9,68	41,0	9,97	46,2	55,7	44,1	44,38	9,697	127,9	18,0	3,04

En cuanto a remoción *Azolla* logró llegar a reducir la demanda bioquímica de oxígeno hasta un 33,35% en promedio; se pueden considerar altas teniendo en cuenta que el efluente es altamente diluido. Según Rodríguez et al., 2001 investigando sobre algunas macrófitas para la depuración de agua residuales domésticas encontró que *Azolla* puede remover cerca del 70% de la DBO₅ lo que indica que la *Azolla* se comportó en promedio de una manera positiva a medida que la cantidad de nutrientes en el medio aumentó.

Por el comportamiento observado respecto al color, se encontró que la luz es un factor limitante en el desarrollo adecuado de *Azolla*, por lo tanto éste debe ser controlado para garantizar su desarrollo. Bajo ciertas condiciones, existe un pigmento de antocianina, que le confiere al helecho un color entre rojiza y carmelita. La coloración mencionada está asociada con la sobre fertilización del reservorio acuático, mucha contaminación o también un exceso de luz solar. La azolla prefiere más un lugar sombreado que estar a plena luz solar (Ly, 2004). El efecto de la coloración también fue citado por Carrapiço (2001) quien mencionó que *Azolla* en condiciones favorables, tales como temperaturas altas, caudal reducido y disponibilidad de nutrientes, especialmente el fósforo, se multiplica rápidamente dando origen a tapetes que cubren la superficie del agua normalmente de

color verde-rojo. También es de gran importancia mencionar que esta suma de pigmentos fotosintéticos principales permite al organismo simbiótico ampliar el rango de utilización de la energía luminosa aprovechable y es probable que esta característica sea la responsable del crecimiento rápido y la gran acumulación de biomasa en períodos cortos (Lenti et al., 2002).

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales presentadas durante la investigación con lagunas de Azolla; es importante verificar que esta macrófita tuvo un crecimiento bajo por lo que al referirse a Liu et al. (2007) en su artículo estudios sobre el tratamiento de la orina por tratamiento biológico con Azolla y oxidación fotocatalítica afirman que Azolla se multiplica rápidamente aumentando su biomasa en 4 o 5 días con parámetros ambientales de temperatura de 25° C y un 80% de humedad relativa.

Aparte de los nutrientes anteriormente mencionados, condiciones ambientales óptimas como temperatura, grado de luminosidad y humedad, entre otras influyen en el buen desarrollo de *Azolla*, ya que esta es sensible a la radiación solar como afirman Mostafa y Hossan (2006), además de otros factores determinantes en el desarrollo de la *Azolla* como la sequía y la salinidad los cuales también pueden inhibir su tasa de crecimiento (Mostafa y Hassan, 2006).

5.3 Prueba No Paramétrica (Kruskal, Wallis, Fridman)

Tabla 6. Resultado prueba no paramétrica Kruscal, Wallis, Fridman.

Estadísticos descriptivos:								
Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica	
DQOE	23	0	23	-32,000	366,000	44,174	87,151	
DQOS	23	0	23	0,000	316,000	41,739	72,288	
PHE	23	0	23	0,000	8,590	6,034	2,085	
PHS	23	0	23	0,000	7,110	5,658	1,881	
CONDE	23	0	23	0,000	27,600	15,287	8,122	
CONDS	23	0	23	0,000	25,200	13,287	7,335	
T°E	23	0	23	0,000	24,800	19,600	6,394	
T°S	23	0	23	0,000	23,900	19,117	6,154	
WAZOLAE	23	0	23	0,000	855,400	228,913	301,351	
WAZOLAS	23	0	23	0,000	575,000	197,722	255,134	
SSE	23	0	23	23,000	172,300	85,735	42,878	
SSS	23	0	23	4,500	128,700	46,053	28,565	
PE	23	0	23	0,000	0,230	0,052	0,062	
PS	23	0	23	0,000	0,160	0,026	0,039	
ODE	23	0	23	0,000	5,540	1,599	2,268	
ODS	23	0	23	0,000	6,930	1,967	2,767	
DBO5E	23	0	23	0,000	39,090	7,492	10,624	
DBO5S	23	0	23	-2,260	37,900	6,070	10,525	
NTE	23	0	23	0,000	15,280	2,992	4,139	

NTS	23	0	23	0,000	16,130	2,587	3,848	
NH3E	23	0	23	0,000	14,290	1,882	3,257	
NH3S	23	0	23	0,000	7,620	1,419	1,984	
Prueba de Friedman:								
Q (Valor observado)	256,206							
Q (Valor crítico)	32,671							
GL	21							
valor-p (bilateral)	< 0,0001							
alfa	0,05							
Interpretación de la prueba:								
H0: Las muestras vienen de la misma población.								
Ha: Las muestras no vienen de la misma población.								
Puesto que el valor-p computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0,05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.								
El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es inferior al 0,01%.								

6. CONCLUSIONES

El sistema de tratamiento con *Azolla Pinatta* no removió nitrógeno, por el contrario lo incrementó al llegar a su estado de saturación; situación que se puede considerar negativa para un sistema de tratamiento que buscaba mejorar la calidad del efluente con respecto a este parámetro.

En cuanto a fósforo total, el sistema contribuyó a la remoción del mismo, lográndose una eficiencia global superiores al 50%.

La remoción de DQO y DBO₅; se considera baja con respecto a lo esperado; según lo encontrado estudios realizados con *Azolla Pinatta*, donde reportan un porcentaje de remoción del 44% para la DQO (Leal et al. (1993)) y Rodríguez et al., 2001, quien reporta un porcentaje de remoción del 70% para la DBO₅. sin embargo se pueden considerar este tipo de tratamiento para efluentes agropecuario con bajos niveles de concentración de materia orgánica.

Azolla Pinnata creció en un porcentaje del 34,6% que corresponde al equivalente de crecimiento de 10,8 gramos por día, bajo los factores ambientales propios del lugar, por lo que se puede inferir que *Azolla* puede sobrevivir en otros sitios con características similares, sin embargo se considera que no es efectiva para el tratamiento dado el bajo crecimiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos con la implementación de Biofiltros con *Azolla Pinnata* para la eliminación de contaminantes en efluentes de procesos productivos, muestran que *Azolla Pinnata* creció removiendo favorablemente parámetros como fosforo, sólidos suspendidos totales.

7. RECOMENDACIONES

Es necesario hacer otros tipos de investigaciones referentes a tratamientos naturales de aguas residuales provenientes de proceso agropecuario debido a que en Colombia la información es muy escasa y no existen datos de la utilización de macrófitas acuáticas para la eliminación de nutrientes.

Aunque la remoción en general fue aceptable con este tipo de tratamientos naturales (Biofiltración con *Azolla*), se recomienda que el efluente del sistema no sea recirculado, dado que este no cumple con los requerimientos óptimos para el proceso productivo.

Debido a que el tratamiento con *Azolla* en la granja del Centro Agropecuario no tuvo los mejores resultados, dado que incrementó los niveles de nitrógeno, se recomienda buscar otra alternativa de tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos productivos agropecuarios.

Para reutilizar el efluente se se podría realizar una combinación con un medio acuático que permita mejorar la calidad de agua, no apta para consumo.

Realizar más de 3 réplicas dado que la entidad que financio el proyecto de investigación logro destinar parte del presupuesto para el desarrollo del mismo y por tanto no se pudieron llevar cabo otras replicas; por tal motivo se desarrolló en el espacio y con los recursos que se contaba en el momento de ejecución, otro aspecto fue la disponibilidad de espacio ya que se buscó aprovechar las condiciones que ofrecía el lugar donde se instaló el sistema como la pendiente, cercanía del punto de generación del vertimiento y distancia al laboratorio.

Listas de Referencias

- ADALBERTO, Paulo. MASSABNI, Antonio. OULART, Antonio. MONTI, Rubens. LACAVAL, Pedro. (2004). Efeito do fósforo na captação de minerais e pigmentação de *Azolla* Caroliniana Willd (Azollaceae). *Revista Brasil. Bot.* V.27. No. 3, Brasil. Pág.581-585.
- AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS. EPA (1993). Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales. Dimensión de manejo de aguas. Región 6. Texas.
- ANDROVETTO Eugenio. (2003). Diseño y operación de un modelo para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la granja porcina de la facultad de medicina veterinaria y zootecnia de la universidad de san Carlos De Guatemala. Escuela Regional De Ingeniería Sanitaria Y Recursos Hidráulicos (Eris). Guatemala
- ARORA, Anju. SINGH, P.K. (2002). Comparison of biomass productivity and nitrogen xing potential of *Azolla* SPP. National Centre for Conservation and Utilization of Blue Green Algae, Indian Agricultural Research Institute, India..Pag.175-176
- ARORA, Anju. SAXENA, Sudhir.. (2005). Cultivation of *Azolla microphylla* biomass on secondary-treated Delhi municipal effluents. Centre for Conservation of Blue Green Algae, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi, India. Pág. 61, 62.
- ARIAS, Andrés f. (2008). Estadísticas sector agropecuario. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá D.C. 2 de abril de 2008. Adaptado de tabla pag. 40.
- BACCARIN, A. CAMARGO, A. (2005). Characterization and evaluation of the impact of feed management on the effluents of nile tilapia (*oreochromis niloticus*) culture. *brazilian archives of biology and technology*, v.48, Brasil.Pág. 81-90.
- BOYD, Claude. (2003) Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. *Aquaculture*, v.226. Auburn, USA. pág.101-112.
- BOLAÑOS, Sandra. CASAS, Juan Carlos .AGUIRRE, Néstor. (2008) Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las *macrofita pistia stratiotes* y *egena densa* en un sistema batch. Universidad de Antioquia. *Revista Gestión y Ambiente*. V.11. No. 2. Medellín, Colombia. Pág.39-41.

- CARY, P. WEERTS, P. (1992). Growth and nutrient composition of *Pinnata r. Brown* and *Filiculoides Lamarck* as affected by water temperature, Nitrogen and Phosphorus supply, light intensity and pH. aquatic botanic. Pàg. 163.
- CASTRO, Luis. DELGADILLO, Julian. FERRERA, Ronald. ALARCON, Alejandro.(2008). Phenanthrene dissipation by *Azolla Caroliniana* utilizing bioaugmentation with hydrocarbonoclastic microorganisms. VOL. 33, N° 8, pág. 60, 61.
- CARRAPICO, F. (2011). *Azolla* em Portugal. Instituto da água. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. En línea: <http://azolla.fc.ul.pt/documents/Azolla Portugal. pdf>. Visitado Julio de 2015.
- CHAUX, Guillermo (2011). Evaluación de un sistema de lagunas de *Azolla Pinnata* para el tratamiento de efluentes de producción de tilapia, Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Santiago de Cali. Colombia.
- COLOMBIA. Los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 1594 de 1984 (Junio 26). Por el cual se reglamenta el Título I de la ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III – Libro II del Título III de la Parte II Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto al uso del agua y residuos líquidos. Diario oficial. Bogotá, D.C, 1984. N°. 36700.
- COLOMBIA. Los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 2115 de 2007 (Junio 22). 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. por los Decretos-ley 205 de 2003 y 216 de 2003, los artículos 3°, 8° parágrafo 1°, 9° parágrafo 4° y 14 del Decreto 1575 de 2007. Diário oficial. Bogotá, D.C.2007.
- CONSEJO NACIONAL DE POLITICA ECONOMICA Y SOCIAL (CONPES) (2002). Acciones Prioritarias y Lineamientos Para La Formulación Del Plan Nacional De Manejo De Aguas Residuales. Documento 3177. Bogotá DC.
- COSTA Lourdes. SANTOS Conceição. CARRAPIÇO Francisco. (1999) Biomass characterization of *Azolla Filiculoides* grown in natural ecosystems and wastewater. Biology. Ecology and management of aquatic plants. Portugal. Pág. 323–327.

- DE OLIVEIRA, Cassiano. (2005). Eficiência De Leito De Macrófitas Como Unidade De Polimento De Efluente De Indústria De Aditivos Para Ração. Universidad Estadual De Campinas. Facultad De Ingeniería Agrícola. Brasil. Pág. 1, 5, 15, 17, 22.
- ESCALANTE Violeta, GARZÓN Marco. (2010). Opciones de tratamiento para aguas residuales de tres granjas porcícolas. Instituto mexicano de tecnología del agua. Ingeniería agrícola y biosistemas. México.
- EPA. (2000). Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Environmental Protection Agency. EPA/625/R-99/010. Ohio. Pág. 12-20, 30-50.
- ECOS de economía. (2004). Saneamiento hídrico en Colombia: instituciones y situación actual. Revista no. 18. pág. 77.
- FERDOUSHI, Zannatul. HAQUE, Farhana. KHAN, Saleha, HAQUE Mahfuzul. (2008). The effects of two aquatic floating macrophytes (Lemna and Azolla) as biofilters of nitrogen and phosphate in fish ponds. *turkish journal of fisheries and aquatic sciences* 8. Bangladesh. Pág. 253-258.
- FERNANADEZ, J. DE MIGUEL, E. DE MIGUEL, J. CURT, M. (2004). Manual de Fitodepuración, filtros de macrofitas en flotación. Nuevos filtros verdes de macrófitas en flotación para la cuenca mediterránea. Proyecto Life. Capítulo 5. Madrid. Pág. 61-77.
- FORNI, C. CHEN, J. TANCION, I. GRILLI, M. (2001). Evaluation of the fern Azolla for growth, Nitrogen and Phosphorus removal from wastewater. *Fujian - China* .vol. 35. No. 6. Pág. 1592–1598.
- FARAHBAKSHAZAD, N. MORISON, G. SALATI, E. (2000). Nutrient removal in a vertical upflow wetland in Piracicaba. v.29. Brasil. p.74-77.
- GARCIA ZARELA. (2012). “Comparación Y Evaluación De Tres Plantas Acuáticas Para Determinar La Eficiencia De Remoción De Nutrientes En El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas”. Universidad Nacional de Ingeniería.
- GREENWAY, M. (2006). The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia. *Ecological engineering*, v.25, Australia. pág.501-509.
- HADAD, H. MAINE, M.; BONETTO, C. (2006). Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Chemosphere*, v.63.p.1744-1753.

- LAYMAN. (2005). Nuevos filtros verdes con Macrofitas en flotación “*Macrophytes*”. pág. 3,6.
- LÓPEZ, E, *Et. Al.* (2012): Caracterización Y Estudio Hidrodinámico De Un Biofiltro. Unidad de Estudios Avanzados y Edificio Polivalente, Universidad de Aguas Calientes. México. 13 seminarios de investigación.
- LÓPEZ Cristián. (2009). Modelación de procesos de tratamiento de purines de cerdo. Fraccionamiento de materia orgánica. Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería civil. Santiago de Chile.
- MAGAÑA Aldo; Drucker Adam (1995). Sistema de depuración de aguas residuales porcícolas para granjas de 20-80 vientres. Facultad de ingeniería de la UADY.
- MARTÍNEZ Macol; et al. (2015). Evaluación de un sistema de biorremediación de aguas residuales porcícolas en la finca el porvenir, vereda suncunchoque, sector la laja, ubate – cundinamarca, para su reutilización con fines agroambientales. Corporación Universitaria Minuto De Dios. Facultad de ingeniería. Ingeniería agroecológica Bogotá D.C., Colombia.
- METECALF., y EDDY., (1995), ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización, 3 a., ed., Madrid, España, Pág. 45 – 61.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2006). Lineamientos y recomendaciones para el programa de buenas prácticas pecuarias para el subsector Porcícola colombiano en el marco de las evaluaciones ambientales estratégicas según metodología del departamento nacional de planeación.
- MONTAÑO. Mariano. Estudio de la aplicación de Azolla Anabaena como bioabono en el cultivo de arroz en el Litoral ecuatoriano. Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales (ICQA). Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Revista Tecnológica ESPOL, Vol. 18, N. 1. 2005. Guayaquil, Ecuador .Pág. 147-151.
- OJEDA, E, *Et. Al.* (2000): Informe Nacional Sobre La Gestion Del Agua En Colombia Recursos Hídricos, Agua Potable y Saneamiento. En:
www.censat.org/Documentos/Agua/Remendar_Agua.pdf
- PAEZ, Federico. MONTARO, Yovani. BOJORQUEZ, Humberto.(1990). Intercambio de agua, fósforo y material suspendido entre el sistema lagunar del puerto de mazatlán y las aguas

costeras adyacentes. México. Revista internacional. Contaminación ambiental .Pág. 6:19-32.

POT. Plan de ordenamiento territorial municipio 2002-2012.Municipio de Popayán. Secretaria de planeación. Mapa de uso potencial del suelo. Cartografía rural.escala1:50000.elaborado octubre de 2001.plano R 30/56.

RECALDE Patricia, ARAYA Juan Diego. (2006) Diseño De Tecnologías Para La Descontaminación De Aguas Residuales En Sistemas Agropecuarios. Universidad Earth. Costa Rica.

RODRÍGUEZ C, DÍAZ M, GUERRA L, HERNÁNDEZ. (2001). Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. Centro de investigaciones hidráulicas. Facultad de Ingeniería Química. Instituto superior politécnico "José a. Echeverría la habana, cuba.2001. pág. 1,3.

ROMERO, Jairo Alberto. (2004). Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de Ingeniería Ambiental, P. ISBN: 958-8060-13-3.

REGLAMENTO TECNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO. RAS-2000. Sección II. Título E. Tratamiento de Aguas Residuales. Noviembre 2000. Bogotá, D.C.

Sistema de tratamientos de aguas residuales. Sistemas Alternos De Tratamiento De Aguas Residuales pág. 3. En: <http://filtrosyequipos.com/GUEST/residuales/sistemasalternos6.pdf>

SPELLMAN, F.R. (2002). Coliforms in microbiology for water/wastewater operators, chapter 12. technomic publishing company, inc. Lancaster, Pennsylvania. pág. 163-167.

Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 20th, Edic. APAPH, AWWA, WEF. 1998.

WATER AN SANITATION PROGRAM, (2006) COSUDE, Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo. Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades.

VALENCIA, Eduardo; et al.(2009). Recuperación parcial del concentrado de la porquinaza, una alternativa ambiental y económica. Facultad de Ingeniería. Universidad Surcolombiana. Revista ingeniería y región vol: 6 no. 1

VELIZ E, *Et. Al.* (2009) Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica Revista CENIC Ciencias Biológicas, Vol. 40, No. 1, 2009.

ANEXOS

Anexo A. Formato cadena de custodia de campo

FORMATO CADENA DE CUSTODIA CAMPO		
NOMBRE DE LA ESTACION: HUMEDAL – Biofiltro con Azolla		
UBICACIÓN: Centro Agropecuario Granja SENA	NORTE: X	ESTE:
FECHA	HORA	TIPO DE MUESTRA: compuesto
INSTITUCION O EMPRESA: Centro Agropecuario SENA		MUESTREADO POR: Katherine Huetio Mauricio Ortiz
MUESTRA PARA:		CAUDAL:
TEMPERATURA: 21°C	pH: 8.8	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA:
COLOR: Amarillo	OLOR: f	ASPECTO:
DESCRIPCION DE LA FUENTE:		
DESCRIPCION DE LA MUESTRA:		
CONDICIONES CLIMATICAS:		

Anexo B. Formatos cadena de custodia

 FORMATO CADENA DE CUSTODIA TRANSPORTE																					
REPORTAR A: Empresa: _____ Dirección: _____ Contacto: _____ Teléfono: _____				FACTURA A: Empresa: _____ Dirección: _____ Contacto: _____ Teléfono: _____				REQUERIMIENTOS DE ANÁLISIS				Uso solo laboratorio Fecha: _____									
Nombre del Responsable de Muestreo _____ Firma _____				TIPO DE MUESTRA				N° de envase				Muestra sellada Si/No Intacto Si/No Sección fecha N° Registro de Laboratorio (uso solo laboratorio)									
Fecha	Hora	Compuesta	Puntual	Identificación de las Muestras	A/G IL	500ml															
Tiempo de análisis				100% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/>																	
Enviado por:				Fecha	Hora	Recibido por:				Fecha	Hora	Observaciones: Firma: _____ C.C. _____									

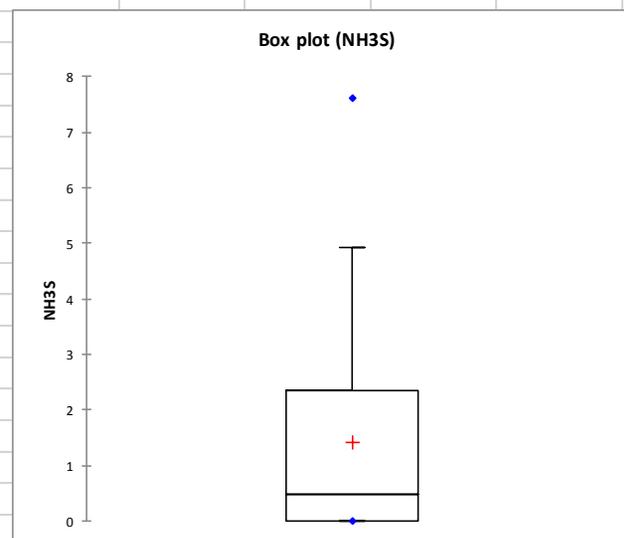
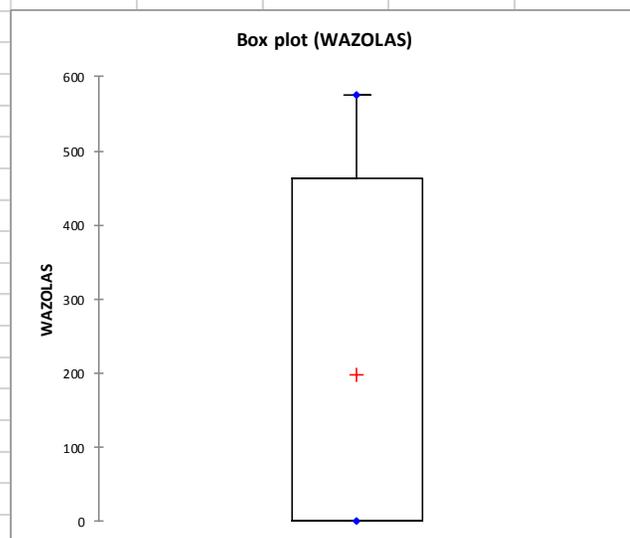
Anexo C. Datos obtenidos en campo

DQOE	DQOS	PHE	PHS	CONDE	CONDS	T°E	T°S	WAZOLAE	WAZOLAS	SSE	SSS	PE	PS	ODE	ODS	DBO5E	DBO5S	NTE	NTS	NH3E	NH3S
202	64	6,79	6,15	18	12,4	21,4	21	430,6	430,6	26,4	26,4	0,15	0,16	0,12	0,26	25,02	23,61	6,9	3,94	6,41	2,96
52	58	4,79	4,87	13,4	7,2	23,2	23,1	0	0	49,5	18,3	0,12	0,09	0	0	23,76	26,06	5,91	6,9	3,94	4,93
62	88	6,1	6,15	15,4	10,4	24,8	23,9	855,4	574	42,6	4,5	0,11	0,04	3,47	4,69	11,96	7,05	4,44	3,94	0,49	1,97
42	26	7,08	6,55	16,6	8,6	22,1	22,2	0	0	61,5	14	0,07	0,04	5,54	5,82	3,71	3,34	1,48	1,97	0,99	1,97
48	4	5,97	5,56	2	7,9	21,1	20,4	627	575	23	31,8	0,05	0,04	4,85	5,96	5,94	3,19	3,45	0,49	2,96	0,49
8	50	5,5	5,06	17,1	14,9	21,1	21	0	0	63,5	35,7	0,06	0,03	4,12	5,5	8,91	3,94	1,48	3,45	0,99	2,96
-32	122	6,84	6,81	16	13,2	19,9	22	527	543	48	37	0,07	0,03	4,24	5,52	5,05	2,82	8,87	7,39	0,49	2,22
30	26	6,44	6,37	13,7	11,5	20,6	20,3	0	0	61	33,8	0,07	0,01	5,11	6,14	4,01	2,23	3,58	4,93	3,14	3,58
20	60	6,8	6,7	11,1	12,3	22,6	21,8	470	512	80	31,4	0,06	0,03	0	0	19,08	17,23	3,14	16,1	2,69	7,62
366	316	7,57	6,21	13,6	12,9	21,7	20,5	0	0	135	86,6	0,23	0	5,41	6,93	8,08	-2,26	10,8	5,91	4,44	0,99
94	14	6,4	6,6	8,6	7,4	20,4	19,1	642	472	148	129	0,11	0,07	3,92	4,42	17,7	14,5	3,45	2,96	2,46	2,46
124	132	7,86	6,82	12,9	12,9	21	20,9	0	0	143	54,2	0,1	0,06	0	0	39,09	37,9	15,3	1,48	14,29	0,49
0	0	6,9	5,6	11,9	11,8	17,7	20,4	549	413	91,6	89,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	5,5	5,3	14,5	11,6	20,8	20,2	0	0	46	30,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	6	6,1	11,5	8,5	21,1	20,9	542	455	76,2	67,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	8,59	7,11	26,2	24,5	24,8	22,3	0	0	145	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	7,61	7,11	26,6	24,4	23,1	21,3	622	573	172	49,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	6,67	6,19	26,5	25,2	20,6	20,2	0	0	112	71,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	7,19	6,31	27,6	24,9	22,4	19,3	0	0	107	49,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	6,5	6,4	22,2	20,8	18,8	18,8	0	0	66	37,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	5,69	6,17	26,2	22,3	21,6	20,1	0	0	132	41,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60,6	22,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo D. Estadística Descriptiva *Azolla* vs Nitrógeno Amoniacal

Estadístico	WAZOLAS	NH3S
No. de obser	23	23
Mínimo	0,000	0,000
Máximo	575,000	7,620
1° Cuartil	0,000	0,000
Mediana	0,000	0,490
3° Cuartil	463,500	2,340
Media	197,722	1,419
Varianza (n-1)	65093,545	3,936
Desviación tí	255,134	1,984

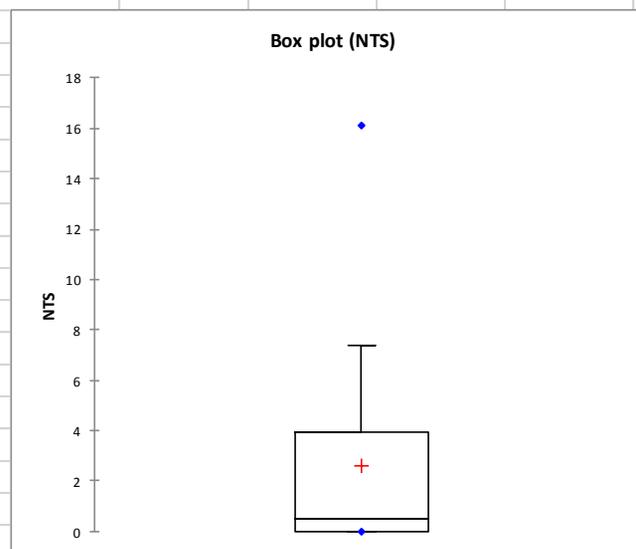
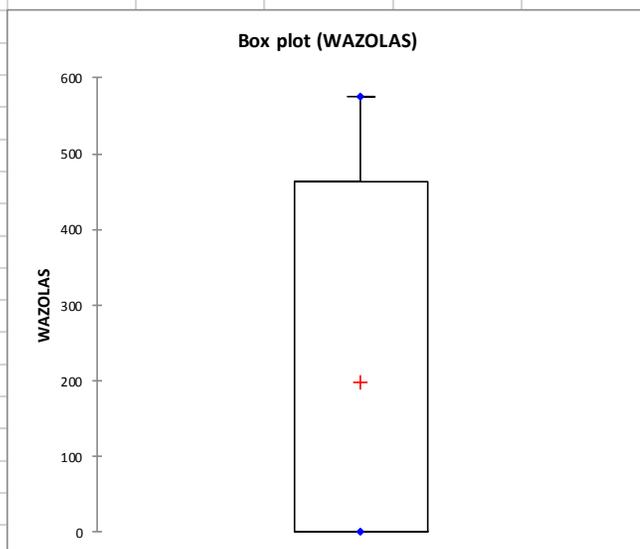
Box plots:



Anexo E. Estadística Descriptiva Azolla vs Nitrógeno Total

Estadístico	WAZOLAS	NTS
No. de obser	23	23
Mínimo	0,000	0,000
Máximo	575,000	16,130
1° Cuartil	0,000	0,000
Mediana	0,000	0,490
3° Cuartil	463,500	3,940
Media	197,722	2,587
Varianza (n-1)	65093,545	14,808
Desviación tí	255,134	3,848

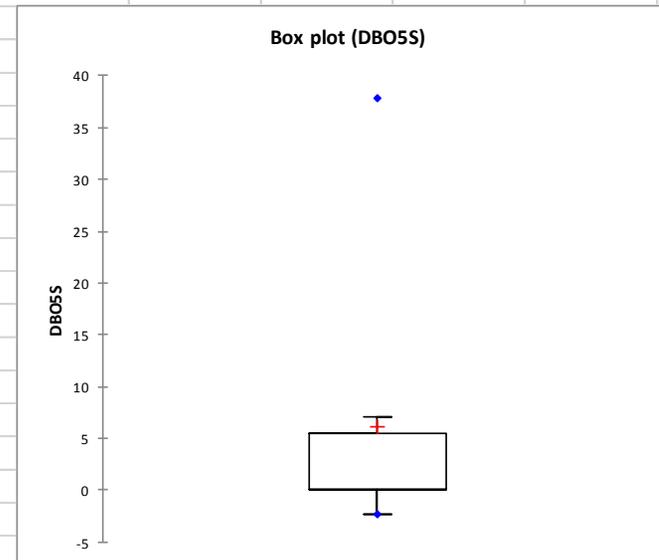
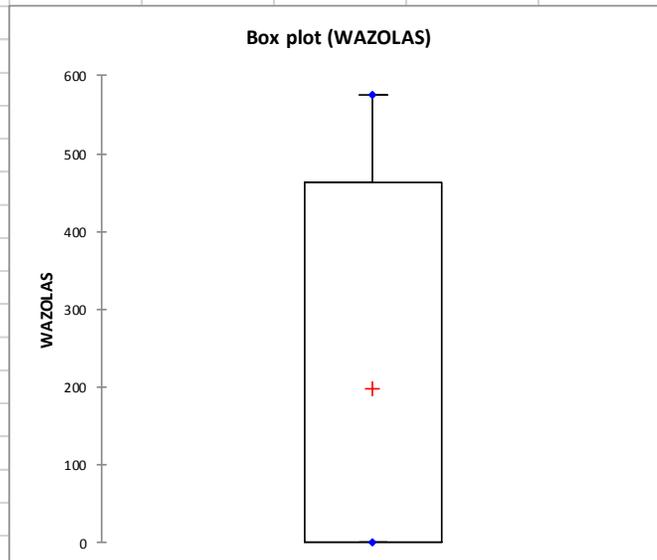
Box plots:



Anexo F. Estadística Descriptiva Azolla vs DBO

Estadístico	WAZOLAS	DBO5S
No. de obser	23	23
Mínimo	0,000	-2,260
Máximo	575,000	37,900
1° Cuartil	0,000	0,000
Mediana	0,000	0,000
3° Cuartil	463,500	5,495
Media	197,722	6,070
Varianza (n-1)	65093,545	110,784
Desviación tí	255,134	10,525

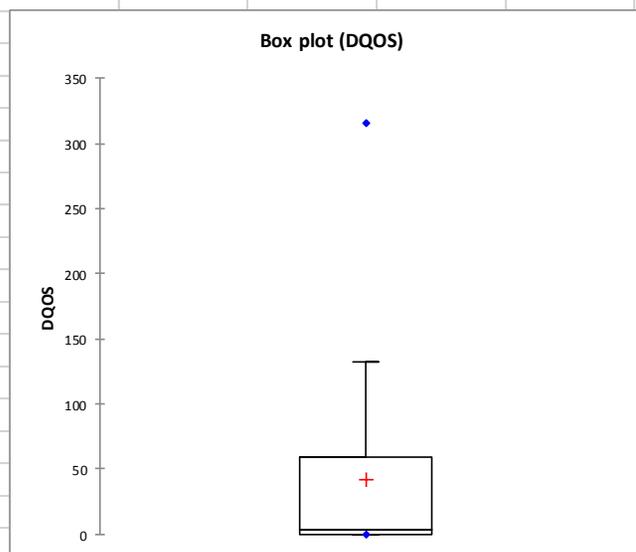
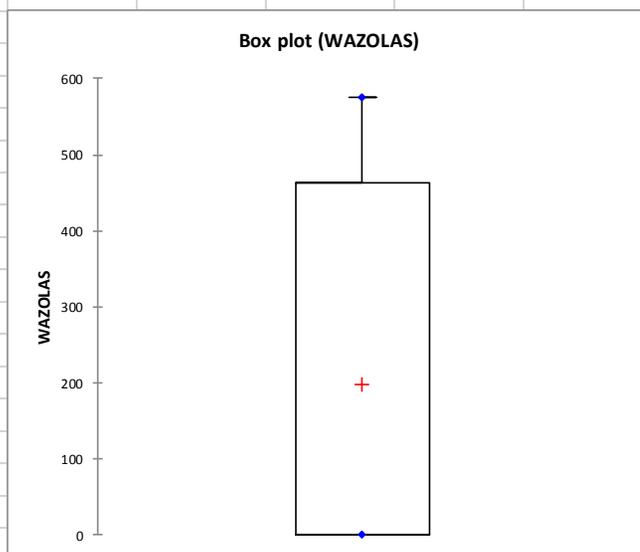
Box plots:



Anexo G. Estadística Descriptiva Azolla vs DQO

Estadístico	WAZOLAS	DQOS
No. de obser	23	23
Mínimo	0,000	0,000
Máximo	575,000	316,000
1° Cuartil	0,000	0,000
Mediana	0,000	4,000
3° Cuartil	463,500	59,000
Media	197,722	41,739
Varianza (n-1)	65093,545	5225,565
Desviación tí	255,134	72,288

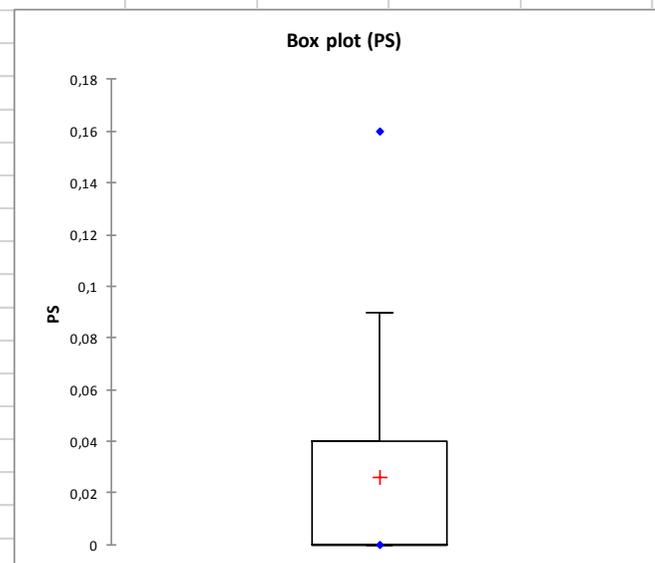
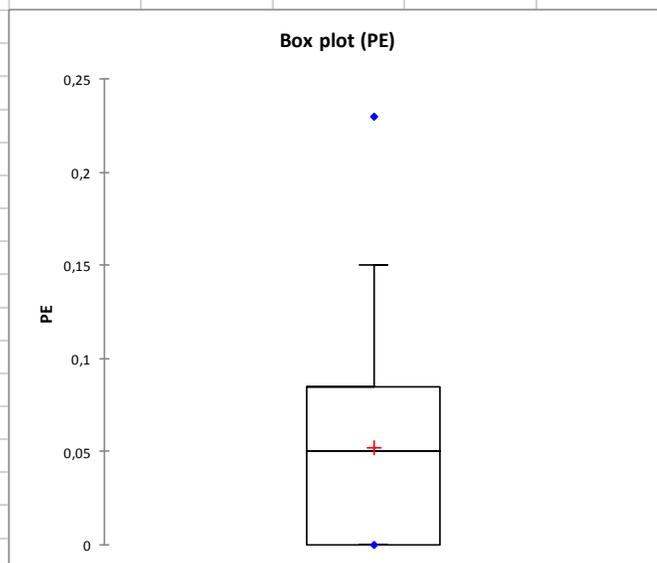
Box plots:



Anexo H. Estadística Descriptiva Fosforo

Estadístico	PE	PS
No. de obser	23	23
Mínimo	0,000	0,000
Máximo	0,230	0,160
1° Cuartil	0,000	0,000
Mediana	0,050	0,000
3° Cuartil	0,085	0,040
Media	0,052	0,026
Varianza (n-1)	0,004	0,002
Desviación tí	0,062	0,039

Box plots:



I. REGISTRO FOTOGRAFICO



Fotografía No. 1

Fecha: 5 de octubre de 2013

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA

Observación: vertimiento puntual – Antes de instalar sistema de tratamiento



Fotografía No. 2

Fecha: 5 de octubre de 2013

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA

Observación: vertimiento puntual – Antes de instalar sistema de tratamiento



Fotografía No. 3

Fecha: 3 de julio de 2014

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA

Observación: fase construcción Biofiltro.



Fotografía No. 4

Fecha: 3 de julio de 2014

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA

Observación: fase construcción Biofiltro, conducción mediante canal.



Fotografía No. 5

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: fase construcción Biofiltro.



Fotografía No. 6

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: Instalación de tubería unidad productiva



Fotografía No. 7

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: fase construcción Biofiltro.



Fotografía No. 8

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: fase construcción Biofiltro conducción mediante canal.



Fotografía No. 8
Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: Fondo de Biofiltro.



Fotografía No. 10
Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: canal a flujo libre, vertimientos unidad porcicola.



Fotografía No. 11
Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: fase construcción Biofiltro.



Fotografía No. 12
Fecha: 3 de julio de 2014
Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: fase construcción Biofiltro



Fotografía No. 13

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA

Observación: Señalética Biofiltro terminado, se tapa para evitar algún efecto de dilución por posible precipitación y pérdida del color natural de la Azolla



Fotografía No. 14

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA

Observación: vertimiento puntual – Antes de instalar sistema de tratamiento



Fotografía No.15

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA

Observación: vertimiento puntual proceso de lavado de la unidad porcicola



Fotografía No. 16

Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA

Observación: vertimiento puntual proceso de lavado de la unidad porcicola



Fotografía No. 17
Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: instalaciones interna granja porcicola – cria



Fotografía No. 18
Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: instalaciones interna granja porcicola



Fotografía No. 19
Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: instalaciones interna granja porcicola, camara de recoleccion de aguas residuales no domesticas interna.



Fotografía No. 20
Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA
Observación: instalaciones granja porcicola.

	
<p>Fotografía No. 21 Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA Observación: siembra <i>Azolla A.</i> sobre unidad experimental</p>	<p>Fotografía No. 22 Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA Observación: Coloracion rojiza de <i>Azolla Anabaena</i> posiblemente por incremento de la radiacion solar. }</p>
	
<p>Fotografía No. 23 Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA Observación: <i>Azolla Anabaena</i>, identificación de la macrófita.</p>	<p>Fotografía No. 24 Fecha: 3 Lugar: SENA CENTRO AGROPECUARIO CAUCA Observación: siembra <i>Azolla A.</i> estado de las raíces, adheridas al filtro.</p>