

**EVALUACIÓN DE DOS FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE  
(FAFAS), CON DIFERENTES MEDIOS DE SOPORTE PARA EL  
EFLUENTE DEL TANQUE SÉPTICO DE LA ESTACIÓN DE SERVICIO EL  
CRUCERO DE TOTORÓ DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN (CAUCA).**



**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA  
AUTÓNOMA  
DEL CAUCA**

**MAIRA ALEXANDRA GUEVARA TORO  
ANDRES FABIAN BARRAGAN CASTRO**

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

**EVALUACIÓN DE DOS FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE (FAFAS), CON DIFERENTES MEDIOS DE SOPORTE PARA EL EFLUENTE DEL TANQUE SÉPTICO DE LA ESTACIÓN DE SERVICIO EL CRUCERO DE TOTORÓ DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN (CAUCA).**



**MAIRA ALEXANDRA GUEVARA TORO  
ANDRES FABIAN BARRAGAN CASTRO**

**Trabajo de investigación como requisito para optar por el título de  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO**

**Director trabajo de grado modalidad investigación  
Ing. Ronald Edinson Cerón  
M.S.c en Ingeniería Ambiental**

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

**Nota de presentación:**

El Director y los jurados del trabajo de grado, modalidad investigación: “EVALUACIÓN DE DOS FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE (FAFAS), CON DIFERENTES MEDIOS DE SOPORTE PARA LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA PROVENIENTE DEL EFLUENTE DEL TANQUE SÉPTICO DE LA ESTACIÓN DE SERVICIO EL CRUCERO DE TOTORÓ DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN (CAUCA).” realizado por MAIRA ALEXANDRA GUEVARA TORO y ANDRES FABIAN BARRAGAN CASTRO. Una vez revisado el informe final y aprobado la sustentación, autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental y Sanitario.

---

**Director trabajo de investigación**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro a mis padres Fabio Barragán y Gladis Castro por su esfuerzo y amor incondicional, porque gracias a ellos hoy estoy cumpliendo una de mis metas que no sería posible sin ellos, agradezco a mis hermanos Javier Barragán y Andrea Barragán por apoyarme en cada uno de mis propósitos y estar presente cuando más los necesito, a mi familia Barragán, Castro por impulsarme a ser mejor cada día con cada uno de sus consejos.

Este logro no es solo mío sino también de mi familia, quienes con su amor incondicional y su apoyo me llevaron a ser más fuerte y perseverante, para no decaer ante cada uno de los obstáculos que encontré al transcurrir de mi carrera, no me queda más que agradecer todo lo que hicieron y hacen por mi día a día.

Andrés Fabián Barragán Castro

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la fortaleza y salud de salir adelante en este proyecto. A mis padres Gladis castro y Fabio barragán, por brindarme la posibilidad de salir adelante por enseñarme cada día a ser una mejor persona, por esos consejos tan valiosos de persistencia, que fueron la fuerza para continuar de pie en los momentos difíciles, nunca hay que dejar las metas que no hemos trazado para nuestro futuro.

A mis queridos hermanos Andrea, Javier que siempre está ahí para apoyarme en mis decisiones.

A la familia castro, barragán que siempre han estado hay para prestarme el apoyo que sea necesario.

A mi novia Maira Alexandra Guevara Toro por hacer parte de esta etapa, por su paciencia y comprensión.

A mi amigos Pedro Hernández, Jessica Muños, Ricardo Collazos, José Luis Jojoa, David Valenzuela, Paula Coral, Leny Gómez, Héctor Barrionuevo, Yudi Franco, Daniela Pabón, por esa amistad incondicional.

A mi asesor y amigo Ronald Cerón M.S.c en ingeniería ambiental por su constante ayuda incondicional, la cual fue fundamental para la elaboración del proyecto.

A mi novia y compañera de trabajo de investigación Maira Alexandra Guevara por su constancia y perseverancia en la realización del proyecto.

Finalmente, a mis amigos y compañeros de clases quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, los que estuvieron a mi lado apoyándome para que este sueño se haga realidad.

Andrés Fabian Barragan Castro

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres por su esfuerzo y dedicación, por sus consejos y sabiduría. Especialmente a mi padre quien no podrá estar conmigo disfrutando de este triunfo en cuerpo presente pero estará en espíritu, una meta en la cual no puedo decir que es del todo mía porque estaría mintiendo, esta meta es gracias a él, a ese hombre que lucho contra la muerte por mucho tiempo y contra muchas personas para poder verme cumplir el que hoy es nuestro sueño, y el cual desde su partida solo me dio fuerza para continuar viviendo sin él y sacar la carrera adelante, porque me enseñó que para salir adelante no hay que apagar los sueños de los demás.

En tu memoria dedico este triunfo y los que vendrán papá.

Maira Alexandra Guevara Toro

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por brindarme la vida y tener salud, por darme la oportunidad de culminar mi carrera ya que sin el nada de esto podría haberse logrado.

A mis padres Jaime Álvaro Guevara y Aura Carmelina Toro Meneses, por apoyarme en cada una de mis decisiones, siendo mi fuerza para continuar día a día. Por cada uno de los consejos recibidos en los momentos más difíciles, y no tengo palabras para expresar cuanto agradezco todo lo que hicieron y hacen por mi cada día.

A mis hermanos Fredier Guevara, Leandro Guevara, Wilder Guevara y Jairo Guevara, por apoyarme en cada decisión tomada y cada consejo que me sirvió para no decaer ante los obstáculos.

A mi novio y compañero de trabajo de investigación Andres Fabian Barragan Castro por hacer parte de esta hermosa etapa, además por su constancia, perseverancia, su apoyo y comprensión.

A mis amigas y primas Andrea Cardona, Alejandra Armero, Estefany Rúaless y Carolina Rúaless, por brindarme su amistad y apoyo durante y después de la carrera gracias por cada momento compartido.

Además doy las gracias al ingeniero Ronald Edinson Cerón, por ser un excelente docente y director de tesis y porque más que un docente es un amigo y es una persona maravillosa, gracias por su paciencia, y por cada uno de sus conocimientos que nos permitieron crecer como ingenieros y como personas.

Además a mis compañeros por cada una de las historias vividas durante toda la carrera, son recuerdos que jamás se olvidaran y siempre los llevare conmigo donde quiera que me encuentre y muchos cumplieron esa meta que hoy estoy por cumplir.

Maira Alexandra Guevara Toro

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	15
INTRODUCCION .....	17
CAPITULO I: PROBLEMA .....	18
1.1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
1.2.    JUSTIFICACION.....	19
1.3.    OBJETIVOS.....	20
1.3.1.  Objetivo general .....	20
1.3.2.  Objetivos específicos.....	20
CAPITULO II: MARCO TEORICO Y REFERENTES CONCEPTUALES .....	22
2.1    Estado del arte.....	22
2.2    Bases teóricas .....	23
2.2.1  Configuración de los FAFA: .....	24
2.2.1.1  Zona de entrada:.....	24
2.2.1.2  Zona de empacado .....	24
2.2.1.3  Zona de salida .....	25
2.2.2  Tanque séptico .....	25
2.2.3  Tratamiento biológico .....	25
2.2.4  Biopelícula en tratamiento anaerobio.....	25
2.2.5  Reactor a escala de laboratorio .....	25
2.2.6  Medios de soporte: .....	25
2.2.7  Aguas servidas: .....	25
2.2.8  Muestras apareadas: .....	26
2.2.8.1  Varianza (poblacional):.....	26
2.2.8.2  Media: .....	26
2.2.9  Parámetros Físico químicos a evaluar .....	27
2.2.9.1  Demanda química de oxígeno (DQO) .....	27
2.2.9.3  Potencial hidrogeno (pH).....	27
2.2.9.4  Temperatura .....	27
2.2.9.5  Solidos suspendidos totales (SST).....	27

2.2.10	Tiempo de retención hidráulico (TRH) .....	28
2.2.11	% porosidad .....	28
2.2.12	Área superficial del filtro .....	28
2.2.13	Eficiencia de remoción de un FAFA.....	29
2.2.14	Eficiencia del lecho:.....	29
2.2.15	Numero de Reynolds:.....	29
2.2.16	Factor de dilución .....	30
2.3	Bases legales .....	30
2.4	Hipótesis .....	31
CAPITULO III: METODOLOGIA.....		32
Enfoque de la investigación .....		32
Alcance de la investigación.....		32
Metodología de la investigación.....		33
3.1	Desarrollo de la metodología .....	34
3.1.1	Diseño y construcción.....	34
3.1.1.1	Recolección de información .....	34
3.1.1.2	Visita a la estación de servicio el crucero de Totoró.....	34
3.1.1.3	Diseño de unidades experimentales.....	34
3.1.1.3.1	Tiempo de retención .....	34
3.1.1.5	Construcción de los FAFAs a escala de laboratorio .....	35
3.1.2	Medición y caracterización.....	38
3.1.2.1	Medición de caudales.....	38
3.1.2.2	Tiempo de retención hidráulico .....	38
3.1.2.3	Parámetros a medir.....	38
3.1.2.4	Sitio de muestreo .....	39
3.1.2.5	Toma de muestras .....	40
CAPITULO IV: RESULTADOS.....		41
4.2	Resultados y análisis del porcentaje de eficiencia de la DQO y SST. ....	47
4.2.1	Calculo de porcentaje de eficiencia de la DQO para cada filtro .....	47
4.2.2	Calculo del porcentaje de eficiencia de SST para cada filtro.....	50

4.3	Gráficas y análisis de resultados de las concentraciones de DQO, DBO, SST y los valores de pH y temperatura.....	55
4.3.1	Relación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), de la entrada, filtro con medio de grava y filtro con lecho sintético. ....	55
4.3.2	Relación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), de la entrada, filtro con medio de grava y filtro con lecho sintético. ....	56
4.3.3	Relación de los Sólidos Suspendidos Totales (SST), entrada, medio de grava y medio sintético. ....	57
4.3.4	Relación los pH de entrada, medio de grava y medio sintético .....	59
4.3.5	Relación de las temperaturas de entrada, medio de grava y medio sintético. ....	59
4.3.6	Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas. ....	60
4.3.6.1	Muestras apareadas de la concentración de la DQO .....	61
4.3.6.2	Muestras apareadas de la concentración de la SST .....	62
4.4	Análisis socio-económicos y ambientales, del uso de filtros anaerobios de flujo ascendente.....	63
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		66
5.1	CONCLUSIONES .....	66
5.2	RECOMENDACIONES .....	67
Bibliografía .....		68

## LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1: configuración sin fondo falso y con fondo falso .....	24
Imagen 2: Falso fondo empleado para lecho de grava y lecho sintético.....	36
Imagen 4: FAFA con medio de soporte sintético y con medio de soporte de grava .....	37
Imagen 5: ubicación de la estación de servicio el cruce de Totoró y ubicación de los filtros («Google Maps», 2017).....	39
Imagen 6: Toma de muestra de la entrada, proveniente del tanque séptico.....	40
Imagen 7: Fracción del medio sintético visto en planta .....	44

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: <i>Enfoques de la investigación</i> .....	32
Tabla 2: <i>Metodología</i> . ....	33
Tabla 3: <i>Materiales empleados para la construcción de los filtros</i> .....	36
Tabla 4: <i>Parámetros a medir</i> .....	38
Tabla 5: <i>Resultados de cada muestra y sus respectivos parámetros</i> .....	41
Tabla 6: <i>Determinación de caudales para los FAFA con lecho de grava y lecho sintético</i> .....	43
Tabla 7: <i>Remoción de demanda química de oxígeno (DQO)</i> .....	47
Tabla 8: <i>Porcentaje de eficiencia de SST</i> .....	51
Tabla 9: <i>concentración de la DBO</i> .....	56
Tabla 10: <i>Concentración de SST</i> .....	58
Tabla 11: <i>Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas para las concentraciones de la DQO</i> . ....	62
Tabla 12: <i>Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas para las concentraciones de SST</i> .....	63
Tabla 13: <i>Análisis del criterio social, económico y ambiental</i> . ....	64

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1: <i>Porcentaje de remoción de la DQO</i> .....	49
Grafica 2: <i>Porcentaje de eficiencia de SST</i> .....	51
Grafica 3: <i>Concentración de la DQO</i> .....	55
Grafica 4: <i>concentración de la DBO</i> .....	57
Grafica 5: <i>Concentración de los SST</i> .....	57
Grafica 6: <i>Valores de pH con respecto al tiempo</i> .....	59
Grafica 7: <i>Valores de temperatura en relación al tiempo</i> .....	59

## LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo 1: Concentración de la demanda química de oxígeno (DQO), para cada FAFA.....</i>	<i>75</i>
<i>Anexo 2: Concentración de sólidos suspendidos totales (SST), para cada FAFA. 75</i>	<i>75</i>
<i>Anexo 3: Valores de pH para cada FAFA.....</i>	<i>76</i>
<i>Anexo 4: Valores de temperatura para cada FAFA. ....</i>	<i>76</i>
<i>Anexo 5 Registro fotográfico del trabajo de campo, realizado en la estación de servicio El Crucero de Totoró.....</i>	<i>77</i>
<i>Anexo 6: Equipos empleados para la medición de los parámetros como DQO, pH, SST y temperatura. ....</i>	<i><b>¡Error! Marcador no definido.</b></i>
<i>Anexo 7: Análisis de las muestras en el laboratorio De la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.....</i>	<i>79</i>

## RESUMEN

La contaminación que genera la descarga de agua residual al subsuelo afecta las fuentes hídricas tanto subterráneas como superficiales, generando un impacto ambiental que afecta a la fauna acuática, el cual dependerá del tipo de descarga que se produce. En el departamento del Cauca municipio de Popayán, hay diferentes tipos de descargas efectuadas por empresas y la misma población, este tipo de contaminación genera una cantidad de problemas ambientales ligados no solo al medio ambiente sino también a la salud, debido a que muchas fuentes son empleadas para abastecer a una población que posiblemente puede estar siendo contaminada por acciones antrópicas.

Se realizó la investigación para determinar la eficiencia de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) de acuerdo al tipo de lecho, donde el objetivo radica en evaluar dos filtros, uno con lecho sintético y el segundo con lecho de grava, para determinar la eficiencia que tiene cada sistema trabajando en las mismas condiciones, además se empleó como fuente de abastecimiento de los filtros el agua residual proveniente del tanque séptico de la estación de servicio El Crucero de Totoró. Para ello se realizó la construcción e instalación de los FAFA a escala piloto en la estación de servicio, donde se inicia con la etapa de arranque y aclimatación de los filtros la cual duro un mes, pasado este tiempo se inicia la toma de muestras donde se obtienen los resultados de laboratorio con los cuales se determina la eficiencia que tienen los FAFA de acuerdo al tipo de lecho.

De acuerdo a los datos obtenidos en el laboratorio de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, se establece que el filtro con lecho sintético tuvo una remoción promedio en DQO del 39,68% y para los SST se obtuvo una remoción promedio del 36,5%, y el filtro con lecho de grava generó una remoción promedio para la DQO de 49,84% y para los SST una remoción promedio del 43,32%, obteniendo mejores resultados en el filtro con lecho de grava.

**Palabras claves:** *lecho sintético, lecho de grava, filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST).*

## ABSTRACT

The contamination generated by the discharge of wastewater to the subsoil affects the water sources both underground and surface, generating an environmental impact that affects the aquatic fauna, depending on the type of discharge occurred will be the impact caused. In the department of Cauca municipality of Popayán, there are different types of discharges made by companies and the same population, this type of pollution generates a number of environmental problems linked not only to the environment but also to health, because many sources are used to supply a population that may be have been contaminated by anthropogenic actions.

The research was conducted to determine the efficiency of an upflow anaerobic filter (UAF) according to the type of bed, where the objective is to evaluate two filters, firstly with synthetic bed and secondly with bed of gravel, to determine the efficiency which has each system working under the same conditions. In addition, the wastewater from the septic tank of the “El Crucero” service station in Totoró was used as supply source of the filter. For this, the UAF was built and installed at a pilot scale at the service station, where it starts with the start and acclimation stage of the filters which lasted a month, after, which time the sampling begins where Obtain the laboratory results with which it is determined the efficiency that the UAFs have according to the type of bed.

According to the data obtained in the laboratory of the Autonomous University Corporation of Cauca, it is established that the filter with synthetic bed had an average removal in COD of 39.68% and for the TSS an average removal of 36.5%, And the filter with gravel bed generated an average removal for COD of 49.84% and for the TSS an average removal of 43.32%, obtaining better results in the filter with bed of gravel.

**Key words:** *Synthetic bed, gravel bed, Upflow Anaerobic Filter (UAF), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (SST).*

## INTRODUCCION

Las aguas residuales que se vierten a una fuente receptora causan el deterioro de las zonas riparias, por el depósito de sedimento disminuyendo la producción de los cultivos y afectado las fuentes subterráneas (Noyola, 2010). Estos impactos también se observan en las fuentes superficiales debido a la eutrofización que genera el aumento de nutrientes incrementando el crecimiento de algas, plantas acuáticas y fitotoxinas (Pinos Rodríguez & García López, 2012), ocasionando que el tratamiento de depuración sea más costoso hasta llegar al punto de no poder recuperar la fuente.

El impacto que las aguas residuales ocasionan al medio ambiente y la salud humana son evidentes, debido a que Colombia es un país que carece de servicios públicos y las actividades comerciales e industriales en muchos casos no cumplen con las normas de vertimiento obligatorias, observando esta problemática se plantea el uso de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) con diferente medio de soporte, donde se pretende establecer la eficiencia del filtro de acuerdo al tipo de lecho, siendo suministrado por agua residual proveniente del tanque séptico de la estación de servicio El Crucero de Totoró.

Donde los filtros de lecho empacado tienen una gran importancia dentro de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a que son de fácil manejo y su costo operacional es bajo, implementados en muchos sistemas para mejorar la eficiencia en los tratamientos de aguas residuales. Siendo uno de los mecanismos más importantes para la remoción de la materia orgánica (MO) presente en el agua residual y para el metabolismo bacteriano dentro del filtro, donde las bacterias utilizan la MO como fuente de energía y carbono para generar nueva biomasa (Rodríguez, 2004). La cual permite aumentar la efectividad del sistema.

Además la implementación de estos sistemas de tratamientos disminuye la carga contaminante que se vierte a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, reduciendo el riesgo de enfermedades y afectación a las fuentes subterráneas y superficiales.

## CAPITULO I: PROBLEMA

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) En los países de ingresos bajos y medios, se presentan deficiencia en los sistemas de tratamientos, donde La gestión inadecuada de las aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas conlleva que el agua que beben cientos de millones de personas se vea peligrosamente contaminada o polucionada químicamente («OMS | Agua», s. f.). Debido a que grandes ciudades no cuentan con plantas de tratamiento o son insuficientes, esto se debe al crecimiento de la población y las falencias en operación y mantenimiento.

La descarga de aguas residuales no tratadas ocasiona problemas a las zonas situadas rio abajo según (Lirola & Fernández, 2008). Esta problemática afecta a los países en desarrollo los cuales no cuentan con fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable para toda la población, generando grandes afectaciones al medioambiente y la salud pública.

Teniendo en cuenta que la contaminación del agua genera grandes impactos no solo al medio ambiente sino también a la salud humana, por lo cual estudios realizados muestran que el impacto no solo es a nivel nacional sino también a nivel mundial, donde el 80% de las enfermedades infecciosas y parasitarias gastrointestinales causadas se deben al uso y consumo de agua insalubre (Villar & Ollarce, s. f.). Debido a la falta de higiene y la carencia de servicios públicos, donde alrededor de 2,2 millones de personas mueren cada año de enfermedades diarreicas, en su mayoría niños y niñas menores de cinco años principalmente en los países en desarrollo (Daza et al., 2009)

En Colombia se observa este tipo de problemas, tanto en zonas rurales como urbanas, las cuales no cuentan con plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), viéndose afectada la población que consume el agua directamente de una fuente, la cual puede estar siendo empleada como receptora de agua residual (AR), esto se debe a la falta de recursos económicos los cuales son insuficientes para la construcción y operación de una PTAR, que al no ser manejada correctamente puede que el sistema de tratamiento y procesos de digestión anaerobia, logren verse afectados fácilmente por factores ambientales (ÁNGEL, 2007), poniendo en

riesgo la salud humana y el deterioro de las fuentes hídricas tanto superficiales como subterráneas.

Asimismo la importancia de implementar el uso de reactores biológicos de película fija para integrar a un sistema de tratamiento de aguas residuales, radica en disminuir el impacto generado a las fuentes principales de abastecimiento tanto superficiales como subterráneas. Debido a que las aguas superficiales son más vulnerables a la contaminación de origen antrópico que las aguas subterráneas, con la gran diferencia que la fuente superficial receptora puede restaurarse más rápidamente que una fuente subterránea a través de ciclos de escorrentía estacionales (Caja Morales, 2004). Permite establecer la necesidad de implementar el uso de reactores biológicos de película fija en los sistemas de tratamiento para una mejora continua.

## **1.2. JUSTIFICACION**

La contaminación hídrica a nivel mundial se ve reflejada en los países menos desarrollados donde el 80 % no cuenta con un tratamiento adecuado para evitar la contaminación y propagación de enfermedades, ante esta situación se instauro que los gobiernos deben convertir el tratamiento de las aguas residuales en una prioridad (ONU, 2015), por ende disminuir la contaminación hídrica que no solo afecta la salud humana y el medio ambiente, sino también las consecuencias económicas que trae consigo, debido a que en varios casos el impacto generado por aguas residuales supera a la inversión. Además en los últimos años en América Latina el 70% de las aguas residuales que se generan en la región son devueltas al medio natural (ríos, mares o tierras) sin ningún tratamiento («El 70% de las aguas residuales en América Latina vuelven a los ríos sin ser tratadas», 2014).

Este impacto ambiental afecta la salud pública, la preservación de los recursos naturales, el medio ambiente y el sector productivo, siendo las poblaciones vulnerables con peor calidad de servicios, las que se llevan la peor parte, reflejando la importancia que implica los tratamientos de agua residuales. Esto se refleja en Colombia el cual es un país en desarrollo y carece de adecuados servicios públicos, realizando una mala disposición de las aguas residuales, las cuales en muchas ocasiones son vertidas a una fuente receptora o al suelo, afectando los componentes bióticos (Romero & others, 2008). Debido a la contaminación de las fuentes, es necesario la implementación de tratamientos biológicos para evitar enfermedades causadas por bacterias y virus que pueden afectar la salud y bienestar de los seres humanos, y disminuir el impacto a las fuentes o suelo

receptor. Donde el manejo de vertimientos está ligado a la obligación del estado de garantizar un ambiente sano (Pérez & Martínez, 2007).

En Colombia debido a la falta de servicios públicos se plantean alternativas para el tratamiento de las aguas residuales, como es el empleo de los sistemas biológicos en el que se encuentra el tratamiento anaerobio por medio de filtros, este tratamiento reduce el contenido de materia orgánica, disminuye el contenido de nutrientes y elimina los patógenos y parásitos (Marsilli, 2005). Además el tratamiento por medio de filtros anaerobios no requiere instalaciones costosas, no hay necesidad de suministrar oxígeno reduciendo los costos y los requerimientos energéticos son menores. Lo cual hace que este tipo de sistemas sean accesibles y puedan ser empleados para el tratamiento de aguas residuales.

Por lo tanto el empleo de filtros como sistema de tratamiento anaerobio son de fácil manejo y operación, los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) son implementados en muchos sistemas de tratamiento de aguas residuales debido a su eficiencia, siendo una opción viable para el tratamiento de las aguas residuales. Donde cabe resaltar que la eficiencia del sistema dependerá del tipo de lecho que se emplee en el FAFA.

En la actualidad se utilizan diferentes medios de soporte como lo son: el medio de grava, guadaña, plástico, entre otros, la diferencia entre cada medio de soporte es la eficiencia que cada uno posee al hacer parte de un sistema de tratamiento. Por ende es importante tener un soporte literario que permitirá elegir el tipo de lecho a usar en el filtro. Además pueden emplearse a pequeña y gran escala, para descargas industriales y domésticas (Lizarazo Becerra, Orjuela Gutiérrez, & others, s. f.).

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Evaluar dos filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFAs), con diferentes medios de soporte, para el efluente del tanque séptico de la estación de servicio El Crucero de Totoró.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Construir a escala piloto dos filtros anaerobios de flujo ascendente con diferente medio de soporte.

- Realizar la caracterización de los parámetros de control tanto en el afluente como en el efluente
- Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica soluble para cada FAFA.

## CAPITULO II: MARCO TEORICO Y REFERENTES CONCEPTUALES

### 2.1 Estado del arte

Los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) fueron propuestos por Young y Mc Carty (1969), para el tratamiento de aguas residuales, siendo el más sencillo de los sistemas de tratamiento anaeróbico de mantener, porque la biomasa permanece como una biopelícula microbial incrustada a un medio de soporte, conformando una matriz la cual remueve la materia bajo condiciones anaerobias (Ramón & Maldonado, 2013). Estos filtros anaerobios de flujo ascendente son tecnologías ampliamente conocidas y sobre todo por países en desarrollo, los cuales se ven afectados por no contar con plantas de tratamiento de aguas residuales afectando los recursos naturales y la salud humana.

Según un estudio realizado en el distrito de Daxing, Beijing en el 2009, se empleó un FAFA para el tratamiento de aguas residuales proveniente de una granja con explotación porcina intensiva, la cual realiza una investigación para disminuir la carga contaminante de las aguas residuales (AR) de la granja, midiendo parámetros como pH, DQO, nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N) y temperatura, empleando un lecho sintético (PVC de baja densidad), los resultados obtenidos de la investigación muestran que la concentración de DQO del efluente del filtro está por debajo de 150 mg/L y el efluente de calidad alcanza los requisitos nacionales de estándares de salida de contaminantes de mascotas y aves requeridos en la industria de cría (Wei, Lin, Duan, Peng, & Ye, 2010).

También se empleó el uso del FAFA en Bolivia en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, para las viviendas que no cuentan con el servicio de alcantarillado sanitario para eliminar sus AR, debido a esta necesidad se implementó un sistema para aguas negras denominado cámara séptica (CS), con un FAFA con lecho granular (grava), para mejorar la eficiencia de remoción de la carga orgánica y los resultados obtenidos se determinan con la implementación de la CS mas FAFA, donde la carga contaminante de tipo orgánico se expresó como DBO y SST, mejorando la eficiencia de remoción de la DBO de 24.12 % alcanzado por la CS a 72.41 % alcanzado por el sistema CS + FAFA, para SST de 68.65% alcanzado por la CS a 91.93 % alcanzado por el sistema CS + FAFA (Rios Montes, 2009), estos resultados permiten determinar la eficiencia de los filtros como un método complementario en un sistema de tratamiento.

En Colombia también se ha implementado el uso de filtros anaerobios de flujo ascendente, debido a la eficiencia, simplicidad y rentabilidad. Estos filtros se han implementado como un tratamiento secundario para mayor eficiencia, en el municipio de Manizales en el departamento de Caldas donde se realizó una investigación para determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica presente en las aguas mieles del café donde la eficiencia de remoción alcanzada por el sistema modular de tratamiento anaerobio con el reactor metanogénico construido en polietileno y empacado con botellas plásticas no retornables como medio de soporte (tipo FAFA), considerando un promedio de concentración de 27.400 ppm de DQO en las aguas de lavado, fue de 86,6% en términos de la DQO, y 87,8% en términos de la DBO cumpliendo con las normas exigidas (Zambrano, Rodríguez, Orozco, & Lopez, 2015).

En el municipio de el Tambo en el departamento del Cauca, se encuentra el matadero municipal el cual actualmente no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales, debido a esto se realizó un estudio a escala de laboratorio para determinar si un filtro anaerobio de flujo ascendente es viable para emplearlo como sistema de tratamiento para reducir la carga contaminante, donde el filtro anaerobio de flujo ascendente contiene como medio de soporte grava y de acuerdo a los resultados obtenidos del laboratorio se removió un 81,42% de DBO y un 78,42 % de DQO siendo una propuesta viable como método de reducción de materia orgánica (Sánchez Cuervo & Hernández Torres, 2015).

## **2.2 Bases teóricas**

En los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), los compuestos orgánicos solubles son transformados por la biomasa en productos intermedios o finales, metano y dióxido de carbono, en estos filtros la biomasa se encuentra adherida a un relleno que se encuentra contenido dentro del reactor y ocupa la mayor parte del volumen del mismo. Los materiales empleados como medio filtrante son muy variables, en el FAFA se da una combinación entre el sistema con biomasa suspendida y biomasa fija, ya que en la superficie del medio filtrante se forma una película biológica mientras que en los espacios vacíos la biomasa puede quedar suspendida (Serrano Salas, 2005).

El proceso anaerobio es la descomposición u oxidación de los compuestos orgánicos en ausencia de oxígeno, lo cual se requiere para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos dentro del sistema (Navarro Sarmiento, 2008). Un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), se emplea para disminuir el contenido de carga contaminante, la cual puede ser vertida a una fuente hídrica o directamente al suelo, este tipo de filtros se aplican para

mejorar un sistema de tratamiento de aguas residuales, siendo un proceso de crecimiento adherido, para el tratamiento de residuos solubles.

**2.2.1 Configuración de los FAFA:** Los filtros se componen de tres partes o zonas funcionales (Andrés Felipe Osorio Trujillo, 2007) las cuales se especificaran a continuación:

**2.2.1.1 Zona de entrada:** los tipos de configuración de entrada son sin fondo falso y con fondo falso.

**Imagen 1:** configuración sin fondo falso y con fondo falso

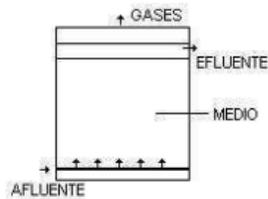


Figura N° 1. Configuración Sin Fondo falso

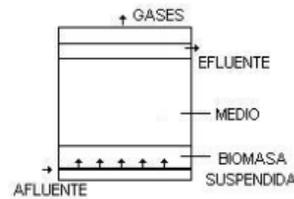


Figura N°2. Configuración Con Fondo Falso

**Fuente:** Adaptada (Andrés Felipe Osorio Trujillo, 2007)

La distribución de cualquiera de los dos filtros se realiza con una tubería de PVC perforada. En la configuración sin fondo falso, el medio de soporte es ocupado en su totalidad en el volumen del reactor, lo que conlleva a un posible taponamiento si el material no es uniforme e idealmente de alta porosidad; en cambio en la configuración con fondo falso, se promueve una mejor sedimentación del floc y menor riesgo de taponamiento(Castaño, 2002).

**2.2.1.2 Zona de empacado:** según Torres (2003), menciona que los filtros cuentan con un medio filtrante, el cual ejerce influencia sobre la eficiencia, ya que el medio actúa como separador líquido-gas, también ayuda a proveer un flujo uniforme del agua residual reduciendo las posibilidades de pasos directos a través del reactor, propiciando un mayor contacto del residuo con la masa biológica. Además los medios de soporte pueden estar constituidos por materiales como piedras, espumas, material plástico, granito y esferas de polietileno(Osorio Trujillo & Vásquez Botero, 2007).

**2.2.1.3 Zona de salida:** Esta zona además de recibir y evacuar el efluente del filtro, tiene la responsabilidad de garantizar una distribución correcta del caudal de salida, para una adecuada eficiencia hidráulica del sistema. La configuración de la zona de salida afecta también la distribución a través del medio, lo que se puede representar en cortos circuitos que afectan la eficiencia del sistema («Manual Abastecimiento Agua Potable por gravedad con tratamiento.pdf», s. f.).

**2.2.2 Tanque séptico:** Son tanques generalmente subterráneos, sellados, diseñados y construidos para el saneamiento rural. Deben llevar un sistema de post-tratamiento (Duque, 2010).

**2.2.3 Tratamiento biológico:** Consiste en el control del medio ambiente de los microorganismos de modo que se consigan condiciones de crecimiento óptimas (Nodal Becerra, 2005, p. 52).

**2.2.4 Biopelícula en tratamiento anaerobio:** son los procesos anaerobios, en los cuales los microbios utilizan el carbono orgánico como aceptor de electrones en ausencia de oxígeno disuelto. Donde la biopelícula es responsable de la degradación de la materia orgánica, en condiciones óptimas y fácilmente controladas (Escalera Vasquez, 2004).

**2.2.5 Reactor a escala de laboratorio:** Es una planta de proceso a escala reducida. El fin que se persigue al diseñar, construir y operar una planta piloto es obtener información sobre un determinado proceso físico o químico, que permita determinar si el proceso es económicamente viable y de fácil manejo, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso para el posterior diseño y construcción de una planta a escala real (Arango Muñoz & López Hincapié, 2011).

**2.2.6 Medios de soporte:** Los medios de soporte o medios filtrantes son parte importante de los FAFA, debido a que esto permite que se logre la remoción de carga contaminante debido a la biopelícula formada por los microorganismos. El uso de medio de soporte en los reactores biológicos permite la retención de sólidos al interior del mismo, a través del biofilme formado en su superficie y principalmente, en los intersticios del lecho (Barrantes Ortiz & Barrantes Ortiz, 2012).

**2.2.7 Aguas servidas:** Se denomina aguas servidas a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Se les llama también aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales pues, habiendo sido usada el agua,

constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen, donde Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e industriales. En todo caso, están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno(Garcés Rodríguez & Patiño Erazo, 2012)

**2.2.8 Muestras apareadas:** Esta estrategia de la investigación surge cuando cada observación para un tratamiento está apareada con otra observación para el otro tratamiento. Este par está compuesto por las mismas unidades experimentales observadas dos veces en distintos momentos de la investigación, o por unidades semejantes. El procedimiento consiste en buscar pares de unidades experimentales con características similares y asignar aleatoriamente cada unidad del par a cada uno de los dos tratamientos en estudio («Test de Hipótesis de dos parámetros», s. f.).

**2.2.8.1 Varianza (poblacional):** Es una potente herramienta estadística, de gran utilidad tanto en la industria, para el control de procesos, como en el laboratorio de análisis, para el control de métodos analíticos. Los ejemplos de aplicación son múltiples, pudiéndose agrupar, según el objetivo que persiguen, en dos principalmente: la comparación de múltiples columnas de datos y la estimación de los componentes de variación de un proceso (Boqué & Maroto, 2004).

$$s^2 = \frac{\sum_i(x_i - \bar{X})^2}{n} \quad (1)$$

**Dónde:**

**S<sup>2</sup>** = Varianza

**$\bar{X}$** = Media

**X<sub>i</sub>**= Es cada número del conjunto de datos

**n**= Cantidad de datos

**2.2.8.2 Media:** La media es el valor promedio de la distribución. La media aritmética es el valor obtenido al sumar todos los datos y dividir el resultado entre el número total de datos (Conde Abellan, 2009).

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2)$$

**Dónde:**

$\bar{X}$ = Media

n= Cantidad de datos

$X_i$ = Es cada número del conjunto de datos

## **2.2.9 Parámetros Físico químicos a evaluar**

**2.2.9.1 Demanda química de oxígeno (DQO):** Es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte. Específicamente representa el contenido orgánico total de la muestra, oxidable por dicromato en solución ácido (León Gil, 2009).

**2.2.9.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):** Es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en general residuales; su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores (Laboratorio de Química Ambiental, s. f.).

**2.2.9.3 Potencial hidrogeno (pH):** Se define como una medida que expresa el grado de acidez o basicidad de una solución en una escala que varía entre 0 y 14. La acidez aumenta cuando el pH disminuye. Una solución con un pH menor a 7 se dice que es ácida, mientras que si es mayor a 7 se clasifica como básica. Una solución con pH igual a 7 será neutra (Goyenola, 2007).

**2.2.9.4 Temperatura:** Es una magnitud física que indica la intensidad de calor o frío de un cuerpo, de un objeto o del medio ambiente, en general, medido por un termómetro. La temperatura suele medirse en grados Celsius (°C), y también en grados Fahrenheit (°F) o con una unidad de temperatura absoluta como es el Kelvin (K) (Salazar Dávila, 2004).

**2.2.9.5 Sólidos suspendidos totales (SST):** Corresponde a la cantidad de material (sólidos) que es retenido después de realizar la filtración de un volumen de agua. Es importante como indicador puesto que su presencia disminuye el paso de

la luz a través de agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno («CORPONARIÑO», 2010).

**2.2.10 Tiempo de retención hidráulico (TRH):** Los tiempos de retención hidráulicos son una relación entre el volumen del tanque y el caudal de consumo que está entrando y saliendo del tanque (Diaz Merchán, 2002, pp. 41-42), siendo el tiempo de residencia del líquido dentro del filtro y se lo calcula con la siguiente ecuación.

$$TRH = \frac{V \times \%P}{Q} \quad (3)$$

**Dónde:**

**TRH:** Tiempo de retención hidráulico (días)

**V:** Volumen del filtro anaerobio (m<sup>3</sup>)

**%P:** Porcentaje de porosidad

**Q:** Caudal en el afluente (m<sup>3</sup>/d)

**2.2.11 % porosidad:** Es la relación del volumen ocupado por el volumen total (Earthlearningidea, 2008).

$$\%P = \frac{A_{to} - A_{tu}}{A_{to}} \times 100 \quad (4)$$

**Dónde:**

**P:** porcentaje de porosidad (%)

**A<sub>to</sub>:** Área total (cm<sup>2</sup>)

**A<sub>tu</sub>:** Área del tubo (cm<sup>2</sup>)

**2.2.12 Área superficial del filtro:** (Comisión nacional del agua, 2015)

$$As = \frac{As_{to}}{Vt} \quad (5)$$

**Dónde:**

**AS:** Área superficial del medio filtrante, en m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

**As<sub>to</sub>:** área superficial total del filtro (m<sup>2</sup>)

**Vt:** Volumen total del filtro m<sup>3</sup>

**2.2.13 Eficiencia de remoción de un FAFA:** Con este parámetro se determina el porcentaje de remoción de la carga contaminante (Núñez, Elena, & others, 2013)

$$E = \left( \frac{S_0 - S}{S_0} \right) \times 100 \quad (6)$$

**Dónde:**

**E:** Eficiencia de remoción, %

**S<sub>0</sub>:** Carga contaminante de salida (mg/l)

**S:** Carga contaminante de entrada (mg/l)

**2.2.14 Eficiencia del lecho:**

$$E = 100 \left( 1 - \frac{k}{\theta^m} \right) \quad (7) \quad (\text{RAS, 2000})$$

**Dónde:**

**E:** Eficiencia del lecho

**K:** Para la grava 1.3 y para el lecho sintético 1

**m:** Coeficiente para la grava es de 0,66 y lecho sintético es de 0,55

**2.2.15 Numero de Reynolds:** Cuando un líquido fluye en un tubo y su velocidad es baja, fluye en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo; a este régimen se le conoce como “flujo laminar”. Conforme aumenta la velocidad y se alcanza la llamada “velocidad crítica”, el flujo se dispersa hasta que adquiere un movimiento de torbellino en el que se forman corrientes cruzadas y remolinos; a este régimen se le conoce como “flujo turbulento” (Alondra Torres, 2008)

$$Re = \frac{D \times V}{\mu} \quad (8)$$

**Dónde:**

**Re:** Numero de Reynolds

**D:** Diámetro

**V:** Volumen

**μ:** Viscosidad

**μ:** Viscosidad

**2.2.16 Factor de dilución:** se aplica el factor de dilución debido a la alta concentración de materia orgánica en la muestra de agua, donde el factor de dilución representa el número de veces que fue diluida la solución concentrada (Contaminación marina, 2012)

$$F = \frac{V_f}{V_i} \quad (9)$$

**Dónde:**

**F:** Factor de dilución

**V<sub>f</sub>:** Volumen final

**V<sub>i</sub>:** Volumen inicial

### 2.3 Bases legales

Normatividad	Contenido
<p>Artículo 5 de la ley 99 de 1993 Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible</p>	<p>Tiene entre sus funciones, regular las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente y dictar regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir la contaminación hídrica en todo el territorio nacional (Becerra, 1994).</p>
<p>Decreto ley 2811 de 1974 Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables RNR</p>	<p>El ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo. Regula el manejo de los RNR, la defensa del ambiente y sus elementos (Lenis, 2014) .</p>
<p>Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015</p>	<p>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 (Minambiente, 2015).</p>
	<p>Art 2: dirección y coordinación del sistema de información ambiental. El</p>

<p style="text-align: center;">Decreto 1600 de 1994 Sistema de información ambiental</p>	<p>IDEAM dirigirá y coordinará el sistema de información ambiental. Precedentes en el ítem 11 donde establece llevar los registros de los vertimientos, emisiones y demás factores que afecten el agua, el suelo, el aire y la biodiversidad, en coordinación con las corporaciones, los entes de control ambiental urbano y las instituciones de investigación relacionadas con los recursos mencionados (Ramon, 1994).</p>
<p style="text-align: center;">RAS 2000 Título E Tratamiento de aguas residuales</p>	<p>El propósito del siguiente título es fijar los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se desarrollen en la República de Colombia, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia (MinDesarrollo, 2000).</p>

## 2.4 Hipótesis

¿El filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) con medio de soporte sintético (tubos PVC), es más eficiente que un filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de soporte granular (grava) en el tratamiento de aguas residuales en la remoción de DQO y SST?

### CAPITULO III: METODOLOGIA

Teniendo en cuenta la información se determinó que existen tres tipos de enfoques como lo son el enfoque cuantitativo, cualitativo y mixto (Cauas, 2015). En la tabla 1 se dará a conocer los tipos enfoques de la investigación con sus respectivas diferencias y similitudes.

**Tabla 1:** *Enfoques de la investigación*

<b>Cuantitativo</b>	<b>Cualitativo</b>	<b>Mixto</b>
Encuestas	Inmersión inicial en el campo	Es la combinación de los enfoques cualitativo y cuantitativo
Experimentación	Interpretación	
Patrones (relaciones entre variables)	Flexibilidad	
Preguntas e hipótesis	Preguntas	
Recolección de datos	Recolección de datos	

**Fuente:** Tomada de («Enfoques cuantitativo, cualitativo y mixto», s. f.)

#### **Enfoque de la investigación:**

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el enfoque mixto, teniendo en cuenta que es la mezcla del enfoque cualitativo, como la información brindada por personas, la revisión bibliografía tanto primaria como secundaria, entre otras y cuantitativo, como datos recolectados en el campo y obtenidos en el laboratorio de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. Mediante el empleo de equipos como pH-metro número de referencia 850 marca Schott y espectrofotómetro con referencia dr2700 marca Hach

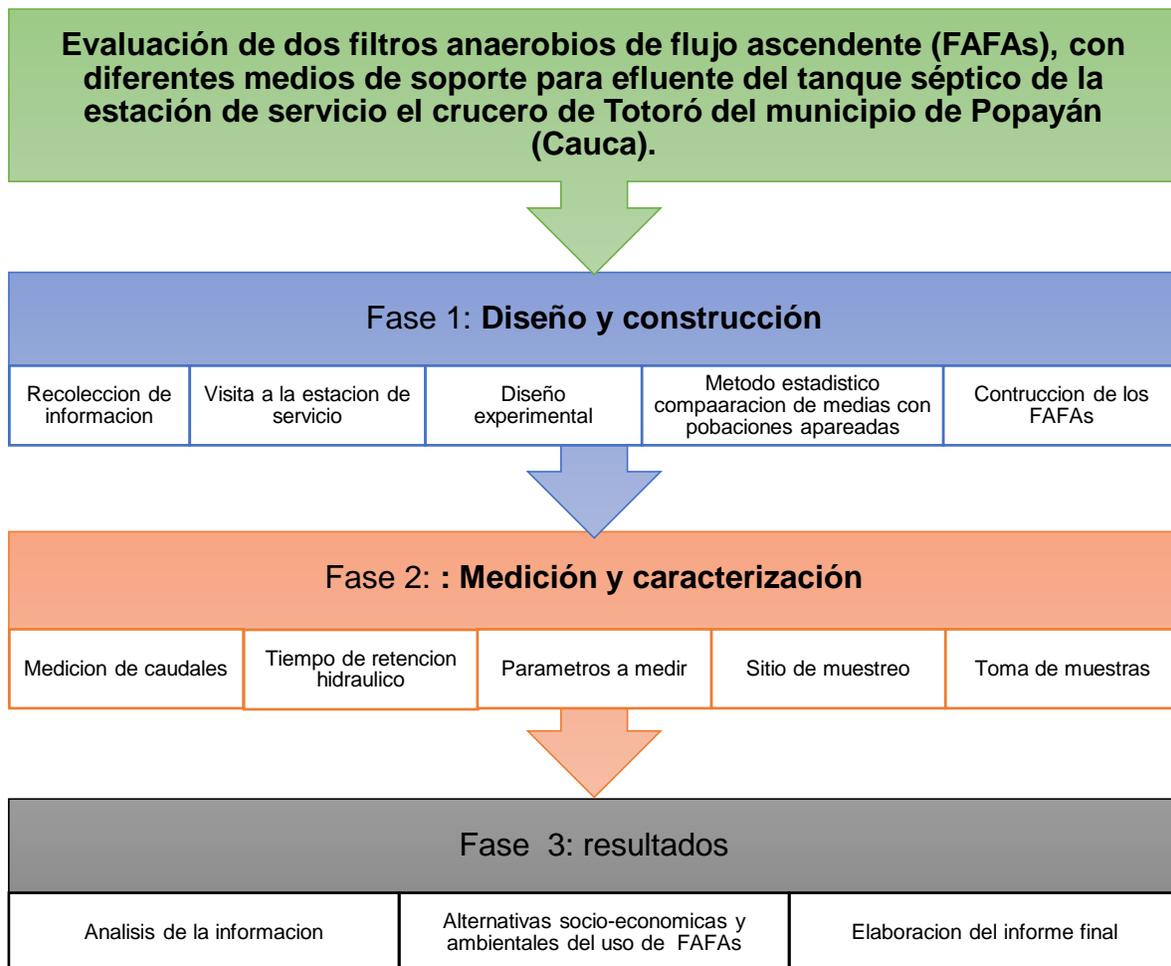
#### **Alcance de la investigación:**

Esta investigación se enmarca en el tipo correlacional debido a que se desarrolló mediante la construcción de dos filtros anaerobios de flujo ascendente con diferente medio de soporte, teniendo una fuente en común para la determinación de dos variables con resultados distintos y además permite dar respuesta a la hipótesis planteada en la investigación.

## Metodología de la investigación

La investigación de este proyecto se desarrolló teniendo en cuenta los objetivos planteados dentro de la investigación y de acuerdo a ellos se establecen tres etapas que son; primer etapa se realiza la construcción y ubicación del FAFA a escala piloto, segunda etapa se inicia con el arranque y aclimatación de las unidades experimentales, tercera etapa evaluación de las unidades experimentales y por último se realiza los análisis de resultados para determinar la eficiencia de cada unidad experimental. A continuación se muestra la tabla 2 en la cual se establecen las etapas y sus respectivas actividades a desarrollar.

**Tabla 2:** Metodología.



**Fuente:** Elaboración propia

### **3.1 Desarrollo de la metodología**

**3.1.1 Diseño y construcción:** Para el desarrollo de la fase uno se llevó a cabo las siguientes actividades.

#### **3.1.1.1 Recolección de información**

En esta fase se realiza las consultas bibliográficas pertinentes para el correcto desarrollo de proyecto de investigación, donde se tuvo en cuenta información relacionada con la implementación de filtros anaerobios de flujo ascendente con diferentes medios de soporte en Colombia, Latino América y el mundo, con el fin de establecer la importancia del uso de los filtros para aguas residuales y la eficiencia que tienen de acuerdo al medio de soporte.

Se recolecto información bibliográfica de revistas científicas, tesis, libros, páginas web, blogs, personas naturales entre otras, lo cual permitió obtener mayor conocimiento en el área de diseño y construcción de filtros a escala de laboratorio y las eficiencias obtenidas de filtros empleados para el tratamiento de aguas residuales con diferentes medios de soporte.

#### **3.1.1.2 Visita a la estación de servicio el crucero de Totoró**

Se realizó la visita a la estación de servicio El Crucero de Totoró, en la cual se hizo un reconocimiento a la zona y el lugar donde se instalaría los filtros, teniendo en cuenta que para alimentar cada filtro con agua residual se debía realizar una conexión del tanque séptico a los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA).

#### **3.1.1.3 Diseño de unidades experimentales**

En esta etapa se realizó el cálculo del área superficial del filtro con la (ecuación 5), la cual requiere el porcentaje de porosidad que se obtiene mediante la (ecuación 4) y el tiempo de retención que se obtiene con la (ecuación 3), este proceso se aplica para cada FAFA dependiendo del medio de soporte, donde el filtro uno tiene un medio granular y el segundo tendrá un lecho sintético (tubo de PVC D = 1/2”), estos filtros serán alimentados por el afluente proveniente del tanque séptico de la estación de servicio El Crucero de Totoró.

**3.1.1.3.1 Tiempo de retención:** se calcula el TRH mediante la (ecuación 3) la cual requiere el volumen total del reactor, el porcentaje de porosidad que se obtiene con

la (ecuación 4) y el caudal promedio que se adquiere con la sumatoria de los aforos la cual se consigue mediante el método volumétrico para cada toma de muestras, el TRH se calcula para el filtro con lecho sintético y lecho de grava.

#### 3.1.1.4 Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas

La característica fundamental de las muestras apareadas, es que a cada observación en el primer grupo, le corresponde una en el segundo grupo. Donde generalmente se trata de dos mediciones realizadas a un mismo individuo en dos ocasiones (Moral Peláez, 2012), respecto al proyecto de investigación se realiza la toma de muestras a dos filtros, con medios de soporte diferentes pero que son abastecidos por la misma fuente proveniente de un tanque séptico.

- En este caso se puede plantear las siguiente hipótesis:  
**Ho:**  $\mu_1 = \mu_2$   
**Ha:**  $\mu_1 \neq \mu_2$
- Sin embargo para el caso apareado se ajustan a las siguientes  
**Ho:**  $\mu_d = 0$   
**Ha:**  $\mu_d \neq 0$
- Donde  $\mu_d$  es la media de las diferencias entre las dos muestras apareadas.
- De esta manera el problema se simplifica en comparar la media con una constante. Por lo cual el estadístico de prueba será:

$$t_0 = \frac{\bar{d}}{S/\sqrt{n}} \quad (10)$$

**Dónde:**

**t<sub>0</sub>:** Comparación de medias con Poblaciones apareadas

**$\bar{d}$ :** diferencia de las medias.

**S:** Desviación estándar.

**n:** Numero de datos

#### 3.1.1.5 Construcción de los FAFAs a escala de laboratorio

Para la construcción de los filtros a escala piloto se empleó dos tanques circulares con una capacidad de 20 litros (L) cada uno, los cuales se usaron para la construcción de los FAFAs, uno con lecho filtrante de grava y el segundo con lecho sintético ambos contruidos con fondo falso, además cuenta con una tubería de entrada de PVC de ½” la cual permite la distribución del flujo para cada sistema regulado mediante una llave de paso plástica, el efluente ingresa a los filtros por la parte inferior pasando a través del falso fondo y luego por el medio de soporte produciendo un flujo ascensional. En la imagen 2 se muestra el falso fondo usado para ambos filtros.

**Imagen 2:** Falso fondo empleado para lecho de grava y lecho sintético



**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 3 se muestran los materiales utilizados para la construcción de los filtros anaerobios de flujo ascendente.

Tabla 3: ***Materiales empleados para la construcción de los filtros***

Ítem	Cantidad
Cuñetes	2
Cinta teflón	1
Tubos PVC ½”	15

Pegante PVC	1
Pattex	1
Llave de paso plástica	1
Segueta	1
Bisturí	1
Codos de ½"	10
Tee de ½"	3
Tapones de ½"	4
Uniones de ½"	4
Manguera ¾"	1 m
Bajante de suero	1
Taladro	1
Instalación eléctrica	1 de (60 m)

**Fuente:** Elaboración propia

En la imagen 3 se puede observar cada filtro en planta, con sus respectivos medios de soporte, listos para ser instalados.

**Imagen 3:** FAFA con medio de soporte sintético y con medio de soporte de grava



**Fuente:** Elaboración propia

**Modo estacionario:** Los filtros anaerobios de flujo ascendente fueron dejados en modo estacionario durante un mes, para este proceso se inoculo con una cantidad

de quinientos mililitros (500 ml) de biopelícula procedente de un filtro anaerobio, el cual trata el AR proveniente del tanque séptico de la estación de servicio, se realizó la inoculación para acelerar el desarrollo de la biopelícula en cada filtro durante el tiempo establecido, después de haber transcurrido este tiempo se inició la toma de muestras.

**3.1.2 Medición y caracterización:** Para el desarrollo de la fase dos se llevó a cabo las siguientes actividades.

#### **3.1.2.1 Medición de caudales**

Para el desarrollo de esta actividad se lleva a cabo la instalación de una llave de paso, la cual permite regular el caudal de entrada que corresponde a  $0,89 \text{ cm}^3/\text{seg}$  proveniente del tanque séptico, el cual ingresa a cada uno de los filtros y permite mantener un flujo constante en la salida, por esta razón se realizan aforos mediante el método volumétrico ( $Q=V/T$ ), para que el caudal de salida de ambos filtros sea similar. Asimismo se instaló la llave de paso plástica de  $\frac{1}{2}$ " que evita que se genere una colmatación en el efluente proveniente del tanque séptico, lo cual conlleva a un funcionamiento idóneo de los FAFA pilotos y mejor desarrollo de la biopelícula.

#### **3.1.2.2 Tiempo de retención hidráulico**

Para el cálculo del tiempo de retención se emplea la (ecuación 3), la cual requiere tener información de volumen, el cual depende de la capacidad que tiene el filtro de estudio, que en este caso equivale a veinte mil centímetros cúbicos ( $20000 \text{ cm}^3$ ) esto para cada uno de los FAFAs, por el porcentaje de porosidad calculado con la (ecuación 4), sobre el caudal de salida, que tiene cada filtro, Lo cual permite establecer el tiempo que tarda el flujo en salir del sistema.

#### **3.1.2.3 Parámetros a medir**

Son variables empleadas para evaluar la calidad del agua, donde la selección apropiada de los parámetros permite alcanzar las metas de eficiencia en los procesos de mejoramiento de las descargas de A.R. Para el desarrollo del proyecto de investigación se seleccionó los parámetros que se muestran en la tabla 4 con sus respectivas unidades, siglas y los equipos que se requieren para su medición.

**Tabla 4:** *Parámetros a medir*

PARÁMETRO	SIGLAS	UNIDAD	EQUIPO
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	Espectrofotómetro
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/l	Espectrofotómetro
Demanda biológica de oxígeno	DBO	Mg/l	correlación
Potencial hidrogeno	pH	Unidades	Peachimetro
Temperatura	T°	°C	Peachimetro

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.1.2.4 Sitio de muestreo

La estación de servicio El Crucero de Totoró, localizado en el municipio de Popayán (Cauca), sobre la vía a Cali en el km 3, Con coordenadas geográficas N 02°30'42,1" W 76°32'38,4" y a una altura de 1853 m.s.n.m., presta el servicio de venta de combustible, cuenta con un Restaurante, un supermercado, un salón de eventos, lavado de vehículos y cambio de aceite. Para el tratamiento de las aguas residuales hay una PTAR que consta de una trampa de grasas, tanque séptico, un filtro anaerobio de flujo ascendente y lecho de infiltración ubicado en la parte baja de la estación, en esta zona se instaló los FAFAs pilotos los cuales fueron alimentados con el efluente del tanque séptico de la estación de servicio.

**Imagen 4:** ubicación de la estación de servicio el crucero de Totoró y ubicación de los filtros («Google Maps», 2017)



### 3.1.2.5 Toma de muestras

Se realizó un muestreo puntual tanto para la entrada como para la salida de cada filtro, para la toma de muestras se utilizaron tres frascos con capacidad un litro (1L), los cuales fueron debidamente purgados como mínimo dos veces, luego se inició con la toma de muestras tanto para la entrada como para la salida de cada filtro, debido a que el sitio de muestreo queda a las afueras de la ciudad se transportó las muestras en una nevera de icopor para ser llevada hasta el laboratorio de la Corporación Universidad Autónoma del Cauca y ser procesadas, el muestreo se realizó cada ocho durante dos meses. Como se puede observar en la imagen 5, donde se realiza un muestreo al efluente del tanque séptico de la estación El Crucero de Totoró.

**Imagen 5:** Toma de muestra de la entrada, proveniente del tanque séptico



**Fuente:** Elaboración propia

**Calculo de la demanda biológica de oxígeno (DBO):** para la obtención de la DBO se realiza una correlación, con los datos obtenidos en el año 2015 en un monitoreo realizado en la estación de servicio El Crucero de Totoró, que fueron analizados por el laboratorio de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) (Corporación Autónoma Regional del Cauca (laboratorio ambiental)), 2015)

## CAPITULO IV: RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados y los análisis de los parámetros como DQO, SST, DBO, pH y Temperatura, los cuales son establecidos para el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados dentro de la investigación. A continuación se muestra la tabla 5 la cual contiene los resultados de cada muestra con sus respectivos parámetros.

**Tabla 5:** *Resultados de cada muestra y sus respectivos parámetros*

<b>2 septiembre de 2016</b>				
<b>MUESTRA</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>T (°C)</b>	<b>SST (mg/L)</b>
<b>Entrada (inicial)</b>	430	6,06	22,9	347
<b>Sistema sintético</b>	203	6,40	23,4	320
<b>Medio de grava</b>	216	6,26	22,5	340
<b>9 septiembre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	520	5,9	23,1	80
<b>Sistema sintético</b>	160	6,8	23,7	30
<b>Medio de grava</b>	100	6,5	22,8	20
<b>16 septiembre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	360	6	22,9	50
<b>Sistema sintético</b>	150	6,3	22,3	20
<b>Medio de grava</b>	80	80	22,4	10
<b>23 de septiembre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	170	6,1	23,7	30
<b>Sistema sintético</b>	160	6,3	22,9	27
<b>Medio de grava</b>	120	6,6	22,2	20
<b>30 de septiembre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	310	6,5	22,3	50
<b>Sistema sintético</b>	150	6,9	21,8	20

<b>Medio de grava</b>	200	6,8	22,2	40
<b>07 de octubre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	(350	6,1	23,4	60
<b>Sistema sintético</b>	220	6,4	23,7	50
<b>Medio de grava</b>	180	6,5	22,8	30
<b>14 de octubre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	290	6,7	23,1	40
<b>Sistema sintético</b>	110	6,8	22,2	20
<b>Medio de grava</b>	190	6,6	21,9	30
<b>21 de octubre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	340	6,9	24,4	50
<b>Sistema sintético</b>	240	6,5	25,3	30
<b>Medio de grava</b>	110	6,8	24,9	10
<b>28 de octubre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	410	6,4	23,1	70
<b>Sistema sintético</b>	380	6,6	22,4	50
<b>Medio de grava</b>	310	6,5	22,6	40
<b>04 de noviembre de 2016</b>				
<b>Entrada (inicial)</b>	300	6,6	22,9	40
<b>Sistema sintético</b>	230	7	22	30
<b>Medio de grava</b>	150	7,1	22,5	30

**Fuente:** Elaboración propia

**4.1 Resultados y análisis de diseño y construcción:** Construir a escala piloto dos filtros anaerobios de flujo ascendente con diferente medio de soporte. Donde se realiza el cálculo de la porosidad, tiempo de retención y área superficial. Para realizar los cálculos se requiere la determinación de caudales donde se utilizó el método volumétrico aforando a la salida de los filtros y los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 6.

**Tabla 6:** Determinación de caudales para los FAFA con lecho de grava y lecho sintético.

FECHA	FILTRO DE GRAVA			FILTRO SINTETICO		
	Vol (cm <sup>3</sup> )	Tiempo (seg)	Q(cm <sup>3</sup> /seg)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Tiempo (seg)	Q(cm <sup>3</sup> /seg)
02/Sep/2016	28	62	0,452	30	67	0,448
09/Sep/2016	30	68	0,441	32	69	0,464
16/Sep/2016	30	67	0,448	30	65	0,462
23/Sep/2016	32	70	0,457	29	66	0,439
30/Sep/2016	34	75	0,453	33	75	0,440
07/Oct/2016	32	72	0,444	36	82	0,439
14/Oct/2016	31	67	0,463	34	78	0,436
21/Oct/2016	29	66	0,439	29	67	0,433
28/Oct/2016	30	66	0,455	31	70	0,443
04/Nov/2016	28	65	0,431	32	70	0,457
<b>Promedio</b>	30,4	67,8	0,448	31,6	70,9	0,446

**Fuente:** Elaboración propia

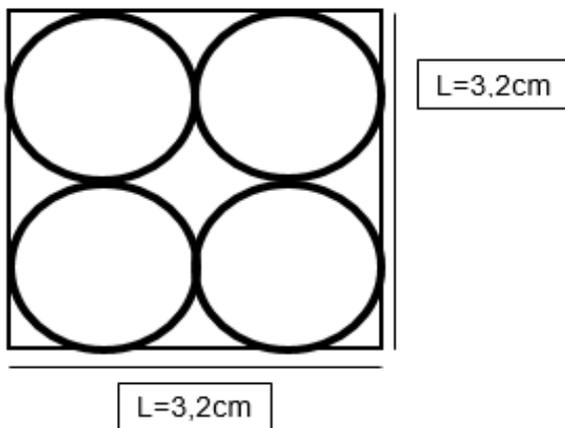
Debido a que la distribución del afluente se deriva por medio de una tee para cada filtro, se puede considerar que los caudales que ingresan a los filtros son similares. Se corrobora con los aforos de salida donde se determinó caudales promedio de 0,448 (cm<sup>3</sup>/seg) para el filtro con lecho de soporte de grava, y 0,446 (cm<sup>3</sup>/seg) para el filtro con lecho de soporte sintético.

#### 4.1.1 Porcentaje de porosidad

La porosidad determina el volumen útil de los reactores, además permite una mejor distribución del flujo dentro del reactor evitando taponamiento y la colmatación del FAFA.

#### Porosidad del tubo:

**Imagen 6:** Fracción del medio sintético visto en planta



**Fuente:** Elaboración propia

**Datos:**

Espesor de pared del tubo ( $\epsilon$ )= 1,73 mm =0,173 cm

Diámetro del tubo= 16 mm=1,6 cm

**Área total**

$$1,6 \text{ cm} \times 2 \text{ tubos} = 3,2 \text{ cm} \quad A_t = 3,2 \text{ cm} \times 3,2 \text{ cm} = \mathbf{10,24 \text{ cm}^2}$$

$$Area = \frac{\pi \times (1,6 \text{ cm})^2}{4} - \frac{\pi \times (1,25 \text{ cm})^2}{4} = \mathbf{0,77 \text{ cm}^2}$$

**Diámetro promedio del tubo**

$$D = \frac{D_{ex} + D_{int}}{2}$$

$$D_{int} = D_{ext} - 2(\epsilon)$$

$$D = \frac{1,6 \text{ cm} + (1,6 \text{ cm} - 2(0,173 \text{ cm}))}{2} = \mathbf{1,43 \text{ cm}}$$

**Área promedio del tubo**

$$A_p = D \times T \times (\epsilon)$$

$$A_p = 1,43 \text{ cm} \times \pi \times 0,173 \text{ cm} = \mathbf{0,77 \text{ cm}^2}$$

**Área total del tubo**

$$0,77cm^2 \times 4 = 3,08 cm^2$$

### **% Porosidad**

$$\%P = \frac{A_{to} - A_{tu}}{A_{to}} \times 100$$

$$\%P = \frac{10,24cm^2 - 3,08cm^2}{10,24cm^2} \times 100 = 70\%$$

Se determina la porosidad del lecho sintético el cual tiene un 70% para un diámetro de 1/2"

### **Porosidad de la grava**

La porosidad que se adoptó para la grava se encuentra establecida en el RAS 2000, con este soporte literario se instaure que la grava tiene una porosidad del 40% para un diámetro promedio de 1". Por lo tanto se determina que el lecho sintético tiene mayor porcentaje de porosidad en comparación al lecho de grava, esto se debe a que el lecho sintético tiene mejor distribución llevando un orden en comparación a la grava la cual es asimétrica.

#### **4.1.2 Tiempo de retención**

Es el tiempo teórico que se demora un fluido en desplazarse entre la entrada y la salida de un sistema de tratamiento, es el principal factor que influye en el rendimiento de los filtros anaerobios de flujo ascendente. Para el cálculo del tiempo de retención se utilizó la (ecuación 3)

#### **Tiempo de retención del lecho sintético**

$$Tr = \frac{20.000cm^3 \times 0,70}{0,44 cm^3/sg} = 31.818sg$$

$$Tr = 31.818 sg \times \frac{1h}{3600sg} = 8,8 h$$

#### **Tiempo de retención del lecho de grava**

$$Tr = \frac{20.000cm^3 \times 0,40}{0,44cm^3/sg} = 18.181,8sg$$

$$Tr = 18.181,8sg \times \frac{1h}{3600sg} = 5,05 h$$

La porosidad del lecho sintético equivale al 70%, y el filtro con lecho de grava tiene una porosidad del 40% según el RAS 2000 Titulo E. Los tiempos de retención calculados en un sistema son proporcionales a la porosidad, debido a que el filtro con medio sintético es simétrico en comparación a la grava, ocupando menor volumen y con mayor porosidad.

#### 4.1.3 Área superficial

El área superficial es la relación de contacto sobre el volumen ocupado del material de soporte.

##### Área externa

$$A_{ext} = D_{ext} \times \pi$$

##### Dónde:

**A<sub>ext</sub>**: Área externa (cm<sup>2</sup>)

**D<sub>ext</sub>**: Diámetro externo (cm)

**L<sub>tu</sub>**: Longitud del tubo (cm)

$$A_{ext} = 1,6cm \times \pi = 5,02cm^2$$

$$A_{ext} = 5,02cm^2 \times 28cm = 140,56cm^3$$

##### Área interna

$$A_{int} = D_{int} \times \pi$$

##### Dónde:

**A<sub>int</sub>**: Área interna (cm<sup>2</sup>)

**D<sub>int</sub>**: Diámetro interno (cm)

$$A_{int} = 1,25 \times \pi = 3,92cm^2$$

$$A_{int} = 3,92cm^2 \times 76 = 109,76m^3$$

##### Área superficial total

$$As_{to} = D_{int} \times L_{tu}$$

**Dónde:**

**As<sub>to</sub>:** Área superficial (cm<sup>2</sup>)

**D<sub>int</sub>:** Diámetro interno (cm)

**L<sub>tu</sub>:** Longitud del tubo (cm)

$$As_{to} = 250,32 \text{ cm}^2 \text{ de un tubo}$$

**Área superficial del lecho sintético:** para el cálculo del área superficial se utiliza la (ecuación 5).

$$At = \frac{34293,84 \text{ cm}^2}{20000 \text{ cm}^3} = 1,7 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} = 170 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

### **Área superficial del lecho de grava**

De acuerdo a la literatura, («RIMH - Aprotéc», s. f.), esta reporta que el área superficial de la grava con diámetro promedio de 1" = 143 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Se determina que el lecho sintético posee mayor área superficial, debido a que tiene una superficie interna y externa, lo que permite tener mayor área a diferencia de la grava, la cual solo cuenta con una superficie externa.

## **4.2 Resultados y análisis del porcentaje de eficiencia de la DQO y SST.**

La remoción de la DQO y SST depende del tipo de lecho con el que se construyó el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), por ende el medio de soporte empleado arrojará eficiencias diferentes, y se podrá establecer cuál de los filtros tiene mayor viabilidad de acuerdo a su eficiencia.

### **4.2.1 Cálculo de porcentaje de eficiencia de la DQO para cada filtro.**

Para el cálculo del porcentaje de eficiencia de la DQO, se empleó la (ecuación 6), donde el cálculo de este parámetro permite determinar los días en que los filtros obtuvieron mayor eficiencia y establecer cual removió mayor carga contaminante. En la tabla 7 se muestran los resultados de remoción obtenidos para la demanda química de oxígeno (DQO).

**Tabla 7:** Remoción de demanda química de oxígeno (DQO)

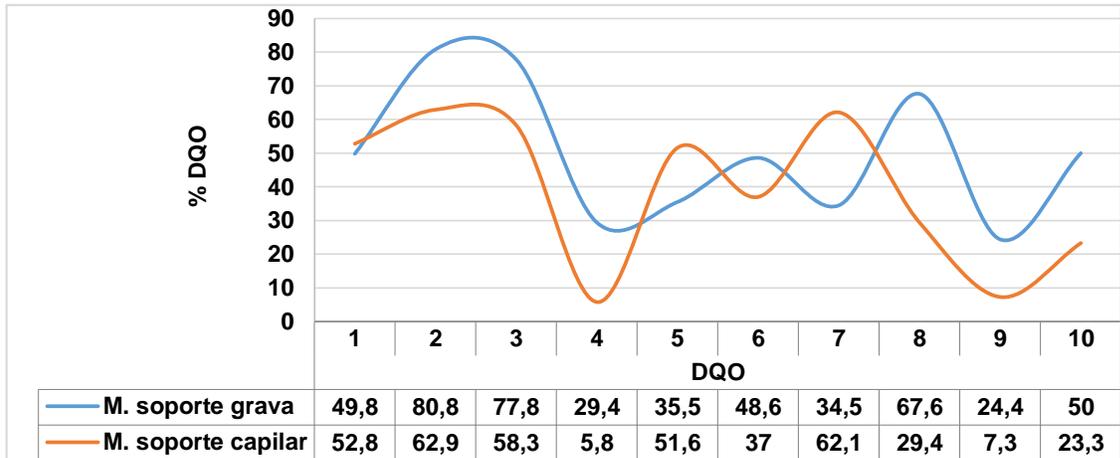
Fecha	Filtros con lecho sintético			Filtro con lecho de grava		
	Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Remoción (%)	Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Remoción (%)
02/sep/2016	430	203	<b>52,8</b>	43	216	<b>49,8</b>
09/sep/2016	520	160	<b>69,2</b>	520	100	<b>80,8</b>
16/sep/2016	360	150	<b>58,3</b>	360	80	<b>77,8</b>
23/sep/2016	170	160	<b>5,8</b>	170	120	<b>29,4</b>
30/sep/2016	310	150	<b>51,6</b>	310	200	<b>35,5</b>
07/sep/2016	350	220	<b>37</b>	350	180	<b>48,6</b>
14/oct/2016	290	110	<b>62,1</b>	290	190	<b>34,5</b>
21/oct/2016	340	240	<b>29,4</b>	340	110	<b>67,6</b>
28/oct/2016	410	380	<b>7,3</b>	410	310	<b>24,4</b>
04/nov/2016	300	230	<b>23,3</b>	300	150	<b>50</b>
<b>Promedio</b>	348	200.3	<b>39.68</b>	309.3	165.6	<b>49.84</b>

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla anterior se observa los porcentajes de remoción de los filtros, donde FFAA con medio de soporte de grava tiene un porcentaje de remoción del 49,84 % y el FFAA con medio sintético (tubos de PVC ½”) obtuvo 39,68 %, son eficiencias aceptables, que permite determinar que el filtro de grava (porosidad 40%) tuvo mayor remoción así su porosidad haya sido menor a la porosidad del filtro sintético (70% de porosidad). Esta comparación se realiza con el fin de alcanzar el objetivo 3 el cual solo pide la comparación de las eficiencias de remoción entre los lechos filtrantes y no con una normativa de control o existente.

También la capacidad de hidrofobicidad que tiene cada lecho el cual depende del material con el que se construyó, en la investigación para el lecho sintético se emplea tubos de PVC de ½” que tienen mayor energía libre en comparación a la grava, debido a que tiene mayor energía libre habrá menor expansión del agua reduciendo la capacidad de adhesión de las partículas en suspensión.

**Grafica 1: Porcentaje de remoción de la DQO**



**Fuente:** Elaboración propia.

En la anterior grafica se puede observar que después de la primera semana el medio con soporte de grava tuvo una mayor remoción, esto se debe a la formación de biopelícula la cual tuvo una mejor adhesión, en este proceso intervienen fuerzas de cohesión entre el material formado y las partículas en suspensión, aunque también se manifiestan fuerzas de atracción electrostática del tipo de fuerzas de London y de Van Der Waals («Filtración de grava y arena», 2009) . En la semana cuarta (4) se muestra un aumento en la remoción, esto se debe a que en dicha semana se realizó mantenimiento y limpieza del tanque séptico cuyo efluente alimenta los pilotos de estudio, y a partir de la semana quinta (5) hay una estabilización en la remoción debido a la maduración de la biopelícula.

**Eficiencia:** Para el cálculo de la eficiencia se utilizó la (ecuación 7), de esta manera se establece la eficiencia que tiene cada lecho.

**Calculo de la eficiencia del lecho sintético**

$$E = 100 \left( 1 - \frac{1}{8,8h^{0,55}} \right) = 69\%$$

**Calculo de la eficiencia del lecho de grava**

$$E = 100 \left( 1 - \frac{1,3}{5,05h^{0,66}} \right) = 55\%$$

De acuerdo a las ecuaciones se determina la eficiencia de remoción de materia orgánica del lecho sintético, el cual tiene mayor eficiencia de remoción en comparación al lecho con grava, con un soporte literario ( título E RAS 2000), donde se establece que los materiales de soporte con mayor porosidad y mayor área superficial, van a tener mejor eficiencia de remoción que los compuestos por grava, debido a que estas tienen una constante de velocidad mayor a la constante de velocidad de la piedra ( $K_{\text{plastico}} = 0,40 \text{ dia}^{-1}$  y  $k_{\text{piedra}} = 0,02 \text{ dia}^{-1}$ ) (título E RAS 2000) sin embargo esto es controvertido debido a que en la investigación realizada se determina que el lecho de grava obtuvo mejor remoción lo cual se puede analizar con lo siguiente:

- Presuntivamente los lechos en grava cuya superficie presentan mayor rugosidad favorecen el crecimiento y adhesión de la biopelícula, factor que favorece a la densidad microbiana la cual va a ser proporcional al consumo de nutrientes y por ende a la disminución de la concentración de la materia orgánica de salida
- El lecho de soporte de grava tiene la posibilidad de aportar micronutrientes que favorece el metabolismo microbiano tales como óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), presente en las rocas de tipo volcánicos (triturados usado como lecho de soporte), a lo contrario de los lechos sintéticos donde estos son ausentes (Díaz Valdivieso & Ramírez Carrión, 2009).

Dentro de la composición química del material de soporte o grava se puede presentar el contenido de óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), que en rocas de origen volcánico puede variar entre 0,1% a 0,4% («Geotecnia y cimientos, S.A.», 1978). Este compuesto es conocido por su efecto catalizador que dentro de los procesos biológicos favorece a la oxidación de productos orgánicos recalcitrantes (Garcés Giraldo, Franco, Alejandro, & Santamaría Arango, 2012).

#### **4.2.2 Cálculo del porcentaje de eficiencia de SST para cada filtro.**

Para el cálculo del porcentaje de eficiencia de los SST, se empleó la (ecuación 6), donde la determinación de este parámetro permite establecer cuál de los filtros tuvo mayor remoción de residuos orgánicos. En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos.

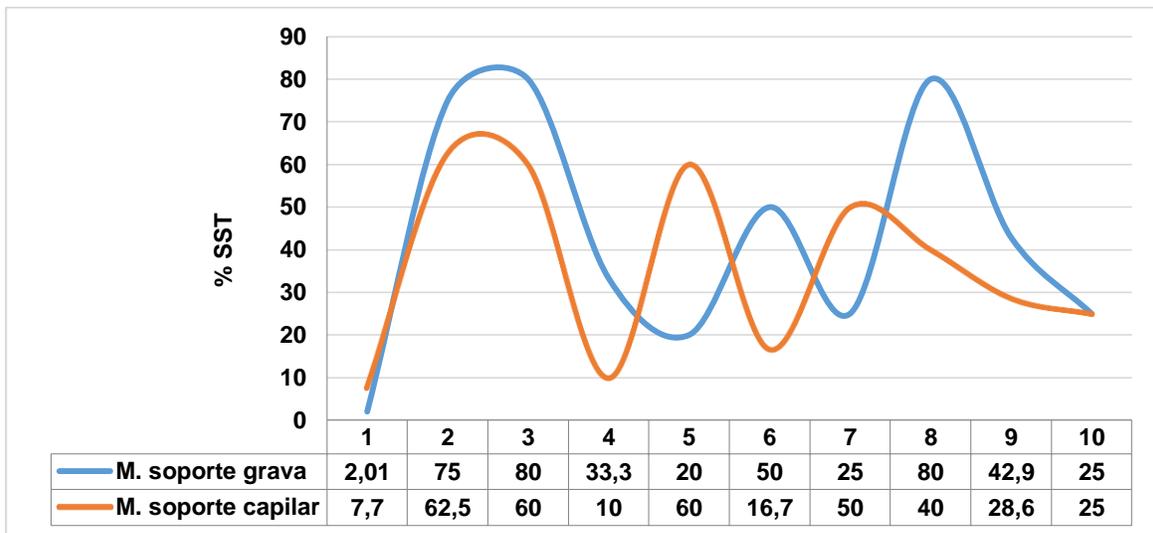
**Tabla 8:** *Porcentaje de eficiencia de SST*

Fecha	Filtro con lecho sintético			Filtro con lecho de grava		
	Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Remoción (%)	Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Remoción (%)
02/sep/2016	347	320	<b>7,7</b>	347	340	<b>2,01</b>
09/sep/2016	80	30	<b>62,5</b>	80	20	<b>75</b>
16/sep/2016	50	20	<b>60</b>	50	10	<b>80</b>
23/sep/2016	30	27	<b>10</b>	30	20	<b>33,3</b>
30/sep/2016	50	20	<b>60</b>	50	40	<b>20</b>
07/oct/2016	60	50	<b>16,7</b>	60	30	<b>50</b>
14/oct/2016	40	20	<b>50</b>	40	30	<b>25</b>
21/oct/2016	50	30	<b>40</b>	50	10	<b>80</b>
28/oct/2016	70	50	<b>28,6</b>	70	40	<b>42,9</b>
4/nov/2016	40	30	<b>25</b>	40	30	<b>25</b>
<b>Promedio</b>	81,5	59,7	<b>36,5</b>	81,7	57	<b>43,32</b>

**Fuente:** Elaboración propia

En tabla 8 se observa los porcentajes de remoción de los filtros, donde FAFA con medio de soporte de grava tiene un porcentaje de remoción del 43,32 % y el FAFA con medio de soporte sintético (PVC) obtuvo 36,5 %, esto indica que el filtro con medio de soporte de grava es más eficiente en la remoción de residuos orgánicos. En la gráfica 2 se puede observar el porcentaje de eficiencia de SST, con respecto al tiempo.

**Grafica 2:** *Porcentaje de eficiencia de SST*



**Fuente:** Elaboración propia

En la anterior grafica se puede observar que después de la primera semana el medio con soporte de grava tuvo una mejor remoción de SST, debido a que en el proceso inicial de biopelícula ayuda a la retención de estas partículas, porque la gran mayoría son nutrientes que sirven para el crecimiento del biofilm, por otro lado se puede observar que después de la tercera semana las eficiencias decaen ya que la concentración de entrada de este parámetro disminuye por la limpieza del tanque séptico de la estación de servicio.

Con el fin de justificar las remociones generadas por los diferentes lechos de soporte se realiza un análisis de conductividad hidráulica y régimen de flujo. A continuación se calcula el área de la grava y diámetro promedio de los espacios (esto con el fin de realizar una relación dimensional y asemejarlos a un conducto circular), datos requeridos para calcular el número de Reynolds, con el cual se podrá establecer si el flujo es turbulento o laminar.

### Área de la grava

$$A = A_f \times \%P$$

**Dónde:**

**A:** Área de la grava (m<sup>2</sup>)

**A<sub>f</sub>:** Área del filtro (m<sup>2</sup>)

**%P:** porcentaje de porosidad

$$A = 0,0707 \text{ m}^2 \times 0,4 = 0,028 \text{ m}^2$$

### **Diámetro de la grava.**

$$D = \frac{\sqrt{A \times 4}}{\pi}$$

**Dónde:**

**D:** Diámetro grava

**A:** Área de la grava (m<sup>2</sup>)

$$D = \frac{\sqrt{0,028m^2 \times 4}}{\pi} = 0,188m$$

### **Volumen**

$$V = \frac{Q}{A}$$

**Dónde:**

**V:** volumen (m<sup>3</sup>/s)

**Q:** caudal promedio (m<sup>3</sup>/s)

**A:** área hidráulica (m<sup>2</sup>)

$$V = \frac{0,448 \times 10^{-6} m^3/s}{0,028m^2} = 1,6 \times 10^{-5} m/s$$

**Número de Reynolds:** para el cálculo del número de Reynolds se utiliza la (ecuación 8)

$$R = \frac{1,6 \times 10^{-5} m/s \times 0,188m}{1 \times 10^{-6} m^2/s} = 3$$

### **Área del lecho sintético**

$$A = A_f \times \%P$$

**Dónde:**

**A:** Área lecho sintético (m<sup>2</sup>)

**A<sub>f</sub>**: Área del filtro (m<sup>2</sup>)

**%P**: porcentaje de porosidad

$$A = 0,0707 \text{ m}^2 \times 0,7 = 0,049 \text{ m}^2$$

**Diámetro del lecho sintético.**

$$D = \frac{\sqrt{A} \times 4}{\pi}$$

**Dónde:**

**D**: Diámetro grava

**A**: Área de la grava (m<sup>2</sup>)

$$D = \frac{\sqrt{0,049 \text{ m}^2} \times 4}{\pi} = 0,25 \text{ m}$$

**Volumen**

$$V = \frac{Q}{A}$$

**Dónde:**

**V**: volumen (m/s)

**Q**: caudal promedio (m<sup>3</sup>/s)

**A**: área hidráulica (m<sup>2</sup>)

$$V = \frac{0,448 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{0,049 \text{ m}^2} = 9,1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

**Número de Reynolds:** para el cálculo del número de Reynolds se utiliza la (ecuación 8).

$$R = \frac{9,1 \times 10^{-6} \text{ m/s} \times 0,25 \text{ m}}{1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 2,28$$

De acuerdo a los resultados obtenidos en el cálculo del número de Reynolds para cada lecho filtrante, se obtuvo que el reactor con lecho de grava es laminar al igual que el lecho sintético, con la diferencia que el lecho de grava tiene menor

comportamiento laminar, debido a este factor se puede determinar que dentro del lecho de grava la colisión de sólidos es mayor por ende la adsorción de estos serán mayor que el reactor de soporte sintético(Barbero, 2007).

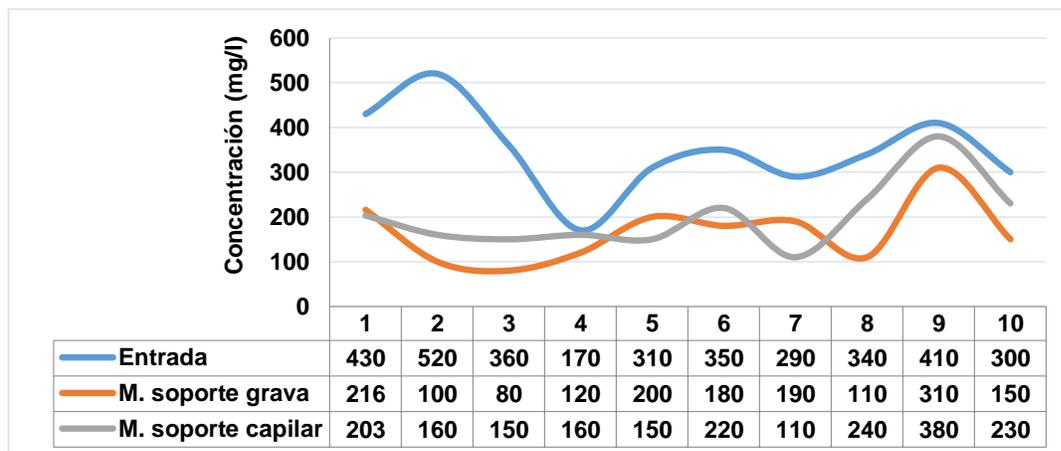
### 4.3 Gráficas y análisis de resultados de las concentraciones de DQO, DBO, SST y los valores de pH y temperatura.

La concentración de los SST y DQO, permiten establecer la remoción de materia orgánica dentro de cada filtro, arrojando resultados que permiten establecer cuál de los dos sistemas es más eficiente. Se realiza una gráfica tanto para temperatura como para pH con respecto al tiempo establecido en semanas, donde se podrá observar el comportamiento de estos parámetros a medida que transcurre el periodo de investigación.

#### 4.3.1 Relación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), de la entrada, filtro con medio de grava y filtro con lecho sintético.

En la gráfica 3 se puede observar que la DQO de salida de cada filtro varía notablemente con respecto a la DQO tomada del efluente, demostrando la efectividad de cada sistema para remover este parámetro, esto se debe a que se maneja un tiempo estacionario para cada filtro, además los filtro anaerobios de flujo ascendente tienen diferentes medios de soporte donde el filtro uno tiene lecho de grava y el filtro dos tiene un lecho sintético, lo que genera mayor remoción y se ve reflejada en la gráfica 4 de concentraciones que se muestra a continuación.

**Gráfica 3:** Concentración de la DQO



**Fuente:** Elaboración propia.

En la gráfica se muestra las concentraciones de la entrada para cada filtro con su respectivo medio de soporte, donde la concentración más baja corresponde al filtro con medio de grava, aunque en las semanas 5 y 7 son mayores estando por encima del medio sintético, esto se debe a que la concentración de materia orgánica del agua residual proveniente del tanque séptico aumento en comparación a las semanas anteriores.

#### 4.3.2 Relación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), de la entrada, filtro con medio de grava y filtro con lecho sintético.

Para el cálculo del porcentaje de eficiencia de la DBO, se empleó la (ecuación 6), donde la determinación de este parámetro permite establecer cuál de los filtros tuvo mayor remoción de materia orgánica. En la tabla 9 se muestra los resultados obtenidos.

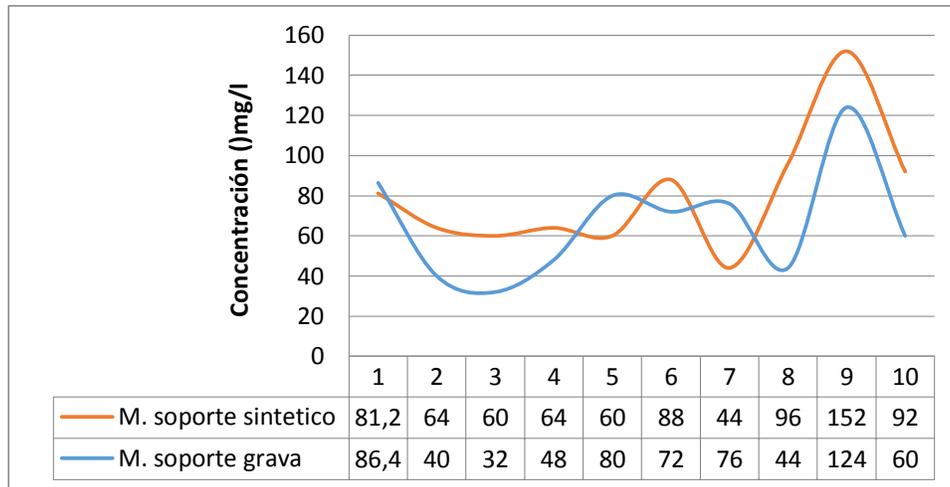
**Tabla 9:** concentración de la DBO

Filtro con lecho sintético		Filtro con lecho de grava	
Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)
172	81,2	172	86.4
208	64	208	40
144	60	144	32
68	64	68	48
124	60	124	80
140	88	140	72
116	44	116	76
136	96	136	44
164	152	164	124
120	92	120	60

**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó el cálculo de la DBO para cada filtro como se muestra en la tabla anterior, para obtener los datos de entrada y salida de los FFA se realizó una correlación con los resultados proporcionados por el laboratorio de la corporación autónoma regional del cauca (CRC) en el año 2015, con los cuales se realizó el cálculo de la eficiencia, En la gráfica 4 se puede observar la eficiencia de la DBO, con respecto al tiempo.

**Grafica 4:** concentración de la DBO



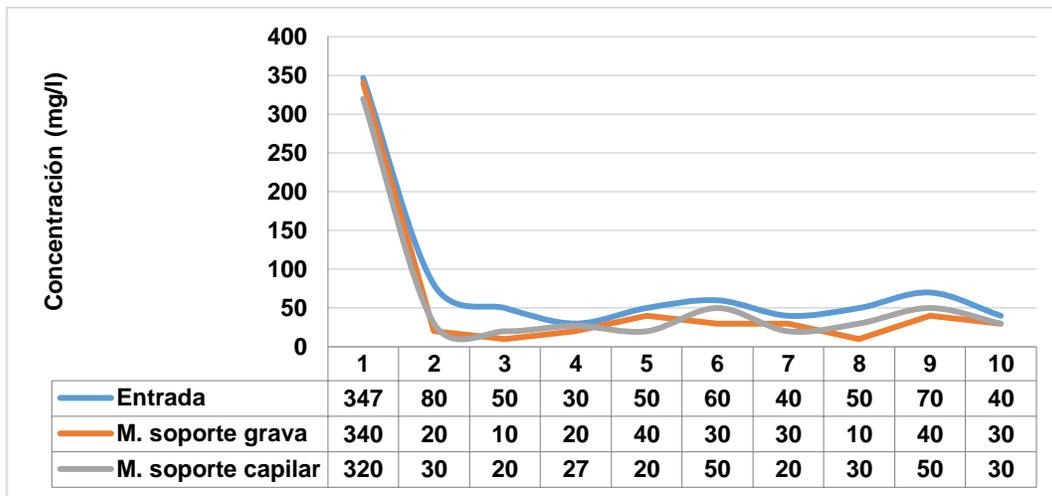
**Fuente:** Elaboración propia

En la gráfica anterior se muestra las concentraciones de la entrada para cada filtro con su respectivo medio de soporte, donde la concentración más baja corresponde al filtro con medio de grava, aunque en las semanas 5 y 7 son mayores estando por encima del medio sintético, esto se debe a que la concentración de materia orgánica del agua residual proveniente del tanque séptico aumento en comparación a las semanas anteriores.

#### **4.3.3 Relación de los Sólidos Suspendidos Totales (SST), entrada, medio de grava y medio sintético.**

Los sólidos suspendidos totales, como se muestra en la gráfica 5 indican un comportamiento constante en su variación, donde se puede establecer que el filtro con medio de soporte grava es más eficiente debido a que su concentración de salida es de 57 mg/l y el filtro con lecho sintético tiene un efluente con mayor Concentración de salida de 59,7 mg /l, aunque la diferencia no es tan alta, indica que el filtro con medio de grava remueve mayor residuos orgánicos durante el desarrollo de la investigación.

**Grafica 5:** Concentración de los SST



**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 10 se puede observar los datos obtenidos durante la investigación en el transcurso de los dos meses, con ellos se logra determinar cuál removió más sólidos suspendidos totales y tener mayor claridad acerca del análisis realizado.

**Tabla 10:** Concentración de SST

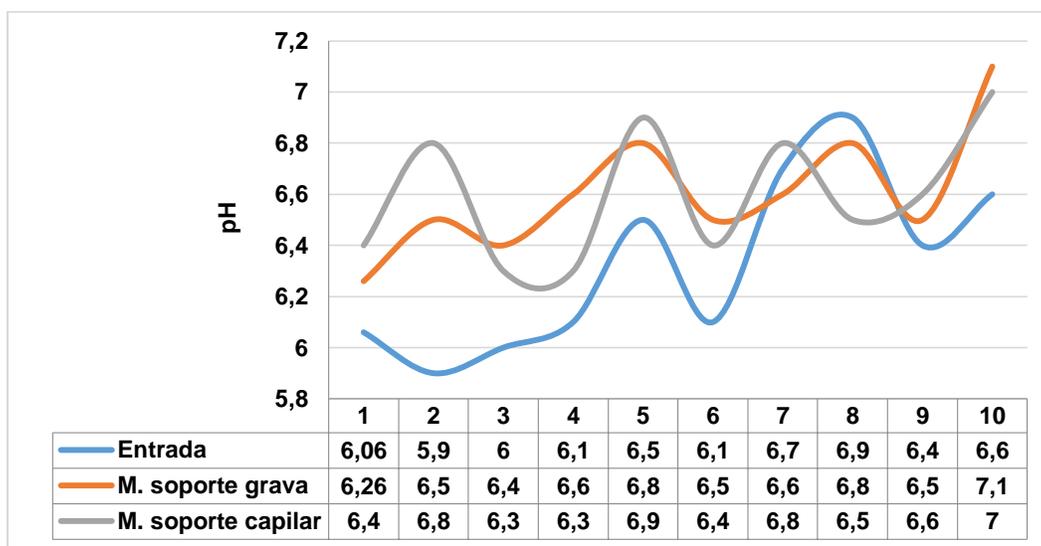
SST (mg/l)		
entrada	medio grava	sistema sintético
347	340	320
80	20	30
50	10	20
30	20	27
50	40	20
60	30	50
40	30	20
50	10	30
70	40	50
40	30	30

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.3.4 Relación los pH de entrada, medio de grava y medio sintético

En la gráfica 6 el pH muestra su comportamiento con respecto al tiempo, en esta se aprecia que el valor de la entrada es variable, los valores de los filtros se mantuvieron constantes y por lo tanto se puede decir que en el filtro de lecho sintético tiene un pH de ácidos débiles y el filtro con lecho de grava tiene un pH que tiende a ser una base débil, esto se debe a la reducción de la carga contaminante dentro de cada sistema

**Gráfica 6:** Valores de pH con respecto al tiempo

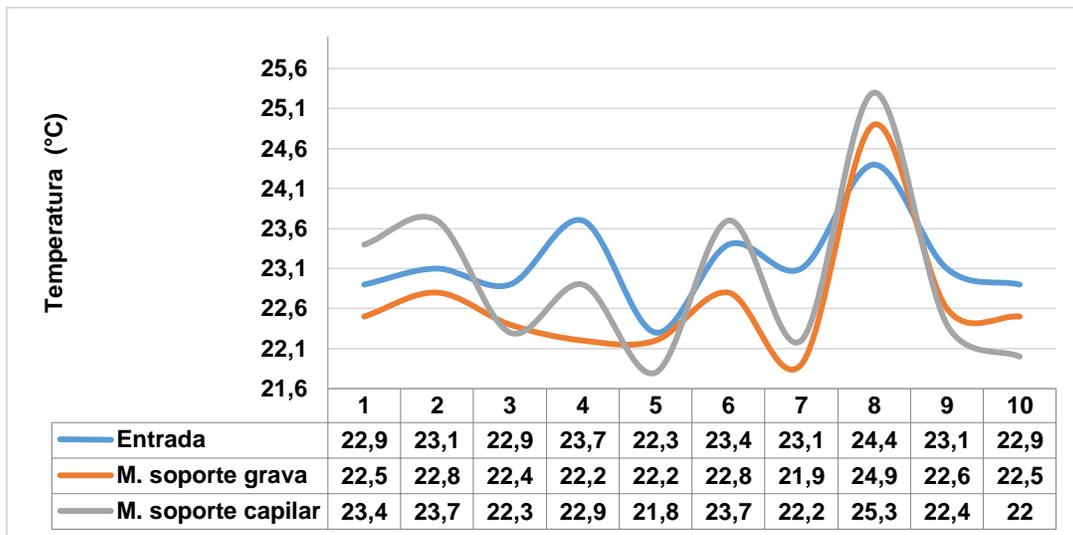


**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.5 Relación de las temperaturas de entrada, medio de grava y medio sintético.

La grafica 7 muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo, tanto para la entrada como para la salida cada uno de los filtros.

**Gráfica 7:** Valores de temperatura en relación al tiempo.



**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo a la gráfica anterior los valores de temperatura varían con respecto al tiempo, los cuales dependen de las variaciones climáticas al momento de ser tomada la muestra. Además con los datos obtenidos se establece que los valores de temperatura son ideales para que ocurran los procesos biológicos.

#### 4.3.6 Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas.

Para la investigación se optó por el método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas, teniendo en cuenta que en este método se toman muestras aleatorias en los dos tratamientos y debe verificarse que ambos tratamiento estén sometidos a la misma condiciones, como ser abastecidos por el mismo efluente, este es el caso de la investigación donde los filtros son abastecidos por el efluente proveniente del tanque séptico, pero los filtros tienen medio de soporte diferentes. Además, las muestras son tomadas al mismo tiempo.

#### Comparación de medidas con poblaciones apareadas

En este caso se puede plantear la siguiente hipótesis:

##### Hipótesis:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2$  ( $\mu_1$  la media de la concentración de salida del filtro en grava es igual a la media de la concentración de salida del filtro sintético).
- $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$  ( $\mu_1$  la media de la concentración de salida del filtro en grava es diferente a la media de la concentración de salida del filtro sintético).

**H<sub>0</sub>**: hipótesis nula

**H<sub>a</sub>**: hipótesis no nula

Sin embargo para el caso apareado se ajustan a las siguientes

- $H_0: \mu d = 0$  (diferencia entre concentración de salida de la grava y del sintético (PVC de 1/2") es igual a cero)
- $H_a: \mu d \neq 0$  (diferencia entre la concentración de salida no es igual a cero)

Donde  $\mu d$ : es la media de las diferencias entre las dos muestras apareadas.

De esta manera el problema se simplifica en comparar la media con una constante. Por lo cual el estadístico de prueba será:

$$t^0 = \frac{\bar{d}}{S/\sqrt{n}} \quad (10)$$

**Dónde:**

**t<sub>0</sub>**: Comparación de medias con Poblaciones apareadas

**$\bar{d}$** : diferencia de las medias para DQO,SST

**S**: Desviación estándar.

**n**: Numero de datos

**$\bar{X}$**  = corresponde a la media de las diferencias de las concentraciones de salida para los parámetros DQO, SST

**$\mu_0$**  = corresponde al valor de la constante que para este caso toma el valor de 0.

Por lo tanto la expresión queda así:

Se rechaza  $H_0$  si  $|t_0| > t_{\alpha/2}$  o sea las áreas bajo la curva a la derecha del punto  $t_{\alpha/2}$ .

**NOTA:** Debido a que se van a evaluar dos parámetros DQO,SST se realiza el análisis estadístico para cada uno de ellos, con respecto al análisis estadístico para la DBO no se realiza el análisis debido a que ese no se obtuvo por medición directa sino por una correlación DBO/DQO.

#### 4.3.6.1 Muestras apareadas de la concentración de la DQO

En la tabla 11 se realizó el cálculo de la demanda química de oxígeno (DQO), utilizando la (ecuación 2) para el cálculo de la media, la (ecuación 1) para el cálculo de la varianza y la (ecuación 10) del método estadístico de comparación de medias

con poblaciones apareadas, la cual se emplea para determinar si los efluentes son iguales o diferentes de acuerdo a los parámetros evaluados.

**Tabla 11:** Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas para las concentraciones de la DQO.

Numero de datos	M. soporte sintético DQO (mg/l)	M. de soporte de grava DQO (mg/l)	Diferencia
1	203	216	-13
2	160	100	60
3	150	80	70
4	160	120	40
5	150	200	-50
6	220	180	40
7	110	190	-80
8	240	110	130
9	380	310	70
10	230	150	80
MEDIA	200,3	165,6	34,7
VARIANZA	5160,81	4242,24	3692,81

**Fuente:** Elaboración propia

Calculo de la DQO con la (ecuación10) para muestras apareadas.

$$t^0 = \frac{34,7}{60,77/\sqrt{10}} = 1,81$$

De acuerdo a los resultados obtenidos en el cálculo de la DQO para cada uno de los filtros se establece una diferencia, mediante la cual se calcula la media y la varianza, además para obtener el resultado del método estadístico y establecer si los efluentes son iguales o diferentes, se aplica la (ecuación 10) del método estadístico, el cual dio como resultado una  $t_0 = 1,81$  la cual establece que es menor que la  $t_{\alpha/2} = 2,060$ , determinando que los dos efluentes son similares y que los medios de soporte realizan la misma remoción de materia orgánica en ambos sistemas.

#### 4.3.6.2 Muestras apareadas de la concentración de la SST

En la tabla 12 se realizó el cálculo de los sólidos suspendidos totales (SST), utilizando la (ecuación 2) para el cálculo de la media, la (ecuación 1) para el cálculo

de la varianza y la (ecuación 10) del método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas, la cual se emplea para determinar si los efluentes son iguales o diferentes.

**Tabla 12:** Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas para las concentraciones de SST.

Numero de datos	M. soporte de grava SST (mg/L)	M. soporte sintético SST (mg/l)	Diferencia
1	340	320	-20
2	20	30	10
3	10	20	10
4	20	27	7
5	40	20	-20
6	30	50	20
7	30	20	-10
8	10	30	20
9	40	50	10
10	30	30	0
media	57	59,7	2,7
varianza	9001	7638,81	17,61

**Fuente:** Elaboración propia.

Calculo de SST con la (ecuación 10) para muestras apareadas.

$$t^0 = \frac{2,7}{44,45/\sqrt{10}} = 0,19$$

De acuerdo a los resultados obtenidos en el cálculo de SST para el método estadístico se determina mediante la (ecuación 10), que  $t_0 = 0,19$  lo cual establece que es menor que la  $t_{\alpha/2} = 2,060$ , determinando que los dos efluentes son iguales y que los medios de soporte realizan la misma remoción de solidos suspendidos totales.

#### 4.4 Análisis socio-económicos y ambientales, del uso de filtros anaerobios de flujo ascendente

De acuerdo a la investigación realizada se determina que el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), con medio de soporte de grava tiene mayor eficiencia en

comparación al filtro con medio de soporte capilar (PVC), por lo tanto se realiza un análisis social, ambiental y económico para establecer los beneficios que este filtro generaría.

Desde la parte económica la construcción del filtro es módica, además no requiere del consumo de energía debido a que el efluente y afluente se transportan por gravedad, por lo tanto se disminuyen los costos de operación en el sistema, asimismo no requiere de mantenimiento continuo y de fácil manejo.

En el ámbito social, la implementación de filtros anaerobios de flujo ascendente sería vital para las zonas que no cuentan con alcantarillados, debido a que estos sistemas pueden ser implementados, siendo precedidos por un tanque séptico con el fin de mejorar la eficiencia del filtro, disminuyendo el nivel de contaminación a las fuentes superficiales o subterráneas. En la parte ambiental el uso e implementación de filtros con eficiencias altas en la remoción de DQO, DBO y SST, reduciendo el las descargas de aguas residuales que se vierten al medio. Teniendo en cuenta los aspectos planteados se realiza la siguiente tabla.

**Tabla 13:** *Análisis del criterio social, económico y ambiental.*

<b>Criterios</b>	<b>Conceptualización</b>
Social	Iniciar con una educación ambiental enfocada al implemento, funcionamiento y operación de los filtros anaerobios de flujo ascendente.
	Disminución de problemas de salud e higiene, con un mejoramiento de la calidad de vida.
	Reducción en costos de recuperación de áreas afectadas por descargad de agua residual
Económico	El filtro genera menores costos en la construcción, operación y mantenimiento, en comparación a los procesos mecánicos.
	Los FAFAs no requieren mayor área, además tienen baja producción de lodos por lo tanto no requieren de un digestor de lodos.
	No requiere de energía ya que el transporte del agua se da por gravedad.
	Generación de biogás.
	Ahorro en multas proporcionadas por las descargas con alto porcentaje de la DQO y SST.

	No requieren de insumo químicos.
	Su arranque y puesta en marcha es sencillo y su estabilización se logra por la autoinoculación del sistema
Ambiental	El impacto ambiental es mínimo, debido a que el diseño concibe las estructuras como un sistema cerrado.
	Además es una contribución y sustentabilidad para los recursos naturales.
	Asimismo se crea una cultura de conservación.

**Fuente:** Elaboración propia.

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES**

Teniendo en cuenta el desarrollo de los objetivos durante la investigación, se establecen las siguientes conclusiones.

La hipótesis establecida no se cumplió, ya que el filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de soporte sintético (tubos PVC de ½”), arrojó porcentajes menores para la eficiencia de la DQO y SST, en comparación al filtro anaerobio con medio de soporte de grava que obtuvo porcentaje de remoción más altos.

Se determina que las eficiencias de remoción de materia orgánica en los filtros anaerobios no dependen solamente del área superficial y la porosidad, sino también en la forma y composición del material de soporte.

En relación a la remoción de materia orgánica, se obtuvieron mejores resultados en el filtro anaerobio con medio de soporte de grava, debido a que su porcentaje de remoción promedio para la DQO fue de 49,84% y SST de 43,32%, con respecto al filtro anaerobio con medio de soporte sintético (tubos PVC), el cual presentó un porcentaje promedio de remoción de la DQO 39,05% y SST de 36.05%.

Para la DQO se establece según el tipo de lecho que el filtro con medio sintético (tubos PVC) obtuvo una eficiencia máxima del 69%, en comparación al filtro con lecho de grava que obtuvo una eficiencia máxima del 55%.

Para obtener la DBO se realizó una correlación con datos obtenidos en el año 2015 los cuales fueron tomados por el laboratorio de la CRC.

El método estadístico empleado en la investigación determinó que los dos efluentes son iguales y que los medios de soporte realizan la misma remoción de sólidos suspendidos totales.

El lecho sintético tiene mayor porosidad en comparación al lecho de grava, debido a que tiene mejor distribución y además posee mayor área superficial, debido a que tiene un área interna y externa, opuesto a lecho de grava el cual solo tiene un lado externo.

Se establece que el tiempo de retención calculado en un sistema es proporcional a la porosidad, debido a que el filtro con medio sintético es simétrico en comparación a la grava ocupando menor volumen y con mayor porosidad.

Los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), son una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas e incluso industriales, ya que no tienen mayores requerimientos, ni personal calificado para el mantenimiento y los costos de operación e implementación son bajos.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Cambiar el lecho sintético por un lecho con mayor rugosidad que permita que la biopelícula se adhiera fácilmente, además que el lecho a emplear sea asimétrico para tener mejores resultados.

Realizar un ensayo de tratabilidad con los materiales de soporte utilizados, pero cambiando la posición del lecho sintético en forma horizontal con el fin de evaluar el comportamiento del flujo en dirección perpendicular al medio de soporte.

Controlar los efluentes con un tratamiento previo (primario) en el sistema con el fin de evitar posibles colmataciones u obstrucciones en el sistema.

Tener mucho cuidado con las estructuras de distribución del fluido y de recolección del efluente, para que haya uniformidad en la distribución del flujo al interior del filtro.

Realizar la evaluación de otros parámetros de importancia ambiental tales como fósforo, nitrógeno y materia orgánica en función a la DBO

## Bibliografía

- [1] Alondra Torres, M. (2008). Número Reynolds. Recuperado 13 de marzo de 2017, a partir de [http://fjartnmusic.com/Personal/6o\\_Semestre\\_files/Re.pdf](http://fjartnmusic.com/Personal/6o_Semestre_files/Re.pdf)
- [2] Andrés Felipe Osorio Trujillo, J. C. V. B. (2007). Evaluación de la remoción de la materia orgánica en filtros anaerobios de flujo ascendente utilizando aguas residuales sintéticas. Recuperado a partir de [zotero://attachment/37/](http://zotero://attachment/37/)
- [3] ÁNGEL, A. Q. (2007). *Evaluación preliminar de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de la tebaida (Quindío)*. Colombia.
- [4] Arango Muñoz, L., & López Hincapié, J. D. (2011). Estudio a escala de laboratorio de los efectos de la forma de alimentación y de la cantidad de inóculo sobre el hinchamiento de los lodos de reactores aerobios mezcla completa en etapa de arranque. Recuperado a partir de <http://repository.udem.edu.co/handle/11407/1232>
- [5] Barbero. (2007). Dinamica de fluidos. Recuperado a partir de <https://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/Teoria/0506%20FFT%20FluidosD.pdf>  
Barrantes Ortiz, N., & Barrantes Ortiz, I. (2012). Uso de un desecho como medio filtrante biológico anaeróbico. Recuperado a partir de [http://www.revistanova.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=140&Itemid=220](http://www.revistanova.org/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=220)
- [6] Becerra, M. R. (1994). El Ministerio del Ambiente: génesis, estructura y proyecciones. *La política ambiental del fin de siglo, Editorial Presencia, Serie Ecológica*, (8). Recuperado a partir de <http://www.manuelrodriguezbecerra.org/bajar/poliambiental/ii.pdf>
- [7] Boqué, R., & Maroto, A. (2004). *El análisis de la varianza (ANOVA) 1. Comparación de múltiples poblaciones*. Recuperado de <https://docs.google.com/viewer>. Recuperado a partir de <http://www.quimica.urv.cat/quimio/general/anovacast.pdf>
- [8] Caja Morales, C. (2004). Diferencias entre contaminación superficial y subterránea. Recuperado a partir de [http://www.igme.es/ZonalInfantil/MateDivul/guia\\_didactica/pdf\\_carteles/cartel3/CARTEL%203\\_3-5.pdf](http://www.igme.es/ZonalInfantil/MateDivul/guia_didactica/pdf_carteles/cartel3/CARTEL%203_3-5.pdf)

[9] Castaño, J. M. (2002). Consideraciones sobre diseño, arranque, operación y mantenimiento de filtros anaerobios de flujo ascendente. Recuperado a partir de [http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0000222747](http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000222747)

[10] Cauas, D. (2015). Definición de las variables, enfoque y tipo de investigación. *Biblioteca electrónica de la Universidad Nacional Abierta y Distancia*. Recuperado de: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/210115/Documento\\_reconocimiento\\_Unidad\\_No\\_2.pdf#page=5](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/210115/Documento_reconocimiento_Unidad_No_2.pdf#page=5). Recuperado a partir de <http://www.academia.edu/download/36805674/l-VARIABLES.pdf>

[11] Comisión nacional del agua. (2015). *Diseño de Plantas de Tratamiento de aguas residuales municipales: filtros anaerobios de flujo ascendente*. Recuperado a partir de <http://www.mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro29.pdf>

[12] Conde Abellan, C. (2009). Introducción a la Estadística. Recuperado a partir de <https://joseramoncj.files.wordpress.com/2009/03/estadistica.pdf>

[13] Contaminación marina. (2012). practica DQO. Recuperado a partir de <https://gradocienciasdelmar.files.wordpress.com/2012/10/practica-dqo.docx>.

[14] CORPONARIÑO. (2010). Recuperado 6 de septiembre de 2016, a partir de <http://corponarino.gov.co/modules/wordbook/entry.php?entryID=367>

[15] Corporación Autónoma Regional del Cauca (laboratorio ambiental). (2015). EDS Crucero de Totoró.

[16] Daza, J. A., Eda, C. E. F., Transmisibles, G. E., Suspes, P. S., Inmunoprevenibles, E. F., & Antequera, D. V. (2009). Proceso R-02 vigilancia y control en salud pública. Recuperado a partir de <http://santamargarita.gov.co/intranet/pdf/E.S.E/GUIAS%20EN%20SALUD%20PUBLICA/PROTOCOLOS/PRO-R02.003.0000-025%20EDA.pdf>

[17] Diaz Merchán, B. E. (2002). Decaimiento de la calidad del agua por variaciones del cloro residual entre la red de distribución distrital y la red de distribución interna de los usuarios. Recuperado a partir de <http://www.orarbo.gov.co/es/documentacion-y-enlaces/listado/decaimiento-de-la->

calidad-del-agua-por-variaciones-del-cloro-residual-entre-la-red-de-distribucion-distrital-y-la-red-de

[18] Diaz Valdivieso, A., & Ramírez Carrión, J. (2009). BOLETIN 19 COMPENDIO DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES DEL PERÚ. Recuperado a partir de <https://es.scribd.com/document/291856273/BOLETIN-19-COMPENDIO-DE-ROCAS-Y-MINERALES-INDUSTRIALES-DEL-PERU-3B-2009-pdf>

[19] Duque, L. (2010). *Sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas*. Recuperado a partir de <https://www.crq.gov.co/Documentos/DESCARGA%20DE%20DOCUMENTOS/BAS-ESCONCURSO.pdf>

[20] Earthlearningidea. (2008). El espacio interior-la porosidad de las rocas. Recuperado a partir de [http://www.earthlearningidea.com/PDF/Spanish\\_Space\\_within.pdf](http://www.earthlearningidea.com/PDF/Spanish_Space_within.pdf)

[21] El 70% de las aguas residuales en América Latina vuelven a los ríos sin ser tratadas. (2014, enero 6). Recuperado 26 de enero de 2017, a partir de <http://www.cubadebate.cu/noticias/2014/01/05/el-70-de-las-aguas-residuales-en-america-latina-vuelven-a-los-rios-sin-ser-tratadas/>

[22] Enfoques cuantitativo, cualitativo y mixto. (s. f.). Recuperado 7 de noviembre de 2016, a partir de [http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2012/mirm/enfoque\\_mixto.html](http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2012/mirm/enfoque_mixto.html)

[23] Escalera Vasquez, C. R. (2004). Dinámica de un reactor de biopelícula anaerobia tipo intercambiador de calor (RBAIC), IV. Recuperado a partir de <http://www.upb.edu/sites/default/files/7EscaleraN4.pdf>

[24] Filtración de grava y arena. (2009). Recuperado 12 de marzo de 2017, a partir de <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/filtracion.htm>

[25] Garcés Giraldo, L. F., Franco, M., Alejandro, E., & Santamaría Arango, J. J. (2012). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Recuperado a partir de <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/195>  
Garcés Rodríguez, L. E., & Patiño Erazo, C. E. (2012). Implementación de un sistema de tratamiento de agua residual para la obtención de la licencia ambiental en la compañía empacadora Empacreci SA en el cantón Durán provincia del

Guayas, durante el año 2012. Recuperado a partir de <http://190.95.144.28/handle/123456789/320>

[26] Google Maps. (2017). Recuperado a partir de <https://www.google.es/maps/place/Popay%C3%A1n,+Cauca,+Colombia/@2.5109099,-76.5440854,385m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e300311c028d47d:0x880bd67f0987a54e!8m2!3d2.4448143!4d-76.6147395>

[27] Goyenola, G. (2007). Determinación del pH. Recuperado 6 de septiembre de 2016, a partir de [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:z9eJP-NdwpoJ:imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso\\_2007/cartillas/tematicas/Determinacion%2520del%2520pH.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&client=firefox-b](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:z9eJP-NdwpoJ:imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/Determinacion%2520del%2520pH.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&client=firefox-b)

[28] Laboratorio de Química Ambiental. (s. f.). DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO. Recuperado 9 de marzo de 2017, a partir de [http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis\\_De\\_Aguas/Determinacion\\_de\\_DBO5.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Determinacion_de_DBO5.htm)

[29] Lenis, Y. R. (2014). La historia de las áreas protegidas en Colombia, sus firmas de gobierno y las alternativas para la gobernanza1/The History of Protected Areas in Colombia, their Forms of Government and Governance Alternatives/A história de áreas protegidas na Colômbia, as suas formas de alternativas de governo e de governança. *Sociedad y Economía*, (27), 156. Recuperado a partir de <http://search.proquest.com/openview/d5ce91561dd1df0750c4cd0c923d6e9c/1?pq-origsite=gscholar>

[30] León Gil, C. A. (2009). Estandarización y validación de una técnica para medición de la demanda bioquímica de oxígeno por el método respirométrico y la demanda química de oxígeno por el método calorimétrico. Recuperado a partir de <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1780>

[31] Lirola, M. M., & Fernández, E. C. (2008). La evaluación en el marco del EEES: El uso del portfolio en Filología Inglesa. *Revista de Docencia Universitaria*, 1(2). Recuperado a partir de <http://revistas.um.es/redu/article/download/3351/3251>

[32] Lizarazo Becerra, J. M., Orjuela Gutiérrez, M. I., & others. (s. f.). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/11112/>

[33] Manual Abastecimiento Agua Potable por gravedad con tratamiento.pdf. (s. f.). Recuperado a partir de <http://www.itacanet.org/esp/agua/Seccion%20%20Gravedad/Manual%20Abastecimiento%20Agua%20Potable%20por%20gravedad%20con%20tratamiento.pdf>

[34] Marsilli, A. (2005). Tratamiento de aguas residuales. Recuperado 26 de enero de 2017, a partir de <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm#sistratabio>

[35] Minambiente. (2015). Resolución 0631 de 17 marzo 2015. Recuperado a partir de <http://www.nyfdecolombia.com/normtividad-tratamiento-de-agua/pdf/agua-residual/Resolucion-0631-de-17-marzo-2015.pdf>

[36] MinDesarrollo. (2000). RAS 2000 titulo E. Recuperado a partir de [http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7.\\_Tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales.pdf](http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7._Tratamiento_de_aguas_residuales.pdf)

[37] Moral Peláez, I. (2012). Comparación de medias. Revista SEDEN. Recuperado a partir de <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://www.revistaseden.org/files/12-CAP%252012.pdf>

[38] Navarro Sarmiento, J. D. (2008). *Diseño, construcción y evaluación e filtros anaerobios de flujo ascendente para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la lavandería y del casino en el campamento payoa de Petrosantander (Colombia) INC*. Recuperado a partir de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7062/2/128628.pdf>

[39] Nodal Becerra, E. (2005). *Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual* (Vol. XXII). Recuperado a partir de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/residuales.pdf>

[40] Noyola, A. (2010). La problemática de los servicios y su impacto en la sociedad y el medio ambiente. Recuperado a partir de [http://www.ceajalisco.gob.mx/notas/documentos/noyola\\_cea\\_jalisco.pdf](http://www.ceajalisco.gob.mx/notas/documentos/noyola_cea_jalisco.pdf)

- [41] Núñez, V., Elena, G. D. C., & others. (2013). *Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la Costa Atlántica Colombiana*. Universidad Nacional del Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/49437/>
- [42] OMS | Agua. (s. f.). Recuperado 4 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>
- [43] ONU. (2015, febrero 2). El 80% de las aguas residuales del mundo no reciben el tratamiento adecuado. Recuperado 25 de enero de 2017, a partir de <http://www.abc.es/sociedad/20150202/abci-aguas-residuales-informe-201502021601.html>
- [44] Osorio Trujillo, A. F., & Vásquez Botero, J. C. (2007). Evaluación de la remoción de la materia orgánica en filtros anaerobios de flujo ascendente utilizando aguas residuales sintéticas. Recuperado a partir de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/827/6283O83er.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [45] Pérez, R. D. L., & Martínez, Y. P. (2007). Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Una visión general. *Épsilon*, 0(9), 89-104. Recuperado a partir de <http://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ep/article/view/1957>
- [46] Pinos Rodríguez, J., & García López, J. (2012). Environmental regulations and impact of manure generated by livestock operations in some american countries, *vol. 46 n.º 4*. Recuperado a partir de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952012000400004&script=sci\\_arttext&tIng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952012000400004&script=sci_arttext&tIng=en)
- [47] Ramón, A. J., & Maldonado, J. I. (2013). Sistema de tratamiento para aguas residuales industriales en mataderos. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 1(1). Recuperado a partir de [http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs\\_viceinves/index.php/RA/article/view/112](http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/112)
- [48] Ramon, J. (1994). Decreto 1600 de 1994. Recuperado a partir de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=21606>  
RIMH - Aprotéc. (s. f.). Recuperado a partir de <http://laboratorioaprotec.blogspot.com.co/>

- [49] Rios Montes, R. (2009). Disminución de la carga contaminante orgánica del efluente de las cÁmaras sÉpticas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales domÉsticas en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. *Revista Tecnociencia Universitaria Bolivia*, 7, 14. Recuperado a partir de [http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S1991-64692009000200004&script=sci\\_abstract](http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S1991-64692009000200004&script=sci_abstract)
- [50] RodrÍguez, J. A. (2004). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Recuperado a partir de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- [51] Romero, S. E. G., & others. (2008). Factores biÓticos y abiÓticos que condicionan la biorremediación por *Pseudomonas* en suelos contaminados por hidrocarburos. *Nova*, 6(9). Recuperado a partir de <http://unicolmayor.edu.co/publicaciones/index.php/nova/article/view/108>
- [52] Salazar DÁvila, E. F. (2004). *Diseño y construcción de una estación meteorolÓgica portÁtil*. Quito: EPN, 2004. Recuperado a partir de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9167>
- [53] SÁnchez Cuervo, J. S., & HernÁndez Torres, D. A. (2015). *Diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el Municipio de San Marcos Departamento de Sucre* (B.S. thesis). Recuperado a partir de <http://repository.ucatolica.edu.co:8080/handle/10983/2395>
- [54] Serrano Salas, H. A. (2005). *Evaluación ambiental y sanitaria de dos sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales domÉsticas mediante la construcción de prototipos a escala natural*. Costa Rica. Recuperado a partir de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/929/1/26180.pdf>  
 Test de HipÓtesis de dos parÁmetros. (s. f.). Recuperado 8 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.fca.unl.edu.ar/InferEst/TestHipot2.htm>
- [55] Villar, C., & Ollarce, G. (s. f.). Riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales. Recuperado a partir de [http://www.bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/5872/villar-cristobal.pdf](http://www.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/5872/villar-cristobal.pdf)
- [56] Wei, X. M., Lin, C., Duan, N., Peng, Y. X., & Ye, Z. . (2010). Application of aerobic biological filter for treating swine farms wastewater. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 1569-1584. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.169>

[57] Zambrano, D., Rodriguez, N., Orozco, P., & Lopez, U. (2015). Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café. Recuperado a partir de <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/607>

## Anexos

**Anexo 1:** Concentración de la demanda química de oxígeno (DQO), para cada FAFA.

DQO (mg/l)		
Entrada	M. soporte grava	M. soporte sintético
430	216	203
520	100	160
360	80	150
170	120	160
310	200	150
350	180	220
290	190	110
340	110	240
410	310	380
300	150	230

**Fuente:** Elaboración propia

**Anexo 2:** Concentración de solidos suspendidos totales (SST), para cada FAFA.

SST (mg/l)		
entrada	medio grava	sistema sintético
347	340	320
80	20	30
50	10	20

30	20	27
50	40	20
60	30	50
40	30	20
50	10	30
70	40	50
40	30	30

**Fuente:** Elaboración propia

**Anexo 3:** Valores de pH para cada FAFA.

<b>pH</b>		
<b>Entrada</b>	<b>Medio grava</b>	<b>Sistema sintético</b>
6,06	6,26	6,4
5,9	6,5	6,8
6	6,4	6,3
6,1	6,6	6,3
6,5	6,8	6,9
6,1	6,5	6,4
6,7	6,6	6,8
6,9	6,8	6,5
6,4	6,5	6,6
6,6	7,1	7

**Fuente:** Elaboración propia

**Anexo 4:** Valores de temperatura para cada FAFA.

<b>Temperatura</b>		
<b>Entrada</b>	<b>Medio grava</b>	<b>Sistema sintético</b>
22,9	22,5	23,4
23,1	22,8	23,7

22,9	22,4	22,3
23,7	22,2	22,9
22,3	22,2	21,8
23,4	22,8	23,7
23,1	21,9	22,2
24,4	24,9	25,3
23,1	22,6	22,4
22,9	22,5	22

**Fuente:** Elaboración propia

**Anexo 5** Registro fotográfico del trabajo de campo, realizado en la estación de servicio El Crucero de Totoró





**Anexo 6:** Equipos empleados para la medición de los parámetros como DQO, pH, SST y temperatura.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 7:** Análisis de las muestras en el laboratorio De la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



**Fuente:** Elaboración propia.