Análisis del desempeño de un biofiltro con adsorbentes convencionales y no convencionales para el tratamiento de agua de producción petrolera ubicadas en el sector de caño Lima, Arauquita (Arauca)

Autores:
-Silvia Andrea García Fonseca

- Luisa Fernanda Saldarriaga

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, fecha de terminación del trabajo

Análisis del desempeño de biofiltros con adsorbentes convencionales y no convencionales para el tratamiento de agua de producción petrolera ubicadas en el sector de caño Lima, Arauquita (Arauca)

Autores:
-Silvia Andrea García Fonseca

- Luisa Fernanda Saldarriaga

Director(a):

Johan Enrique Gil Toquica.

Codirector (a):

Wilmar Alirio Botello

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Áreas de investigación posibles:

-Gestión y productividad sustentable

Líneas posibles
-Ingeniería para la sostenibilidad de sistemas naturales

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia

2020

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria.

Este trabajo de investigación está dedicado a nuestros padres, familiares y amigos, quienes han sido el mayor apoyo a lo largo de nuestra carrera universitaria, además de acompañarnos al cumplimiento de nuestros sueños y motivarnos a superar las adversidades.

Agradecimientos

En primera instancia queremos agradecer a Dios, por nuestra vida y la de nuestras familias; al amor recibido, dedicación y paciencia de nuestros padres y familiares, además de su apoyo en nuestro proyecto. Por otra parte a nuestros amigos, quienes nos acompañaron a lo largo de la carrera y con los cuales compartimos momentos inolvidables.

También a los profesores que durante toda la carrera nos brindaron los conocimientos y nos formaron tanto a nivel profesional como personal, especialmente a los profesores Hommy Copete y Jhon González por su orientación, confianza y apoyo durante el paso por la universidad. Así mismo al profesor Wilmar Botello por su acompañamiento en los laboratorios, pero particularmente queremos agradecer a nuestro director Johann Gil, quien creyó en nuestras capacidades, nos acompaño y guío para lograr cumplir el proyecto de la mejor manera.

Y finalmente a la Universidad El Bosque-Bogotá, por el apoyo a través la infraestructura de los Laboratorios y por brindar espacios de investigación a estudiantes como nosotros.

Tabla de contenido

1. Resumen 10
1.1 Abstract 11
2. Introducción 12
3. Planteamiento del problema 13
4. Preguntas directrices. 15
5. Justificación ..... ¡Error! Marcador no definido.
6. Objetivos 18
6.1. Objetivo General: 18
6.2. Objetivos Específicos: 18
7. Marcos de referencia 18
7.1 Antecedentes 19
7.2 Estado del arte 20
7.3 Marco geográfico y descripción del territorio 22
7.4. Marco teórico- conceptual 24
7.5. Marco Normativo. 30
8. Marco Metodológico. 33
8.1 Objetivo específico 1: 34
8.3. Objetivo específico 3: 51
8.4. Objetivo específico 4: 53
9. Análisis y resultados 56
9.1 Objetivo 1: 56
9.2. Objetivo 2: 59
9.3 Objetivo 3: 72
9.4 Objetivo 4: 81
10. Conclusiones. 83
11. Recomendaciones. 84
12. Aspectos éticos 85
Referencias 85
ANEXOS 92
ANEXO 1. Lista de abreviaturas 92

ANEXO 3 97

Lista de Figuras.

Figura 1. Planteamiento del problema.
Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio caño limón Arauquita, Arauca.
Figura 3. Localización de la zona de estudio con las respectivas fuentes de abastecimiento de agua.
Figura 4. Diagrama de teorías que fundamentan el proyecto
Figura 5. Ejemplo biofiltro
Figura 6: Estructura de la pluma.
Figura 7. Análisis de materiales
Figura 8. Diagrama actividades del objetivo 1.
Figura 9. Localización obtención de la muestra
Figura 10. Punto de piscinas de estabilización
Figura 11.Decantación y filtración de la muestra.
Figura 12. Parámetros fisicoquímicos evaluados.
Figura 13. Metodología para determinación de hidrocarburos.
Figura 14.Diagrama actividades del objetivo 2.
Figura 15. Partículas hidrófobas de las plumas.
Figura 16.Partículas hidrófobas del Bagazo de caña.
Figura 17. Partículas hidrófobas de la piedra pómez.
Figura 18.Partículas hidrófobas de la arena.
Figura 19.Prueba preliminar de los lechos filtrantes
Figura 20. Prueba preliminar de orden de los lechos filtrantes.
Figura 21.Dimensiones del biofiltro
Figura 22. Diagrama actividades objetivo 3
Figura 23. Diagrama actividades objetivo 4.
Figura 24.Remoción de hidrocarburos con Plumas de pollo.
Figura 25.Remoción de hidrocarburos con Piedra Pómez.
Figura 26. Remoción de hidrocarburos con Arena.
Figura 27. Remoción de hidrocarburos con Bagazo de caña.
Figura 28. Dimensiones y distribución lechos del Biofiltro.
Figura 29. Prototipo de configuración del sistema.
Figura 30.Atributos de agitación y tiempo.
Figura 31. Dimensionamiento a escala real del biofiltro.
Figura 32. Diagrama de variación de hidrocarburos a través de los procesos de tratamiento.

Lista de Tablas.

Tabla 1. Descripción de las fases con sus diferentes actividades del objetivo 1
Tabla 2. Pretratamiento del material soporte plumas de pollo.
Tabla 3. Pretratamiento del material soporte bagazo de caña
Tabla 4. Pretratamiento del material soporte piedra pómez.
Tabla 5.Pretratamiento del material soporte arena.
Tabla 6. Descripción de las fases con sus diferentes actividades del objetivo 2
Tabla 7. Descripción de las fases con sus diferentes actividades del objetivo 3.
Tabla 8. Descripción de las fases con sus diferentes actividades del objetivo 4.
Tabla 9. Promedios y desviaciones estándar de parámetros para la muestra problema.
Tabla 10. Rangos de calidad del agua según DBO.
Tabla 11. Criterios de biodegradabilidad según la relación DBO/DQO.
Tabla 12. Rangos de calidad del agua según Sólidos Suspendidos Totales.
Tabla 13.Parámetros físicos de las plumas de pollo.
Tabla 14. Promedios y desviaciones estándar de parámetros para el agua tratada con plumas de pollo.
Tabla 15.Parámetros físicos de la piedra pómez.
Tabla 16.Promedios y desviaciones estándar de parámetros para el agua tratada con piedra pómez.
Tabla 17. Parámetros físicos de la arena.
Tabla 18.Promedios y desviaciones estándar de parámetros para el agua tratada con arena.
Tabla 19. Parámetros físicos del bagazo de caña
Tabla 20.Promedios y desviaciones estándar de parámetros para el agua tratada con bagazo de caña.
Tabla 21. Dimensiones del biofiltros con sus respectivos lechos.
Tabla 22.Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga baja sin agitación.
Tabla 23.Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga baja con agitación.
Tabla 24.Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga media sin agitación.
Tabla 25.Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga media con agitación.
Tabla 26.Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga alta sin agitación.
Tabla 27.Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga alta con agitación.
Tabla 28.Parámetros fisicoquímicos para utilización de agua residual en usos agrícolas.

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Factor de Biodegradabilidad.
Ecuación 2. Determinación de cloruros.
Ecuación 3. Determinación de Nitratos.
Ecuación 4. Determinación de Sulfatos.
Ecuación 5. Determinación de Hidrocarburos totales.
Ecuación 6. Porcentaje de remoción.
Ecuación 7. Altura experimental.
Ecuación 8. Número de filtros.

Lista de Gráficas.

Gráfica 1. Comparación de los sólidos disueltos totales entre la muestra y los diferentes lecho.
Gráfica 2. Comparación de la conductividad entre la muestra y los diferentes lechos.
Gráfica 3. Comparación de la turbidez entre la muestra y los diferentes lechos.
Gráfica 4. Comparación de presencia de hidrocarburos totales entre la muestra y los diferentes Gráfica 5.Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga baja sin agitación.
Gráfica 6.Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga baja con agitación
Gráfica 7.Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga media sin agitación .
Gráfica 8.Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga media con agitación .
Gráfica 9.Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga alta con agitación Gráfica 10.Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga alta con agitación
Gráfica 11.Comportamiento de remoción de hidrocarburos vs tiempo a diferentes cargas sin agitación

1. Resumen

La industria petrolera a partir de su proceso extractivo produce grandes cantidades de aguas residuales petroleras, el pozo Caño Lima genera aproximadamente 143.133 b/d, no obstante, dichos procesos generan altas presiones ambientales debido al inadecuado manejo del tratamiento utilizado actualmente y la carencia de alternativas sustentables, haciendo que dichas aguas se conviertan en vertimientos. Es por ello por lo que este proyecto tiene como finalidad, analizar el desempeño de un biofiltro a base de adsorbentes convencionales y no convencionales para el tratamiento de aguas de producción petroleras ubicadas en el sector de Caño Lima, Arauca.

Para lograr cumplir el objetivo, se desarrolló una investigación con enfoque mixto, un método analítico-deductivo y técnicas experimentales para la caracterización de la muestra y el análisis preliminar del tratamiento de adsorbentes, para lograr el diseñó un biofiltro con los lechos: plumas, piedra pómez y arena, bajo una configuración del sistema a diferentes cargas con y sin agitación para un desempeño promedio de remoción de hidrocarburos del 98,50% y del 98,23% respectivamente, se denoto que los desempeños fueron altos, pero debido a su significancia no se requiere de agitación y la carga media fue la más estable con un porcentaje de remoción del 98,66%. Se concluye que los biofiltros son una alternativa sostenible para las aguas de producción debido al buen desempeño, retención de HT, y disminución de otros parámetros, llegando a disminuir el impacto al río Lipa y generando la posibilidad de procesos de aprovechamiento del agua y simbiosis industrial, por ende se deben continuar estudios que abarquen el tema.

Palabras clave: Hidrocarburo, Biofiltro, Agua de producción, Adsorbentes convencionales y no convencionales y Tratamiento de agua residual petrolera.

1.1 Abstract

The oil industry from its extraction process produces large amounts of oil wastewater, the Caño Lima well generates approximately 143,133 b / d, without problems, such processes that have high environmental pressures due to the management of the treatment currently used and the lack of alternatives sustainable, making various waters become discharges. That is why this project aims to analyze the performance of a biofilter based on specific and non-specific adsorbents for the treatment of oil production waters located in the Caño Lima sector, Arauca.

To achieve the objective, is development a research with a mixed approach, an analytical-deductive method and experimental techniques for the characterization of the sample and the preliminary analysis of the treatment of adsorbents, to achieve the design of a biofilter with the beds: feathers, stone pumice and sand, under a system configuration at different loads with and without agitation for an average hydrocarbon removal yield of 98.50% and 98.23% respectively, it was noted that the performances were high, but due to their significance agitation is not required and the average load was the most stable with a removal rate of 98.66%. It is concluded that biofilters are a sustainable alternative for production waters due to the good performance, HT retention, and decrease in other parameters, reducing the impact on the Lipa river and generating the possibility of water use processes and industrial symbiosis. therefore, studies that cover the subject should be continued.

Keywords: Hydrocarbon, Biofilter, Production water, Conventional and unconventional adsorbents and Oil residual water treatment.

2. Introducción.

La industria del petróleo es una de las industrias más grandes y de rápido crecimiento debido a la alta demanda de energía global y local, Colombia siendo el cuarto productor de petróleo en Iberoamérica produce aproximadamente 889.352 barriles/día, sin embargo, los procesos petroleros producen grandes presiones ambientales, quienes a su vez generan afectaciones en las matrices ecológicas del suelo, aire y agua, alterando el equilibrio de los ecosistemas y disminuyendo la calidad de vida de los seres vivos. Uno de los impactos más altos es el desaprovechamiento hídrico y la generación de residuos (fluidos de perforación, lodos oleosos, aguas residuales, compuestos orgánicos volátiles, residuos de catalizador, metales pesados, etc) que poseen un considerable grado de toxicidad (Srikanth, Kumar, & Puri, 2018).

La producción de agua, históricamente ha promediado seis y ocho veces la producción de petróleo durante la vida útil de todos los pozos petroleros (Villegas, 2017); en Colombia para el año 2016, el sector de hidrocarburos consumió alrededor de 56,23 millones de m3de agua, (Ecopetrol, 2016), los cuales en su mayoría se convirtieron en vertimientos industriales a fuentes hídricas y aguas de producción almacenadas en piscinas petroleras, no obstante tan sólo el 4% de la producción total de agua es utilizado para la reinyección o reutilización (IDEAM, 2015); el problema surge cuando al no darle el tratamiento necesario a aquellos residuos aumenta la carga contaminante y se ve reflejada en parámetros como DBO, DQO, sólidos suspendidos totales hidrocarburos, etc (Bravo, 2007), los cuales constituyen el objetivo de regulación por parte de las normas para establecer la calidad del agua, como la resolución 631 de 2015 en Colombia que muestra los criterios mínimos de vertimientos en efluentes para brindar mayor protección a los recursos naturales.

Un claro ejemplo está representado en el Pozo Caño Lima de la empresa Petrolima, el cual requiere 143.133 b/d de agua para producir 52.000 b/d de petróleo, contando con los procesos convencionales de tratamiento(piscinas de estabilización, tanques de lavado y separadores API) para poder reinyectar un 0,8% de las aguas y verter el excedente, es por ello que el principal desafío para esta industria es administrar las enormes cantidades de desechos generados por diferentes procesos debido a la complejidad de los residuos, sin embargo el tratamiento químico tradicional de aguas residuales de refinería de petróleo pesado, es lento y costoso (Pulido, 2014).

Los biofiltros naturales se han convertido en una gran alternativa para el manejo de derrames de petróleo sobre las fuentes hídricas y para el tratamiento de aguas residuales, ya que presentan una alta capacidad de retención, baja densidad, son amigables con el medio ambiente, forman conglomerados que facilitan la recolección del crudo y económicos (Velandia, 2017). Es por ello, que el presente proyecto busca analizar el desempeño del biofiltro a base del adsorbentes convencionales y no convencionales para el tratamiento de aguas residuales petroleras, como una alternativa para lograr disminuir el porcentaje de hidrocarburos totales y desde la ingeniería Ambiental un manejo más adecuado del recurso hídrico y su aprovechamiento en otros procesos industriales; de tal manera que los datos obtenidos

contribuyan favorablemente a procesos más óptimos en el Sistema de tratamiento actual que usa la empresa Petrolima.

3. Planteamiento del problema

En los últimos años la producción de petróleo se ha convertido en una de las principales fuentes para el aporte energético a nivel global, así mismo esta actividad trae consigo un incremento en la contaminación de fuentes hídricas tanto superficiales como subterráneas debido a que para la obtención de un barril de crudo se requieren dos de agua (Sierra, 2017), y el manejo que se le da actualmente a la disposición del agua de producción es inadecuada, debido a que el residuo es dispuesto en piscinas de estabilización que generan desbordamientos y derrames en suelos y afluentes cercanos. De acuerdo a la Agencia Para Sustancias Tóxicas y Registro De Enfermedades, ATSDF (1999) el agua de producción petrolera contiene grandes cantidades de tóxicos y contaminantes como los hidrocarburos totales (HT) causando degradación del medio ambiente cuando estos entran en contacto con las matrices como el agua, ya que primero estos residuos pueden ir a los sedimentos o quedarse flotando en la superficie, así mismo la afectación al ser humano se evidencia en la sangre cuando estos químicos entran al organismo y se concentran en el sistema nervioso central causando enfermedades como neuropatía periférica (parálisis de extremidades inferiores).

Estados Unidos es uno de los países líder en la extracción de hidrocarburos, con una producción de 12 millones de barriles diarios para el 2019, según Piergiorgio en la revista La Vanguardia (2019), maneja sus residuos líquidos por medio del almacenamiento en estanques de relaves, así como Canadá, donde se ha causado gran contaminación del río Athabasca, donde se ha afectado la calidad del agua gracias a la concentración de componentes orgánicos e inorgánicos provenientes de las aguas de producción (Kelly, et al,. 2009); así mismo, en algunos casos el agua de producción generada es descargada a cuerpos de agua superficial y a los océanos, si es permitido por algunos reguladores ambientales del país correspondiente.

La producción de petróleo en México se rige por la norma oficial mexicana NOM-143- SEMARNAT-2003 y se lleva a cabo el método de separación por medio del sistema API (American Petroleum Institute), el cual separa el crudo y el agua resultante del proceso de inyección, pero como lo mencionan Schroeder, Rodríguez, y Hernández (1999), estos procesos no son adecuados para manejar y controlar la cantidad de residuos producidos, debido a que durante la separación es difícil controlar las grasas y aceites generando el vertimiento del material con presencia de sales y otros contaminantes, así mismo, algunos métodos implementados son el tratamiento de agua con procesos físicos y químicos que resultan costosos, lo que lleva a los productores a disponerlas en piscinas de estabilización (Pulido, 2014). Ejemplo de ello es como el vertimiento de estos residuos, junto con los derrames, han ocasionado graves problemáticas en las comunidades aledañas al río San Juan en México (López & Luyando 2018), donde el petróleo contaminó el afluente con el que regaban sus cultivos, causando pérdidas en la biodiversidad acuática y en la producción agrícola.

Uno de los países con mayores reservas de petróleo es Venezuela y al igual que México la industria del petróleo utiliza métodos para el tratamiento y manejo del agua de producción como los separadores

API, placas corrugadas y flotación con aire disuelto (De Turris, et al,. 2011). Para el 2014, la organización de derechos humanos PROVEA, afirmó que "en el 2013 se generaron en Anzoátegui - Monagas 991.106.862,3 barriles de residuo para la recuperación secundaria de hidrocarburo", como lo menciona la organización, estos líquidos son tratados pero no del todo y otros son vertidos.

En Colombia se producen aproximadamente 889.329 barriles al día y por cada barril se extraen alrededor de 8 barriles de agua de producción variando dependiendo del pozo petrolero (Ecopetrol, 2016), y se ha evidenciado una deficiente gestión ambiental empresarial por parte de las industrias petroleras, que cuentan con inadecuado manejo de dicho residuo y de los lodos de perforación formados en los procesos para la extracción del crudo, siendo acumulados en piscinas abiertas sin ningún tratamiento, o descargadas en ríos y lagunas que cumplan con sistemas de manejo como separadores trifásicos, tanques FWKO (Free-Water Knock Out) o separadores API, para la eliminación de aceites y grasas (Díaz, Zamora, Caselles, & León, 2013), en los tanques o piscinas se puede presentar una migración vertical de los contaminantes hacia los acuíferos y migrando hacia aguas superficiales, además de filtrarse en las capas subterráneas del suelo, generando contaminación de zonas aledañas, afectación de ecosistemas y la biodiversidad y problemas de salud ambiental en las comunidades de la zona.

El manejo que se le da a las aguas de producción en Petrolima, son los métodos convencionales, por medio de separadores API, reinyección y vertimientos como lo menciona el Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente, 2011). A pesar de la complejidad del tratamiento que se le da, el pozo Caño Lima ha generado la alteración de la calidad del recurso hídrico subterráneo y de los ríos Lipa, Caño limón, Arauca, entre otros. Por ende se hace necesario implementar diferentes y mejores procesos sostenibles (IDEAM, 2000), cuyas alternativas de manejo ambiental, permitan llevar a cabo una mejor gestión hídrica por parte de las industrias y así se presente un impacto menor, se fortalezcan procesos más sostenibles y se reduzca el costo de inversión en tratamiento de las técnicas convencionales.

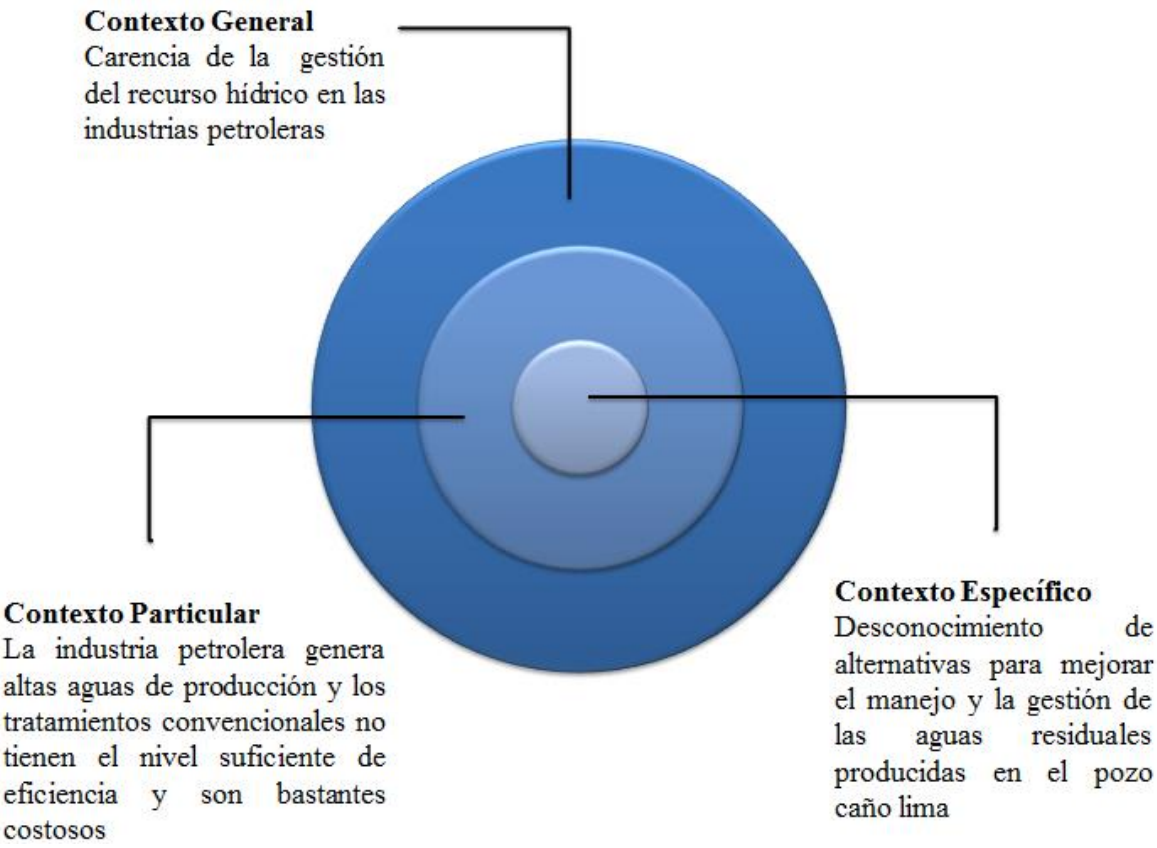


Figura 1. Diagrama del planteamiento del problema. Fuente. (Autores, 2020)

4. Preguntas directrices.

- ¿Qué manejo y disposición se le está dando tanto a nivel nacional como internacional a los residuos de hidrocarburos?
- ¿Los tratamientos químicos y biológicos que se le dan a las aguas residuales de producción de la empresa Petrolima presentan parámetros físicoquímicos que permitan la reinyección del agua o su uso en otros procesos industriales?
- ¿Los procesos de biofiltración con procesos convencionales y no convencionales aumentan el desempeño para la remoción de hidrocarburos totales?
- ¿Al incorporar el biofiltro a las fases de tratamiento del agua de producción del pozo Caño Lima se podría mejorar la calidad del agua para darle una reutilización en otros procesos?

5. Justificación

El presente trabajo busca dar a conocer una de las grandes problemáticas del sector minero energético, el cual por una parte impulsa la economía del país, ya que aporta un 9% del PIB nacional (Martínez, 2013), mientras que por otra es el causante de contaminación y toxicidad del agua como consecuencia de todos sus procesos productivos (Adebayo & Tawabini, 2012). Teniendo en cuenta la importancia de esta industria y el impacto, surge la necesidad de formular un plan que permita mitigar las 1200 toneladas diarias de desperdicios sin tratamiento que se vierten a los ríos, causando afectación por derrames, alteración de matrices ecosistémicas, específicamente en el deterioro y agotamiento del agua y la destrucción de fuentes hídricas, las cuales a su vez generan altos costos sociales por consumo de aguas contaminadas (CENSAT, 2001). Es necesario que así mismo como las empresas operan planes de manejo para mitigar posibles vertimientos de hidrocarburos en el suelo o el agua, se optimicen los procesos y que el tratamiento que se le da actualmente a las aguas de producción, como uno de los principales residuos de la industria, sea el más adecuado y que incluso se puedan aplicar procesos de recirculación ya sea al mismo proceso extractivo o para uso en otras industrias como es la agricultura.

Con el fin de prevenir impactos como el sucedido en Caño Lima en 1997 donde se contaminaron con residuos tóxicos las lagunas La trucha y La Draga, gracias a que los volúmenes de producción de agua fueron superiores a los que se podían almacenar generando un desbordamiento del agua, causando afectación en los esteros y en la hidrodinámica de la región como lo menciona el Observatorio De Conflictos Ambientales (OCA, 2019). Se encontró que desde la ingeniería ambiental, los biofiltros son una buena alternativa para el tratamiento de aguas de producción en el pozo Caño Lima, ya que son procesos sustentables, que tienen bajos costos para grandes caudales y bajas concentraciones tanto en operación, como en mantenimiento; ejemplo de ello es que países como Nicaragua poseen el Centro de Estudios y Promoción, patrocinando proyectos de iniciativa integrada para el Ambiente Urbano Sostenible ISSUE-2, donde se suscita la implementación de tecnología de biofiltración a escala domiciliaria para el tratamiento de aguas grises, basados en la experiencia de países como Brasil y Costa Rica.

La implementación de los procesos de biofiltración sería innovador para la empresa, ya que incluiría el uso de residuos provenientes de otras actividades productivas como es la agricultura y avicultura son una opción no convencional para dicho tratamiento; actualmente el material de soporte más conocido es el bagazo de caña, en cifras generales, en una zafra de 8 millones de toneladas de azúcar se deben moler más de 70 millones de toneladas de caña, lo que produciría más de 20 millones de toneladas de bagazo; de estos, unos 2 millones se pueden utilizar como alimento animal y en la producción de derivados, mientras que el resto se emplea, por la propia industria azucarera, para la producción de vapor y la electricidad que requiere su funcionamiento (FAO, 2019). Es necesario resaltar que según el Ministerio De Agricultura (2006), en Colombia la actividad panelera es considerada la segunda agroindustria con mayor producción rural después del café, cabe mencionar que el municipio de Arauquita se utiliza el suelo para cultivos de cacao, sin embargo la Asociación Multiactiva De Canicultores De Arauquita Asecana y el Gobierno departamental están fortaleciendo la producción panelera que demanda la población araucana.

Por otra parte las plumas de pollo son un adsorbente menos conocido, pero cuenta con una alta capacidad de retención gracias a la presencia de queratina que las compone (Roig, Ramírez, y Manzano, 2003 y Kar y Misra, 2004), e incluso lo que hace a este lecho filtrante más idóneo es que el municipio de Arauquita cuenta gran cantidad de galpones de engorde, prueba de ello es que para el 2015 según Aguilar habían aproximadamente 29000 aves de engorde con tendencia a aumentar, a pesar de la alta producción el municipio no cuenta con una planta de sacrificio de aves, ya que fue abandonada en 2018 y convertida en basurero, evidenciado en la incorrecta disposición de los residuos (La voz del cinaruco, 2018), lo cual también es un problema a nivel nacional, pues en el año 2010 la generación de residuos como son las plumas de pollo ascendió a más de 200,000 toneladas (Florida, 2019).

Por otra parte para el diseño de procesos de filtración se tienen en cuenta absorbentes convencionales, donde la arena es uno de los lechos más utilizados para el tratamiento de las aguas de residuales debido a su potencial para reducir la turbidez, disminuir sólidos suspendidos y sólidos disueltos (Pazmiño, 2016), así mismo se tiene en cuenta este material por su alta producción en el país como lo menciona la Unidad De Planeación Minero Energética (UPME) en su balance donde el país para el 2016 tuvo una producción de arena aproximada de 180 mil toneladas. Finalmente otro de los materiales adsorbentes no convencionales es la piedra pómez compuesta por propiedades hidrofílicas que permiten grandes capacidades de adsorción y retención de humedad, gracias a sus componentes como son el trióxido de sílice y trióxido de aluminio (Vélez, 2019); así mismo cuenta con una alta presencia en Colombia produciéndose en la cordillera central y siendo implementada en procesos industriales como la producción de cemento (Calvo, Gajardo & Maya, 2000).

Finalmente, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 del gobierno Nacional Colombiano, establece adoptar medidas para proteger las fuentes de agua y garantizar su sostenibilidad en el tiempo, con un enfoque de Economía Circular, en relación con potenciar el uso sostenible de agua subterránea como fuente de abastecimiento (DPN, 2018), es por ello que el uso de esta alternativa reduciría impactos ambientales asociados a los hidrocarburos permitiendo procesos más limpios y mejorar la calidad de vida de los ecosistemas terrestres evitando afectaciones en sus matrices.

6. Objetivos

6.1. Objetivo General:

Analizar el desempeño de un biofiltro a base de adsorbentes convencionales y no convencionales para el tratamiento de aguas de producción petroleras ubicadas en el sector de Caño Lima, Arauca (Arauquita).

6.2. Objetivos Específicos:

- Determinar las características fisicoquímicas en muestras de aguas de producción petrolera colectadas en el pozo Caño Lima.

- Diseñar una estrategia para el tratamiento del agua de producción con los materiales soporte bajo diferentes configuraciones de carga para emplear en el biofiltro.

- Establecer la eficiencia del sistema de tratamiento en el mejoramiento de la calidad del agua estudiada.

- Proponer una alternativa sustentable para el sector productivo con base a los resultados obtenidos.

7. Marcos de referencia

7.1 Antecedentes

A nivel mundial el consumo de energía por medio de combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas representan un 85% del total, donde el 33% es proporcionado por el crudo (Quemada, y González, 2011) Desde que Estados Unidos llevó a cabo la primera extracción en un pozo de 21 metros y la creación del automóvil empezó a tomar fuerza se incrementó la demanda de petróleo a nivel global y así mismo la generación de residuos líquidos como los lodos y aguas de producción (Sánchez, 1998), prueba de ello para el año 2002 se usaron 210 b/día de agua para producir 75 millones barriles/diarios de petróleo (Mesa, Orjuela, Ramírez y Herrera, 2018)

Para el vertimiento de las aguas de producción se debe implementar algún tratamiento o manejo, debido a que las diferentes normativas de cada país impiden que las mismas sean dispuestas en fuentes hídricas sin haberlas tratado, por ende en países de América como Estados unidos se implementan procesos de almacenamiento en tanques de relaves y separación API, en México y Venezuela se utilizan placas corrugadas y flotación con aire disuelto; la mayoría de los países implementa el almacenamiento en tanques y tratamientos que no remueven por completo o en una mayor cantidad los contaminantes presentes en el agua de producción, o que por el desbordamiento de los tanques se pueden generar infiltración a los suelos y contaminación de las aguas subterráneas y superficiales.

En Colombia, a finales del siglo XIX, se perforaron los primeros pozos como el infantas No 1, y unos cerca de Barranquilla, denominado Tubará, que logró producir hasta 50 barriles por día, ello conlleva a la construcción de la primera refinería, llamada Cartagena Oil Refining Co, que tenía una capacidad de 400 barriles por día siendo los inicios de la industria petrolera en Colombia (Vásquez, 2012)). Las primeras reglamentaciones en materia petrolera se dieron en 1903 donde se promulgó del Decreto No. 34 que facultó al poder ejecutivo para otorgar concesiones petroleras.

La generación de agua de producción en Colombia se obtienen en las todas las fases del proceso (exploración, producción, transporte y refinación); donde el 91,72% del total pertenece a la fase de producción (Ecopetrol, 2016). Según Mesa, Orjuela, Ramírez y Herrera (2018), se obtuvieron 856.957 barriles mensual de crudo del cual se obtuvieron 12,45 barriles de agua por cada barril de petróleo producido en el 2015. Este residuo se manejó por medio de vertimientos industriales subterráneos con un 58,2% y a fuentes hídricas superficiales con un 40,2%, reinyección para recobro mejorado y destino final, en algunas empresas como Ecopetrol y Oxy implementan tratamientos como la evaporación, biorremediación para la degradación de lodos aceitosos, inyección en pozos profundos y lagunas de estabilización y floculación (CENSAT, 2001).

Actualmente en las instalaciones del campo Caño Lima cuentan con el uso de un sistema convencional diseñado para el tratamiento del agua de producción, inicialmente para la separación de crudo y agua asociada a la producción se adicionan las sustancias clarificadoras (Desemulsificante NAICO), posteriormente pasan por unos tanques de lavado, para ser dirigidos a dos piscinas de estabilización, para finalmente pasar a un separador API a dos canales donde una parte es vertida al medio y una menor parte es llevada a los tanques cabeza de agua para un tratamiento más complejo con el fin de ser reinyectado (Minambiente, 2011)

7.2 Estado del arte

Para la elaboración del estado del arte se utilizaron herramientas de búsqueda y bases de datos como google académico y sciencedirect, contemplando un periodo de tiempo de 12 años, incluyendo documento tanto en inglés como español; se abordaron artículos científicos cuyos objetivos iban enfocados en la degradación de hidrocarburos totales por medio de biofiltros, de tal manera que con la información recolectada, permitió seleccionar el material de mejor desempeño específicamente para el tratamiento de las aguas de producción petroleras. Se encontraron 10 artículos que abarcaban estudios tanto a nivel global, como nacional del tema, y para dar mayor rigurosidad al documento fueron sometidos a un RAI (Resumen analítico de investigación).

Aunque en los años 70's la necesidad de remoción de hidrocarburos, permitió que **Kondo (1975)** desarrollara una serie de trabajos relativos al uso de absorbentes para el control de la contaminación por hidrocarburos, los materiales que mostraron mejor capacidad de adsorción fueron las fibras de polipropileno y las espumas de poliuretano, sin embargo, el uso de materiales de origen sintético a pesar de tener alta efectividad, presentan desventajas inherentes a su origen sintético como el costo de su producción y una inversión adicional para su reutilización o disposición final. Sin embargo, fue hasta los años 90, que el uso de biofiltros para el manejo de aguas grises era reconocido, uno de los primeros artículos que le dio aplicación a contaminantes petroleros, fue en Brasil en el año 2005, cuyos autores **Annunciado, Sydenstricker, & Amico**, caracterizaron las siguientes fibras para determinar cuál es el mejor absorbente de derrames de petróleo: mezcla de residuos de hojas, mezcla de aserrín, sisal (Agave sisalana), fibra de coco (Cocos nucifera), estropajo (Luffa cylindrica) e hilos de seda, comparando su capacidad de adsorción para petróleo en agua desionizada y agua marina, con y sin agitación, concluyendo que la mayor capacidad de retención la presentaron los hilos de seda y la menor fueron los residuos de hojas, y una variable importante fue el incremento de degradación al reducir el tamaño de la partícula.

Para el año 2012, **Salazar** desarrolló una investigación donde se presenta la evaluación del biopolímero natural (plumas de pollo) como adsorbente de hidrocarburos. Las plumas de pollo tienen un comportamiento hidrofóbico y están compuestas por una red de fibras de queratina. El desarrollo experimental consistió en realizar diferentes pruebas descritas por la norma ASTM F-276: "Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents". Las capacidades de retención de hidrocarburos de las plumas de pollo fueron mayores que las de varios adsorbentes orgánicos naturales que han sido estudiados con este fin. Los resultados obtenidos mostraron que la mejor capacidad de retención se obtuvo para el petróleo con 20.5 g HT/g adsorbente, seguido por el diesel con 9.6 g HT/g sorbente y finalmente la gasolina con 6.2 g HT /g sorbente, para este experimento el tiempo óptimo de retención del hidrocarburo fue de 2 min.

Posteriormente **Zamudio, Bandala, Fernandez & Torres** (2013), realiza el lavado mejorado del tensoactivo del suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo y el tratamiento de aguas residuales producidas utilizando un biofiltro, y comparó la eficiencia del tratamiento biológico utilizando tensoactivos naturales o sintéticos en el proceso de lavado del suelo contaminado y obtuvo que usando la goma de algarroba había una eficiencia del 73% y que los microorganismos encontrados en el

consorcio microbiano en el biofiltro fueron B. subtillis, C. jeikeium, Pseudomonas sp., A. sobria, A. caviae, E.

Kalmykova, Moona, Strömvall, & Björklund (2014) investigaron la capacidad adsorción y degradación de hidrocarburos de petróleo (PHC), AP seleccionados, bisfenol A (BPA), ftalatos y PAH de lixiviados de vertederos utilizando arena, carbón activado granulado (GAC) y filtros de turba, donde los PHC tuvieron un rango de eliminación entre un 35% y 50% de las ocasiones medidas en los filtros GAC y de turba, respectivamente. "El filtro de arena no tuvo una eficiencia satisfactoria para cumplir con los estándares de calidad del agua, no obstante, el filtro de arena es un pretratamiento necesario del hierro precipitado ya que la saturación del material del filtro condujo a menores eficiencias de eliminación de HAP y PHC en los filtros de turba y GAC". Finalmente el autor recomienda combinar los filtros, ya que es una solución más completa para el tratamiento de lixiviados; primero un filtro automático de arena de lavado para la eliminación de partículas más grandes, y luego un filtro de turba para la eliminación de los PHC de mayor peso molecular y también para atrapar partículas más pequeñas escapadas de la arena.

Para el año 2014 el autor **Abdelwahab**, realizó un estudio, donde utiliza diésel y petróleo crudo como adsorbato para evaluar el desempeño de fibras de estropajo, para ello el autor relaciona la eficiencia con parámetros como: la temperatura del petróleo, la cantidad de fibras, la reusabilidad y las características físico-químicas del estropajo. El resultado muestra que el material natural tiene una alta eficiencia de adsorción del 50% respecto al valor inicial, para diferentes compuestos del petróleo. A su vez en ese mismo año, **Martínez, Rodríguez, Pérez, Leiva,** (2014), caracterizaron y evaluaron la capacidad de adsorción del bagazo de caña de azúcar sin modificar, la cual se reporta en 2 g de diésel por 1 gramo de bagazo, observaron el punto de quiebre a las 12 horas de operación y encontraron que el bagazo remueve un 98,5% de grasas y aceites y un 94,8% de los hidrocarburos totales a escala de laboratorio; cabe mencionar que en el 2015 **Sarkheil, et**, realizó un estudio similar, donde se evalúo la capacidad del bagazo de caña de azúcar modificado y las condiciones bajo las cuales se presenta la máxima adsorción (20 g de aceite por 1 g de sorbente), llegando a la conclusión que tiene una buena capacidad de adsorción del petróleo en aguas residuales industriales y por lo tanto es un adsorbente favorable para sustancias no polares como los productos oleosos.

Pazmiño en el 2016 llevó a cabo un trabajo experimental donde se evaluó el porcentaje de eficiencia de remoción de cargas contaminantes como hidrocarburos totales de una lavadora de autos, a partir de un filtro diseñado con materiales como el bagazo de caña de azúcar, arena, ladrillo triturado y piedra pómez; del cual se obtuvo que el filtro tiene una alta disminución de hidrocarburos con más del 96 % de remoción, así mismo parámetros como la turbidez y los sólidos totales suspendidos tuvieron una variación significativa con un porcentaje de remoción del 93% y 88% respectivamente. Finalmente se recomendó una evaluación de las eficiencias por cada una de los lechos implementados, así mismo evaluar el desempeño del filtro a diferentes cargas teniendo presente el caudal.

En 2017 **Velandia**, realizó un estudio donde incorporó el uso de dos lechos filtrantes: bagazo de la caña de azúcar y luffa cylindrica, como adsorbentes naturales para la atención primaria de derrames de petróleo sobre cuerpos de agua, el cual concluye que la adsorción máxima en condiciones estáticas para

el bagazo de caña de azúcar es de 10.9 g de petróleo por gramo de adsorbente, luego de 45 minutos de contacto y para Luffa cylindrica la remoción fue de 8.70 g de petróleo por g de adsorbente, luego de 30 minutos de contacto.

Se observa que los materiales adsorbentes naturales comparados con otros métodos para remover petróleo de las aguas contaminadas, presentan cierta simplicidad, no obstante su uso no es muy conocido para el tratamiento de aguas de producción, por ello la mayoría de estudios son aplicados a derrames petroleros. Además se encontró la fibra no convencional más utilizadas fue el bagazo de caña, debido a su fácil acceso y el alto rendimiento de degradación de grasas e hidrocarburos totales, de igual manera el material convencional más usado fue la arena.

7.3 Marco geográfico y descripción del territorio

El proyecto se llevó a cabo en el pozo Caño Lima, municipio de Arauquita ubicado al norte del departamento de Arauca ver figura 2, el municipio cuenta con una superficie de 3075 Km2, con un área urbana que asciende a 2,6 Km2, incluyendo los perímetros urbanos de la cabecera municipal y de La Esmeralda, por ende, el área total Rural es de 3072.4 Km2, y comprende 153.veredas (Alcaldía municipio de Arauquita, 2016).

Arauquita cuenta con diversas fuentes hídricas como son el río Lipa y el Arauca, además tiene gran diversidad de ecosistemas estratégicos como las Laguna del Lipa, la Chenchena, el Remolino, Laguna Perro de Agua, la Tigra y el Tuteque, las cuales sirven a la población en beneficio de la pesca, la caza, la obtención de madera entre otros (IDEAM, 2000). Una de las principales actividades económicas del sector es el agropecuario, siendo Arauquita el municipio con mayor producción de Cacao en el departamento de Arauca y el tercero a nivel nacional, así mismo la extracción petrolera es una de las fuentes principales de recursos económicas.

Figura 2: Mapa geográfico del municipio de Arauquita, Arauca y ubicación de la zona de estudio, Caño Limón, Fuente. (Alcaldía municipio de Arauquita, 2016).

El pozo de Caño Lima ubicado cerca de la laguna de Lipa, inicia aproximadamente en el brazo Bayonero (ver figura 3) captando agua de ahí y del río Arauca para volúmenes requeridos diarios de cerca de 4,2 L/s, presenta una temperatura aproximada de 32°C, se localiza sobre una llanura de inundación, con dinámica fluvial, lacustre y fluvio lacustre, por ende muy sensible a cualquier cambio, así mismo alrededor del pozo se cuenta con gran diversidad de ecosistemas como son los bosques basales del Orinoco, sabanas, humedales y un importante santuario de fauna y flora (IDEAM, 2000).

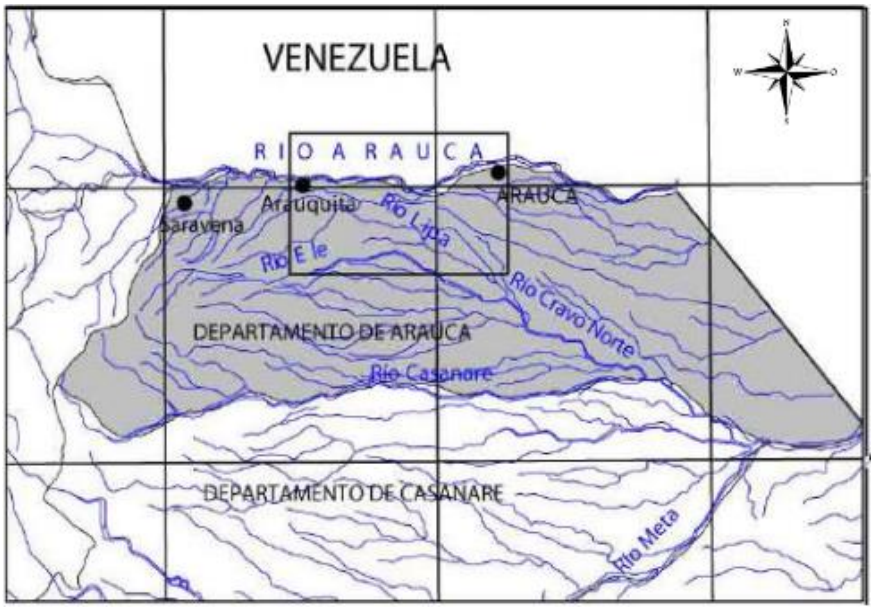


Figura 3: Localización de la zona de estudio con sus respectivas fuentes de abastecimiento de agua. Fuente. IDEAM (2000)

Teniendo en cuenta las descripción del territorio se pudo observar la relación que ha tenido la extracción de hidrocarburos del pozo Caño Lima con los factores climáticos, geológicos, hídrico y sociales con los que cuenta el municipio de Arauquita, debido a que la producción en está zona a ido alterando las diferentes matrices ambientales, así como se menciona en el libro de *Aguas De Producción Petrolera* (2001), donde se plasma como la intervención y los malos manejos de residuos han causado alteraciones, ejemplo de ello es el manejo inadecuado del agua de producción la cuál es dispuesta en piscinas de estabilización que junto con las grandes precipitaciones generan rebose del residuo produciendo derrames de agua con contaminantes al suelo, así mismo como el pozo se encuentra en una zona de llanura inundable la degradación de los ríos y lagunas aledañas se ha visto muy afectada, cabe mencionar que esta problemática tuvo grandes implicaciones en el santuario de fauna y flora (CENSAT, 2001).

7.4. Marco teórico- conceptual

A partir de palabras o términos clave provenientes del objetivo específico se llevó a cabo la realización de este marco, con el fin de definir las diferentes teorías y conceptos que fueron de gran importancia para lograr el desarrollo y fundamento al proyecto, permitiendo darle orientación y enfoque al planteamiento del problema. Se inicia con la g*estión integral del recurso hídrico* que es el pilar para el manejo, control y minimización de la generación de las aguas residuales de producción, y prosigue con la necesidad de *gestión de las aguas de producción petroleras*, para así enfatizar en los *biofiltros* como una posible nueva alternativa para el manejo de aquellas aguas, aquello se resumen en la siguiente figura 4.

Figura 4. Diagrama de teorías que fundamentan el proyecto. Fuente. (Autores, 2020)

7.4.1. Gestión integral del recurso hídrico GIRH

Según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010)"Es un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales", logrando directrices para el adecuado manejo de este recurso, establecida en la *Política de gestión del recurso hídrico*. Para ello es necesario definir las cuencas hidrográficas como la unidad fundamental de análisis para el desarrollo de los procesos de planificación y administración.

7.4.2. Gestión de las aguas de producción petroleras.

Mecanismo para el manejo de residuos de agua que facilite llevar un seguimiento y control de las cantidades producidas durante todas las fases de la generación del petróleo, permitiendo que se lleve a cabo un tratamiento de las mismas, por medio de la aplicación de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin, eliminar los contaminantes presentes en el agua (Gómez, 2014), y así se pueda realizar un aprovechamiento de recursos para reinyección o un vertimiento con las mejores condiciones posibles y que cuente con los parámetros permisibles.

7.4.3 Biofiltros.

Son un sistema o dispositivo que se implementa para la remoción o retención de contaminantes del agua, compuesto por lechos filtrantes de grava u otros materiales orgánicos con diferentes características fisicoquímicas, así mismo se puede tener presencia de microorganismos bien sean anaerobios o aerobios los cuales se nutren de agua residual y degradan biológicamente los contaminantes (Rodríguez, 2014). En la figura 5, se evidencia el proceso para el funcionamiento de un biofiltro con base de un material natural que contiene microorganismos, con sus respectivas partes.

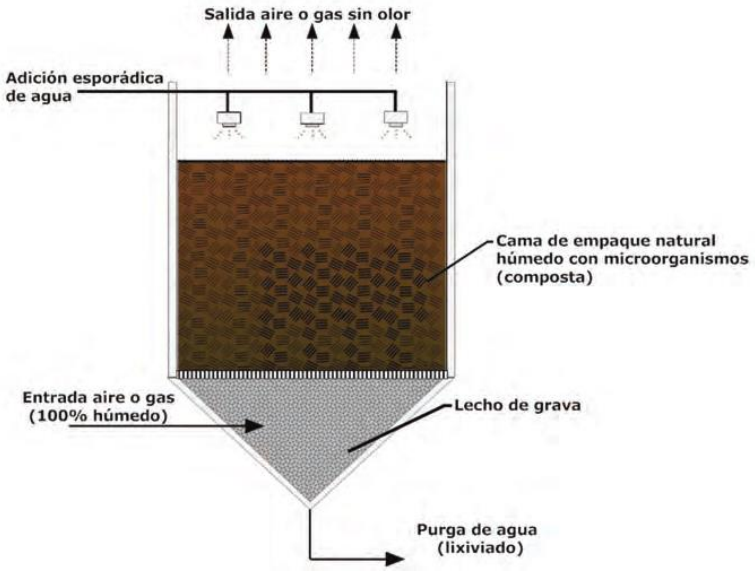


Figura 5: Ejemplo biofiltro. Fuente, (Noyola, Morgan y Güereca, 2013).

Con base a las teorías mencionadas anteriormente, surgen conceptos que permiten abordar la temática principal del proyecto, aquellos son:

Los Procesos Extractivos hacen referencia a las etapas que se llevan a cabo en un proyecto industrial para la obtención de materiales provenientes de los suelos. Para la industria de extracción petrolera se busca principalmente extraer la mayoría de barriles de petróleo teniendo en cuenta las 4 fases elementales como son: la exploración, perforación, producción y transporte/refinación, con las cuales se logra desde la localización de los pozos más convenientes, hasta su transformación para ser distribuidos como producto final (Martínez, 2018).

Los procesos mencionados anteriormente se hacen con el fin de obtener los **hidrocarburos** que como menciona De la Cruz(2007) y su nombre lo indica, "son compuestos formados de carbono e hidrógeno", el **petróleo** es el resultado de la degradación anaeróbica de materia orgánica, durante largos períodos de tiempo y bajo condiciones de alta temperatura y presión, que la convierte en gas natural, crudo y derivados del petróleo, mayor parte de los compuestos que se encuentran en el petróleo y en el carbón mineral son hidrocarburos (De mesa, et al, 2006).

Está actividad productiva así como otras genera diferentes residuos como son: emulsiones acuosas, bituminosos, alquitrán y fluidos de perforación, sin embargo debido a sus características físicas, químicas y a su grado de toxicidad son considerados **residuos peligrosos** los cuales representan un daño inmediato o potencial a la salud y los ecosistemas (Calao, 2007). Uno de los residuos más significativos se genera durante el proceso de perforación, pues en esta fase se requiere la inyección de agua a presión para extraer el hidrocarburo, obteniéndose las denominadas **aguas de producción** las cuales están compuestas por aguas de formación obtenidas de los suelos (subterráneas) y el agua inyectada, de igual forma contiene

diferentes fracciones de petróleo, gas disuelto y diferentes contaminantes provenientes del procesos de extracción (Gómez, 2014). Al momento de tener los residuos ya en la superficie se llevan a cabo diferentes disposiciones o manejos del mismo, ejemplo de ellos son los **vertimientos** los cuales como lo menciona la Autoridad Nacional De Licencias Ambientales "son la descarga final a una fuente hídrica o cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido" (ANLA, 2017).

Por otra parte, la **caracterización fisicoquímica** hace referencia a la identificación y evaluación de la composición química y física por medio del análisis de parámetros. Para este proyecto fué necesario la evaluación de diferentes parámetros como los **hidrocarburos totales (HT)** estos son compuestos químicos originados del petróleo, que contienen una mezcla principalmente de hidrógeno y carbono, llamados hidrocarburos. Estos hidrocarburos totales pueden contener hexano, combustibles de aviones de reacción, aceites minerales, benceno, tolueno, xilenos, naftalina, fluoreno, y gasolina entre otros (ATSDR, 1999). Con respecto al **pH** este se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua, teniendo en cuenta que a mayor número menor concentración de iones de hidrógeno. Además conlleva a determinar si una sustancia es ácida o alcalina, teniendo en cuenta que valores muy extremos por lo general indican algún tipo de contaminación (García, 2010). Este parámetro como se menciona anteriormente facilita determinar la alcalinidad; es decir que existe una relación directamente proporcional entre el pH y la alcalinidad. No obstante, la **alcalinidad** total se expresa como la capacidad del agua para neutralizar ácidos, además de representar la suma de bases que pueden ser tituladas (García, 2010).

Con respecto a la **turbidez** esta es una propiedad óptica del agua causando que los rayos de luz sean absorbidos en vez de traspasar el medio de manera recta, esto puede causarse debido a la presencia de partículas suspendidas y disueltas en un medio, en adición estas partículas proliferan y constituyen una defensa para los microorganismos que se encuentren en este caso en el medio acuoso. En cuanto a la unidad de turbiedad está se establece como: "obstrucción óptica de la luz causada por una parte por millón de Sílice en agua destilada" (García, 2010).

La demanda química de oxígeno (DQO) y **la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)** son parámetros similares, en primer lugar el DQO es la cantidad de oxígeno necesario en el agua para oxidar la materia orgánica, mientras que el DBO hace referencia a la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua. En el caso del DBO este se determina por medio de la diferencia entre la cantidad de oxígeno disuelto el primer día y el quinto día (Sánchez, 2019).

En cuanto a propiedades químicas del agua que contribuyan a condiciones corrosivas de esta, se encuentran los cloruros, los sulfatos y el amonio; los cloruros se caracterizan por formar sales solubles en el agua, además si este parámetro se encuentra alto afecta el potencial del uso del agua para actividades agrícolas e industriales; los **sulfatos** al igual que los **cloruros** contribuyen a la formación de sales, sin embargo, su efecto negativo es la inhibición o disminución de la vida acuática (Gallardo, 2009); en cuanto

al **amonio** se produce por degradación o fermentación de microorganismos de productos nitrogenados provenientes de la excreta (Clair, Sawyer, McCarthy, 2000).

Para el mejoramiento de los parámetros fisicoquímicos y manejo de las aguas de producción es necesario implementar estrategias que permitan mitigar los impactos que estas pueden generar al ser vertidas al medio, una de las alternativas de tratamiento es la **oxidación química** donde se emplean compuestos químicos para oxidar, como permanganato de potasio, persulfato de sodio, mezclas de peróxido-hidrógeno; su principal falencia es la incapacidad de uso en todos los sitios (Ayyaswami & Vishwanathan, 2010). Otro proceso es la **reinyección de cortes y residuo** el cual radica en la inyección de los residuos y fluidos de perforación en pozos abandonados a presiones que fracturan la formación que recibe la suspensión, con la intención que este entre en las fracturas inducidas y quede confinado allí (Lizarazo y leal, 2011).

Los requerimientos para el tratamiento y métodos de separación varían según la disposición final que se le da al residuo, uno de estos son los **separadores API,** hacen referencia a una pila de placas paralelas para separar las partículas de agua aceitosa haciendo que por medio de la densidad las partículas de aceite suba a la superficie y se pueda presentar la separación, dependiendo de variables como el tiempo de retención y la adición de floculantes y coagulantes. Así mismo los **tanques de lavado** manejan un proceso similar el cual busca la separación del agua y el crudo por medio de la coalescencia de las partículas de aceite y el tiempo de retención en el tanque, en algunos caso se agrega un agente emulsificador que facilita dicha separación (ARPEL, 2012). El método de tratamiento más utilizado y más simple son las **lagunas de estabilización** que se llevan a cabo por medio de excavaciones o tanques que permitan almacenar las aguas residuales tanto industriales como domésticas, a través de un proceso de purificación natural con presencia de actividad bacteriana (CNA, 2007).

Teniendo en cuenta que uno de los tratamientos que se les da a las aguas de producción es la **filtración** cuya finalidad es mejorar la calidad del recurso hídrico por medio de la separación de sólidos y aceites por medio de una superficie o lecho poroso, se utiliza para remover sólidos en suspensión e hidrocarburos insolubles del agua de producción. Este proceso se lleva a cabo mediante la **adsorción** es el comportamiento de una sustancia ya sea en estado gaseoso o líquido que se adhiere en la superficie o interface de un sólido, en las aguas de producción petroleras las grasas, aceites e hidrocarburos se adhieren a la superficie del adsorbente permitiendo obtener mejores condiciones de la misma (Arroyo & Ruíz, 2018).

La **absorción** es la transferencia de materia, que ocurre cuando un disolvente líquido es retenido a través de otro material (Saéz,2015), para el caso el petróleo se da una penetración en los poros del material, según el National Response Team Science & Technology Committe (2007) define los **absorbentes** usados para remover petróleo y compuestos peligrosos del agua, como “aquellos materiales que utilizan la adsorción, la absorción o una combinación de las dos para remover los contaminantes”; existen dos tipos de adsorbentes dependiendo del origen y uso, los **adsorbentes no convencionales** también llamados verdes o bioadsorbentes, se originan del aprovechamiento de los materiales de desecho que provienen de la industria alimentaria y agrícola; ejemplo de ello son los desechos de fruta, residuos

vegetales y plantas, cabe mencionar que presenta ventajas significativas como ser materiales bioadsorbentes de bajo costo, disponibilidad, adecuada capacidad de adsorción y degradabilidad lo que conduce a un menor número de problemas en la disposición final. Y por otro lado los **adsorbentes convencionales**, son materiales que tienen un tratamiento previo y una vez utilizados, deben regenerarse para recuperar sus propiedades, aquellos pueden formar interacciones intermoleculares débiles con el adsorbato (contaminante); los más conocidos son: carbono activado, alúmina activada, arenas y zeolita (Valladares ,Cárdenas, De la Cruz y Melgoza, 2017).

El bagazo de caña es un residuo lignocelulósico, fibroso, obtenido en el proceso de la fabricación de azúcar, este representa el 28% en peso de la caña que se procesa. El material es orgánico, alta capacidad de retención de agua y altamente poroso, contiene 23,09% de lignina y de 38,01% de celulosa permitiendo que el bagazo adquiera rigidez en la pared celular (Castillo, 2017). Además es el absorbente natural más utilizado, debido a su bajo costo y abundante disposición, debido a la anisotropía de la estructura medular, la orientación y las cavidades huecas de las fibras refuerzan la acción capilar y la difusión del aceite a través del interior de la fibra, siendo bastante eficiente para la disminución de materiales oleosos como los hidrocarburos (Karnitz et al., 2007). Así como el bagazo **la arena** es uno de los materiales más utilizado en el tratamiento de agua debido a su alto potencial para reducir la turbidez , así mismo este material se caracteriza por tener altas cantidades de sílice y ser insoluble en el agua (Pazmiño, 2016).

La **piedra pómez** *(Pumicita)* un agregado ligero, así mismo es una roca de origen ígneo que se obtiene del proceso de enfriamiento del magma cuando sale a la superficie, generando la rocas volcánicas cuenta con una gran capacidad de adsorción y absorción gracias a una de sus propiedades físicas más importantes que es la porosidad ya que cuentan con amplias áreas superficiales (García, Güiza & Baquero, 2019). Otros de los lechos con gran retención de contaminantes son las **plumas de pollo** *(Gallus domesticus)* las cuales son estructuras dérmicas (ver figura 6) compuestas 90% por queratina, aquella estructura queratinosa confiere a las plumas alta resistencia mecánica y área superficial, las plumas están subdivididas por varios elementos, donde la parte central recibe el nombre de raquis, este es el soporte de la pluma y donde se unen los vexilos, culminando en una parte más ancha y hueca llamada cálamo , cuya función es unir la pluma con la piel (Biblioteca Digital ILCE, 2012).

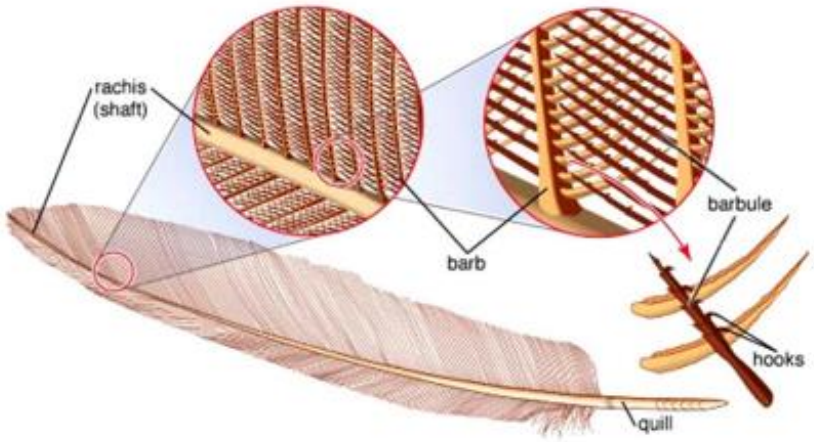


Figura 6: Estructura de la pluma. Fuente, (Tesfayea, Sitholea y Ramjugernath, 2018)

7.5. Marco Normativo.

El marco normativo sobre hidrocarburos en Colombia menciona las leyes, decretos, resoluciones, artículos, circulares, conceptos y acuerdos, relacionados con los procesos que se llevan a cabo para la obtención de materias primas como el petróleo y sus derivados, teniendo en cuenta la otorgación de títulos, extracción del recurso, la fiscalización de la producción; la liquidación y recaudo de regalías y compensaciones; la distribución y transferencia de los ingresos; el medio ambiente y la inversión social (Minenergía, 2016). Esta normativa se estructura a partir del marco regulatorio el cual reglamenta las fases de exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización del material; el marco sancionatorio en el cual se mencionan las acciones que se toman por el incumplimiento de las leyes establecidas en el marco regulatorio, y finalmente el marco procedimental que determinan las consecuencias de las acciones del proyecto productivo.

Dentro de la Constitución Política de Colombia de 1991, se encuentran diferentes apartados en materia de hidrocarburos como lo es el artículo 8 en donde se estableció la obligación del Estado y de las personas de proteger las riquezas naturales de la nación. Así mismo, en el 332 se menciona que el Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes.

Los artículos como el 58, 150, 330, 332, 334, 360, 361 y el 365 señalan que al Estado Colombiano corresponde la dirección general de la economía, expidiendo códigos y leyes de intervención económica, y en consecuencia la intervención en la explotación de los recursos naturales no renovables en efecto, los hidrocarburos, causará a favor del Estado, una contraprestación económica a título de regalía. Además, en estos párrafos de la constitución se tienen en cuenta las regalías tanto para el estado como para los municipios y departamentos donde se adelanten las actividades.

Para 1953 se estableció el decreto 1056 como el código de petróleo, allí se vio la primera reglamentación de las disposiciones relativas a "las mezclas naturales de hidrocarburos que se encuentran en la tierra, cualquiera que sea el estado físico de aquéllas, y que componen el petróleo, lo acompañan o se derivan de él", regulando la propiedad, utilidad y forma de explotación de los mismos y sus derivados. Este texto tiene temas como la exploración y explotación de los hidrocarburos, transporte y comercialización en general de los recursos naturales no renovables, así mismo todo lo que tiene que ver con la otorgación de contratos de explotación y reglas sobre perforación entre otros.

La Resolución No. 181495 de 2009 donde se dictó la normatividad sobre hidrocarburos respecto la exploración y explotación de petróleos y gas, lo anterior con el fin de maximizar y aprovechar las reservas. Parte muy importante de esta resolución es que se consagran obligaciones adicionales tales como los reportes geológicos de los yacimientos, y se reafirmó que el Ministerio de Minas y Energía, encargado para ese entonces, del control de yacimientos, decidiendo cuándo se puede explotar un yacimiento de petróleo o gas.

Teniendo en cuenta que el decreto 2811 de 1974 es el código nacional de recursos naturales renovables y protección del medio ambiente, es importante mencionarlo en la monografía debido a que con este código se busca lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad, que aseguren el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de estos y la máxima participación social, para beneficio de la salud y el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio nacional, regulando la tierra, el suelo y el subsuelo.

Cabe mencionar las siguientes leyes que tienen relación con la extracción de hidrocarburos como la ley 120 de 1919 se definen términos como hidrocarburo, además, se concertó que la industria que explota este bien y la construcción de oleoductos son de utilidad pública. Así mismo, la Ley 160 de 1936 reglamenta las fases de exploración, explotación y de igual forma se tienen en cuenta los contratos de concesión celebrados entre el Estado y los particulares. Por último, se menciona la Ley 99 de 1993 donde se relacionan los procesos productivos del país con los acuerdos de sostenibilidad establecidos en la declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo.

El decreto 3930 de 2010 en el artículo 29 plantea como la autoridad competente debe seguir el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (POHR), fija las normas de vertimientos a cuerpos de agua o al suelo asociado a un acuífero, por otra parte el artículo 62 de esta misma norma considera los planes de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos PRTGV como mecanismo para el cumplimiento de las normas establecidas para vertimientos. Cabe mencionar que la normativa en la que más se enfocó el proyecto fue la resolución 631 de 2015, pues esta norma dicta los parámetros de calidad que deben tener las aguas residuales que contiene hidrocarburos al momento de realizar algún vertimientos, además de brindar un índice de comparación, aquello se menciona en el artículo 10 (parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería).

Finalmente para el uso del agua tratada se utilizó la resolución 1207 del 2014 la cual busca la implementación de procesos y tecnologías para el ahorro y uso eficiente del agua, donde se considera el reúso del agua residual como una estrategia de recirculación para diferentes procesos productivos.

Es posible evidenciar que, pese a que en el país existen diferentes normas referentes a la calidad del agua y al manejo de vertimientos, la mayoría de ellas no aplican al manejo y disposición de las aguas de producción dentro de la empresa, y mucho menos para los parámetros de la calidad de tal agua, cuando están presentes en una piscina de estabilización, lo cual significa que para aquellos casos es insuficiente la regulación.

8. Marco Metodológico.

En la organización metodológica es necesario entender que el proyecto se trabajó desde un **enfoque Mixto**, presentando características cuantitativas como la recolección y obtención de datos a partir de métodos analíticos que permitieron comprender el comportamiento del tratamiento propuesto mediante un análisis estadísticos; así mismo las características cualitativas facilitaron recolectar datos a través de la observación y descripción de variables y factores que inciden en el funcionamiento del biofiltro. Presentó un **alcance exploratorio**, debido a lo poco estudiado que ha sido el tema, la poca información respecto a la problemática y respecto a una alternativa de solución sostenible.

Se consideró el desarrollo del proyecto mediante el **Método analítico-experimental** durante la realización de todo el estudio, lo cual permitió determinar la calidad del agua de producción a partir de la estudio de sus parámetros fisicoquímicos significativos, mediante las diferentes pruebas experimentales estandarizadas. Las variables de análisis muestran cómo al aplicar el método mencionado anteriormente se pudo evidenciar el efecto que tiene el agua de producción al pasar por un tratamiento de biofiltración, en la figura 7 se observó que la disminución de hidrocarburos depende totalmente del tratamiento que se le da a partir del biofiltro.

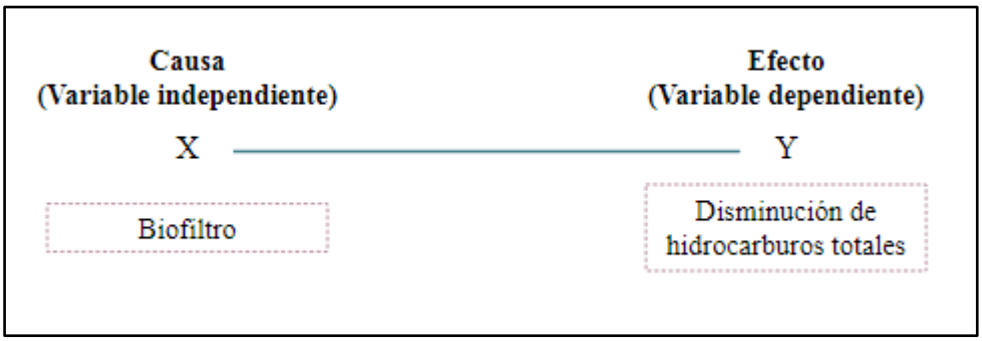


Figura 7. Análisis de materiales. Fuente, (Autores, 2020)

Con el propósito de responder las preguntas de investigación y cumpliendo los objetivos de estudio, se dividió el proyecto en 8 fases, cada una corresponde a su respectivo objetivo específico:

1. Fase preparatoria
2. Fase de recolección u obtención de la Muestra
3. Métodos analíticos (Análisis de parámetros)
4. Evaluación de pretratamiento del material soporte.
5. Configuración del sistema (diseño)
6. Operación del sistema.

7. Análisis estadístico

8. Diseño escalado del sistema y alternativa sustentable.

8.1 Objetivo específico 1:

Determinar las características fisicoquímicas en muestras de aguas de producción petrolera colectadas en el pozo Caño Lima.

Para el desarrollo del primer objetivo, se aplicaron las fases 1, 2 y 3, tal como se muestra en la figura 8, donde por cada fase se asignaron las diferentes actividades que se llevaron a cabo para cumplir con el objetivo.

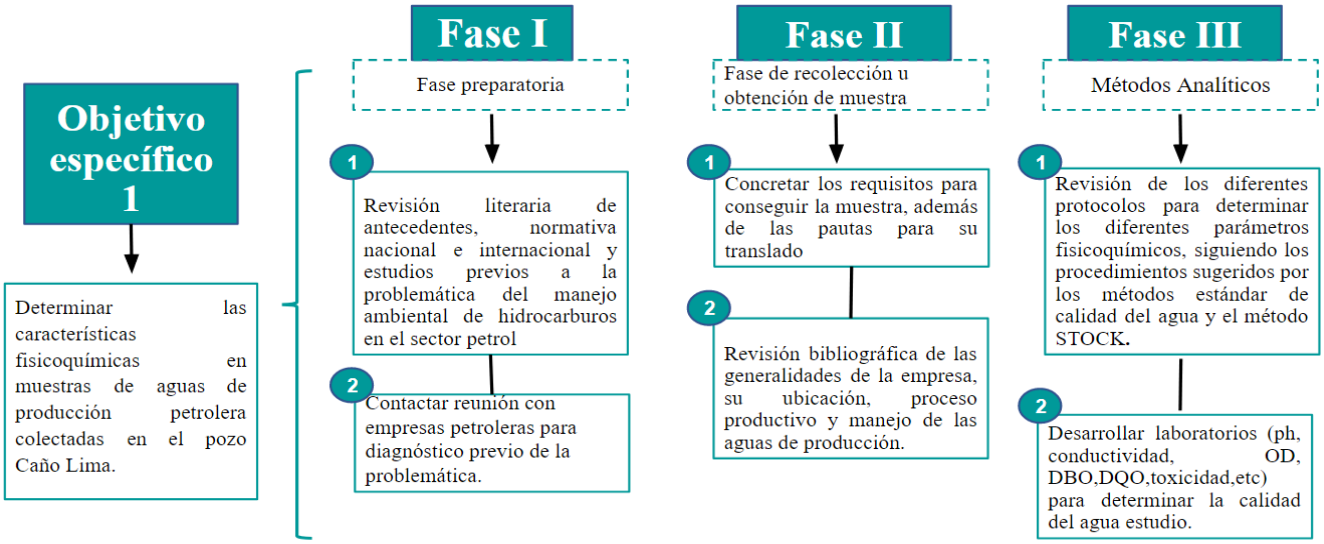


Figura 8. Diagrama actividades del objetivo 1. Fuente, (Autores, 2020)

8.1.1 Fase preparatoria:

Basado en el método RAI se llevó a cabo una recopilación de información y recolección de datos, obtenidos por parte de diversas empresas en sus estudios de impactos ambiental, así mismo se investigaron los diferentes parámetros a tener en cuenta presente en la normativa para vertimientos *Resolución 631 del 2015*, finalmente se realizó una revisión bibliográfica por medio de diferentes bases de datos con el fin de analizar los métodos para el manejo de las aguas de producción y la eficiencia de diversos materiales para la fabricación del biofiltro.

8.1.2 Fase de recolección u obtención de muestra:

Se llevó a cabo un proceso de contacto con diferentes empresas del sector de hidrocarburos con el fin de obtener una muestra de agua de producción, logrando un acercamiento a la empresa Petrolima, la cual facilitó el acceso al residuo proveniente del pozo Caño Lima; así mismo se tuvo en cuenta el protocolo del libro *Métodos de procesos químicos* para el manejo y la conservación de la muestra obtenida.

Figura 9. Localización de obtención de la muestra. Fuente: Google Earth, 2020. Modificado por: (Autores, 2020).

Obtención de la muestra: Las muestras de agua del estudio procedieron de la empresa Petrolima específicamente del pozo Caño Lima, ubicado en Arauquita, Arauca, en este campo petrolero se realizan procesos de exploración, explotación y transporte de productos petrolíferos, como consecuencia se generan aguas residuales, las cuales se almacenan en tanques de producción o tanques de lavado para luego verterlas al medio. Las aguas de producción tienen como destino común un depósito colector conectado con una tubería desde el pozo, aquel a su vez se conecta con los tanques de producción o tanques de lavado ver figura x, cabe mencionar que entre los procesos se usa la sustancia química *Dissolvan 3361* como un sistema de separación de mezcla hidrocarburo-agua.

Para el estudio se tomaron 2 muestras depositadas en envases de plástico de 1 galón desde la salida de las piscinas de estabilización donde se vierte al medio (figura 10), allí el agua ya presenta un tratamiento previo y así mismo tiene una temperatura ambiente. Una vez recogidas las muestras fueron llevadas a los laboratorios de la Universidad El Bosque en Bogotá manteniendo un punto de congelación de (4±2 °C).

Figura 10. Piscinas de estabilización. Fuente, (Autores, 2020)

8.1.3 Fase de métodos analíticos:

Se hizo una revisión de los parámetros fisicoquímicos que presentaba el agua, para este proceso se realizó una consulta previa del Standard Methods for the Examination of Water de donde se obtuvo el método experimental a usar. Cabe resaltar que antes de desarrollar cada laboratorio fue necesario decantar la muestra e inclusive en algunos casos filtrar como se muestra en la figura 11, pese a que el análisis volumétrico no es la metodología de mayor precisión, se realizaron ensayos por triplicado a través de los cuales se obtuvieron resultados con mayor confiabilidad, y para asegurar la veracidad del resultado a el cual se le aplicó estadísticas para hallar su promedio y desviación estándar de los datos.

Figura 11. Decantación y filtración de la muestra. Fuente, (Autores, 2020)

En la figura 12 se observa un diagrama con los parámetros evaluados según el protocolo anteriormente mencionado, donde algunos se midieron por medio del multiparámetros y otros con un método específico plasmados en la figura 12, para algunos parámetros se requirió llevar a cabo la ecuación correspondiente como la DBO, color, nitratos, hidrocarburo, finalmente fueron comparados con los valores máximo permitidos de los parámetros fisicoquímicos representados en la normativa de vertimientos resolución 631 de 2015.

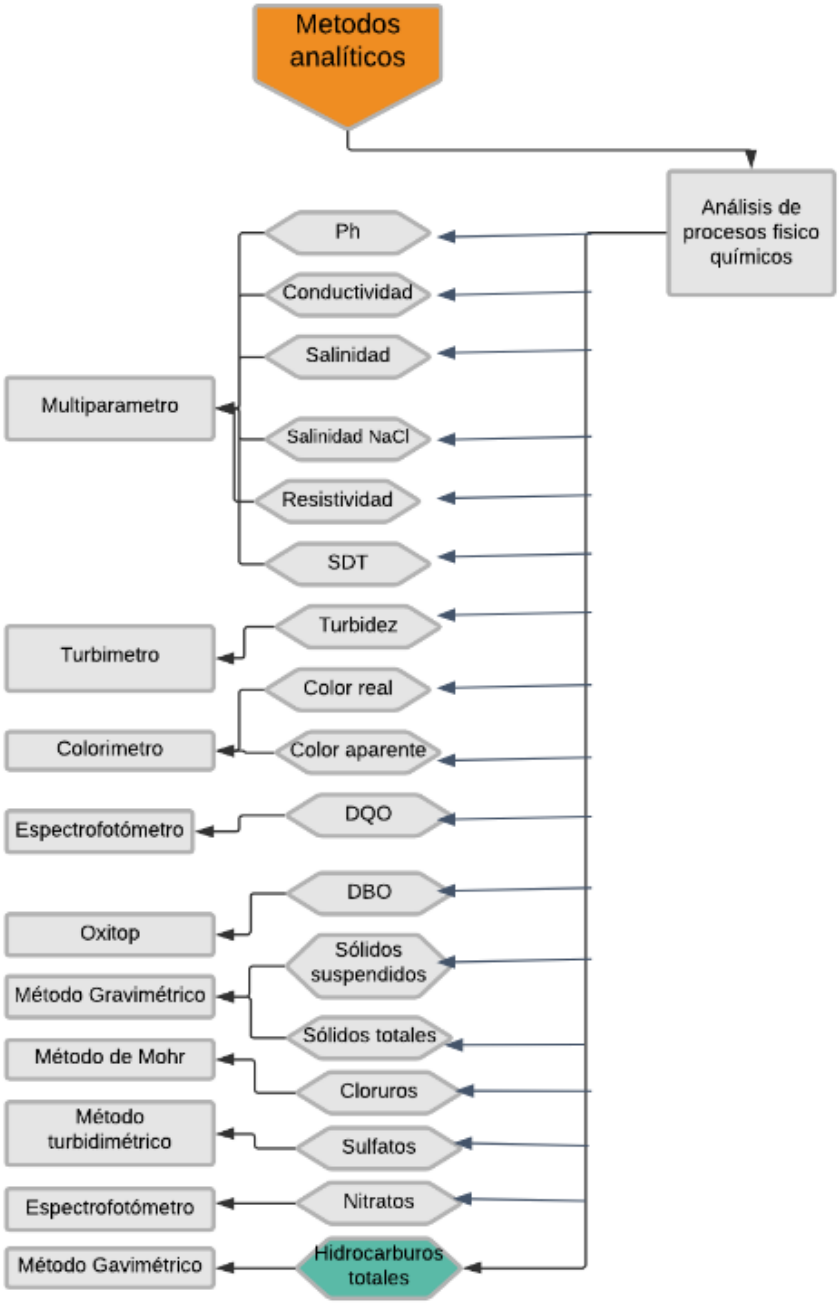


Figura 12. Parámetros fisicoquímicos evaluados. Fuente, (Autores, 2020).

Para determinar el factor de biodegradabilidad relacionando**,** se utiliza la ecuación 1 relacionando la concentración de DBO y DQO:

$$Factor\ de\ Biodegradabilidad = \frac{DBO_5}{DQO}$$

Mediante la siguiente ecuación 2 se calcularon los cloruros presentes en el agua de producción:

$$\frac{Cl - mg}{L} = \frac{(a - b)\ x\ N\ x\ 35{,}450}{ml\ de\ muestra}$$

Dónde:
a = Son los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración de la muestra.
b= Son los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración del blanco.
N= Es la normalidad del nitrato de plata.

Para calcular la presencia de nitratos en las muestras, se aplicó la ecuación 3 y posteriormente el valor obtenido se sometió a su respectiva curva de calibración:

$$\frac{mg}{L} N - NO3 = (Absorbancia\ 220A - (2\ x\ Absorbancia\ 275A))$$

Dónde:
$Absorbancia\ (A)$ = Lectura realizada por el espectrofotómetro.
mg/L N- NO3 = Concentración de nitratos calculada y registrada por el espectrofotómetro UV-VIS.

Para la obtención de sulfatos se implementó la ecuación 4:

$$Sulfatos\ en\ mg/litro = \frac{0{,}4115 * P}{V} * 1000$$

P=Peso (mg) del precipitado de sulfato de bario
V¨= Volumen (ml) de la muestra

Era necesario determinar los hidrocarburos totales debido presión ambiental que generan, el método utilizado para la estandarización de hidrocarburos totales fue por gravimetría, y este se desarrolló siguiendo el método planteado por el IDEAM y el Standard Methods for the Examination of Water. De manera general, la metodología seguida se presenta en la figura 11. Cabe mencionar que se aplicó la ecuación 5:

$$\frac{HC_{mg}}{L} = \frac{(Pf - Pi)}{V}$$

Dónde:
Pf= Peso final del matraz de extracción, mg.
Pi= Peso inicial del matraz de extracción, mg.

V= Volumen de la muestra, l.

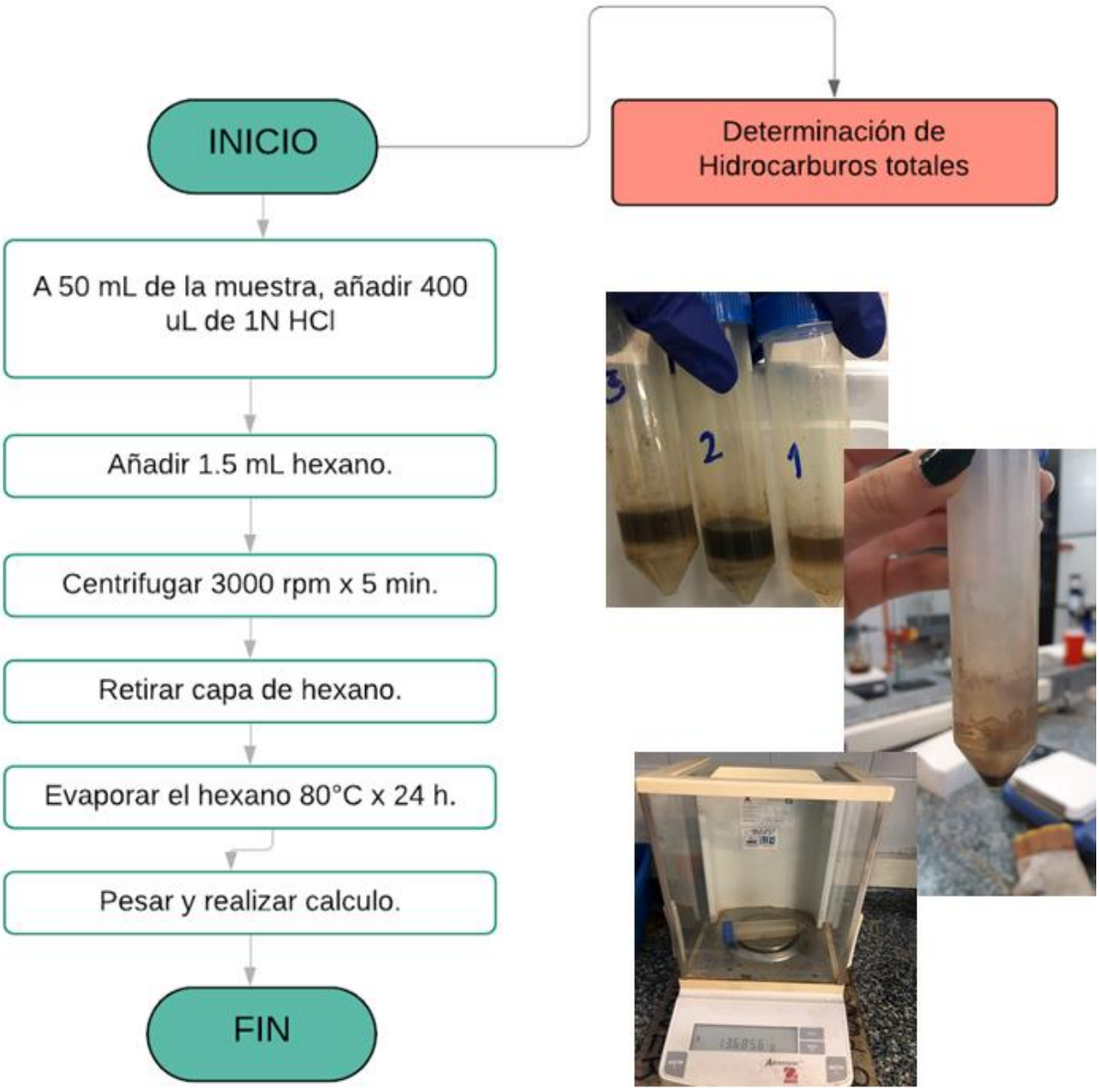


Figura 13. Metodología para determinación de hidrocarburos. Fuente, (Autores, 2020).

Durante el desarrollo de este objetivo se tuvieron en cuenta por cada fase las diferentes actividades, los métodos, técnicas e instrumentos que permitieron analizar de manera más detallada y precisa todos los aspectos importantes para la ejecución del mismo.

Tabla 1
Descripción de las fases con sus diferentes actividades del objetivo 1.

Objetivo General	Objetivos específicos	Fases	Actividades	Métodos	Técnicas	Instrumentos
Análisis del desempeño de un biofiltro a base del residuo cascarilla de cacao para el tratamiento de aguas de producción petroleras ubicadas en el sector de caño limón(Empresa Petrolima).	**Determinar las características fisicoquímicas en muestras de aguas de producción petrolera colectadas en el pozo Caño Lima.**	Fase preparatoria	Revisión literaria de antecedentes, normativa nacional e internacional y estudios previos a la problemática del manejo ambiental de hidrocarburos en el sector petrolero.	Método Analítico-sintetico.	Recolección de datos= Investigación cientifica exploratoria.	Bases de datos , libros, artículos cientificos, tesis.etc.
			Contactar reunión con empresas petroleras para diagnóstico previo de la problemática.	Método Analítico-inductivo.	Recolección de datos y entrevista	Registro foto-documental y cuestionario.
		Fase de recolección u obtención de la Muestra	Concretar los requisitos para conseguir la muestra, además de las pautas para su translado	Método Analítico-sintetico	Recolección de datos, análisis de contenido y recolección de muestra	Standar Method
			Revisión bibliográfica de las generalidades de la empresa, su ubicación, proceso productivo y manejo de las aguas de producción.	Método Analítico-sintetico	Recolección de datos y entrevista	Registro foto-documental, diario de campo
		Métodos analíticos	Revisión de los diferentes protocolos para determinar los diferentes parámetros fisicoquímicos, siguiendo los procedimientos sugeridos por los métodos estándar de calidad del agua y el método STOCK.	Método Analítico-sintetico	Recolección de datos y análisis de contenido	Standard Method y protocolo de metodo STOCK.
			Desarrollar laboratorios de caracterización fisicoquiica (ph, conductividad, OD, DBO,DQO,sulfatos,etc) para determinar la calidad del agua estudio.	Método Empirico	Tecnica experimental y observación	Equipos y elementos de laboratorio, instrumentos de medición .
						Resolución 631 de 2015 y Normativa EPA.

Fuente. (Autores, 2020)

8.2 Objetivo específico 2: *Diseñar una estrategia para el tratamiento del agua de producción con los materiales soporte bajo diferentes configuraciones de carga para emplear en el biofiltro.* Para el desarrollo del segundo objetivo, se aplicaron las fases 4, 5 y 6, de tal manera que se logrará configurar el diseño del biofiltro, en la figura 14 se muestran las diferentes actividades realizadas para completar cada una de las fases.

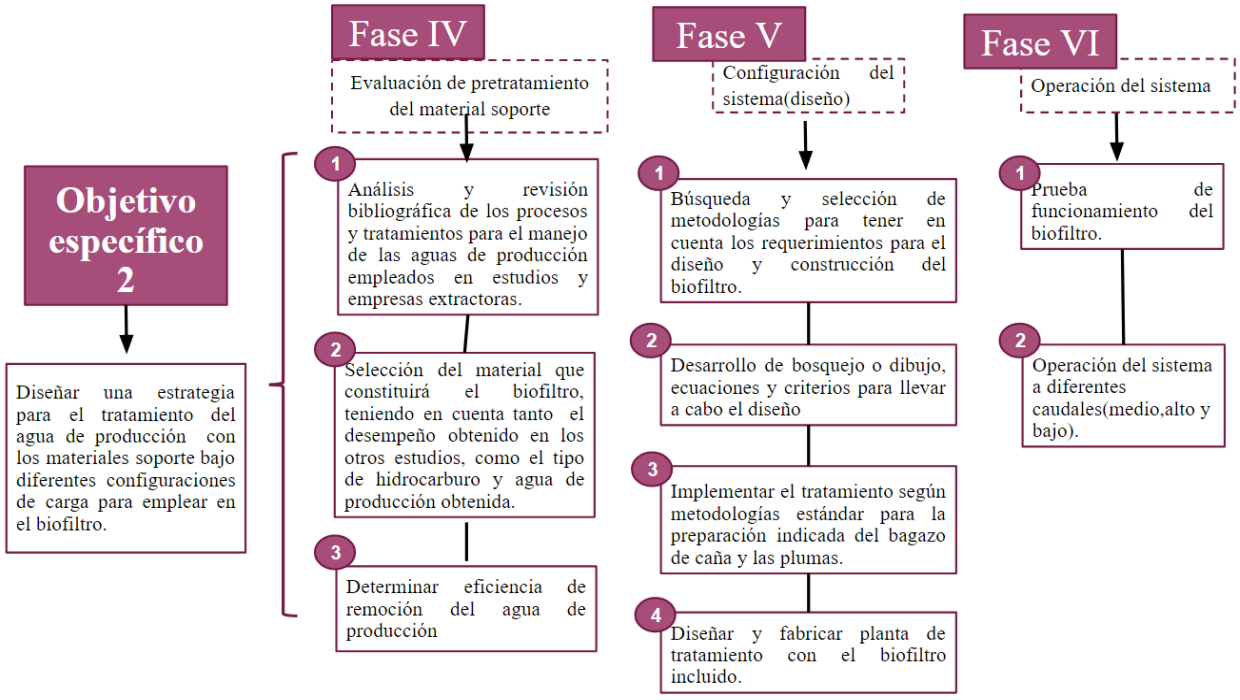


Figura 14. Diagrama actividades del objetivo 2. Fuente, (Autores, 2020)

8.2.1. Fase de evaluación de pretratamiento del material soporte.

Selección de materiales soporte.

Para la selección de los absorbentes naturales que se utilizaron en el filtro se hizo una revisión bibliográfica de artículos que requerían residuos orgánicos para mejorar la calidad de las aguas residuales, específicamente las aguas de producción, los soportes empleados en el estudio se seleccionaron atendiendo: capacidad de absorción para residuos petroleros, absorbentes naturales más utilizados para remediación y manejo de las aguas de producció, propiedades que facilitan la absorción y adsorción de los hidrocarburos, como tener capacidades hidrofóbicas y si son sorbentes naturales y biodegradables, de tal manera que sean una opción ambientalmente amigable para la remoción de hidrocarburos. Los materiales utilizados como soporte fueron:

Plumas de pollo *(Gallus domesticus)*.

Se seleccionó este material debido a su alto potencial hidrofóbico ya que al estar compuesto en su mayoría por queratina se hace insoluble en agua, la queratina presente en las plumas es un adsorbente atractivo pues al contener grandes cantidades de aminoácidos como la Cisteína se facilita la disminución de contaminantes como las grasas, metales pesados y compuestos nos polares como lo hidrocarburos (Kar y Misra, 2004). Una de las propiedades significativas de las plumas es la porosidad y en la figura 15 mediante la microscopía electrónica se observa en la *imagen a* como en los vexilos queda enganchado

el hidrocarburo, cabe mencionar que el tamaño de la pluma incide en la adsorción de crudo pues a medida que se hace más pequeño su tamaño se aumenta el área de contacto, permitiendo que el hidrocarburo se adhiera a este, mientras que la imagen b muestra la forma de la pluma (Bautista, Hastamorir y Vanessa, 2017)

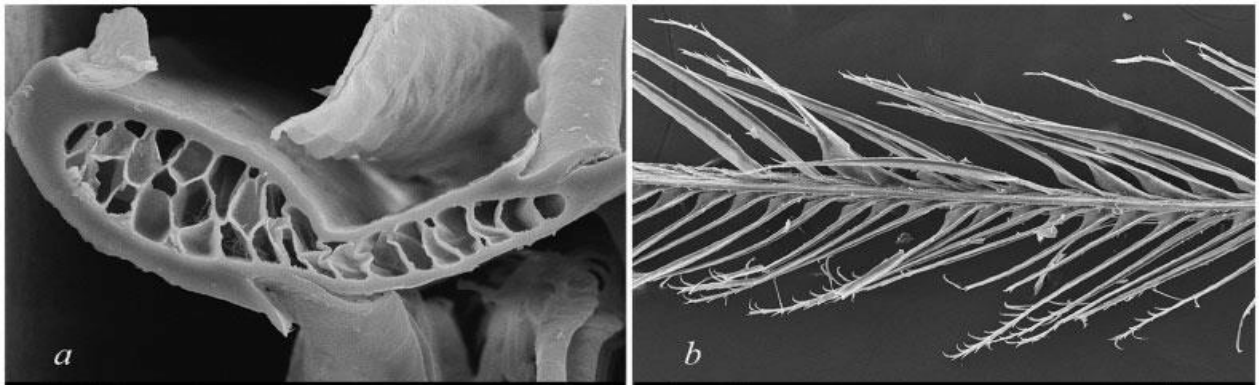
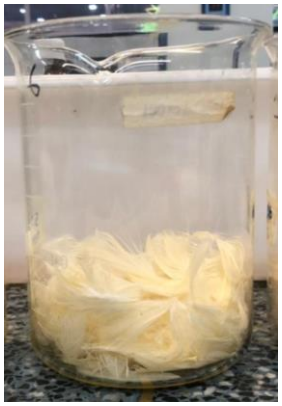


*Figura 15.*Microscopía electrónica de las plumas. Fuente, (KOcatepe y i Mara, 2018)

Las plumas de pollo fueron obtenidas de un rastro avícola ubicado en la ciudad de Bogotá. Previo a su uso, las plumas fueron lavadas con detergente, alcohol y vinagre, se enjuagaron varias veces con agua, se dejaron secar al sol y finalmente se recortaron de un tamaño de 4 cm de largo debido a que Salazar (2012), demostró que ese es el tamaño ideal de las plumas puesto que el desempeño en la capacidad de retención fue mucho más alta que las plumas con tamaños mayores (ver tabla 2).

Tabla 2

Pretratamiento del material soporte plumas de pollo.

1.Lavado de Plumas	2.Secado de Plumas	3.Recorte de las plumas
		

Fuente. (Autores, 2020).

Bagazo de caña *(Saccharum officinarum)*

Este material fue seleccionado ya que es uno de los adsorbentes más conocidos y utilizados en la industrial gracias a su efectividad para el tratamiento y remoción de hidrocarburos en el agua, debido a que está compuesta de un 23,09% de lignina propiedad que aumenta la hidrofobicidad del material (Castillo, 2017), además posee una estructura medular y cavidades huecas en las fibras que permiten la difusión del crudo hacia el interior (Karnitz, et. al 2007). En la figura 16 se observa como partículas de hidrocarburo plasmadas en forma de gotas quedaron adheridas a las fibras del bagazo, probando lo que se menciona en el párrafo anterior acerca de su capacidad hidrofóbica.

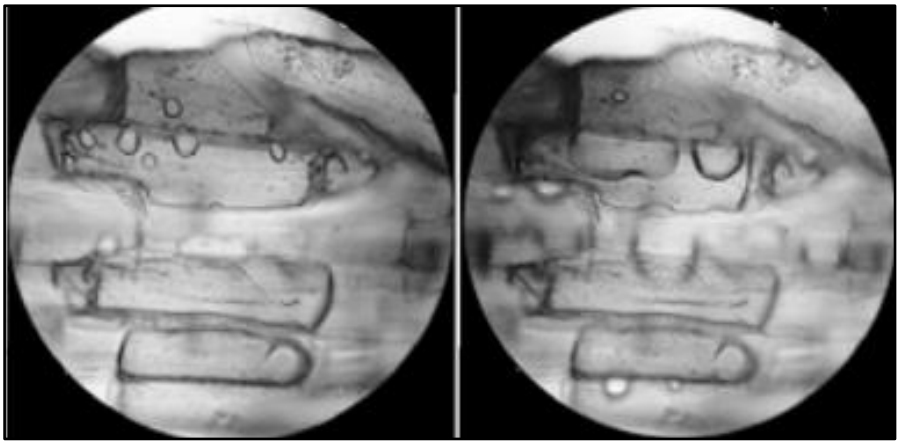


Figura 16. Microscopía electrónica del Bagazo de caña. Fuente, (Flores, Valladares, Bonillo, & Acosta, 2013).

El bagazo de caña fue obtenido de un trapiche panelero ubicado en el municipio de Utica, Cundinamarca. Previo a su uso, el bagazo fue triturado en fibras más pequeñas por medio de un molino convencional, posteriormente fue lavado con alcohol y agua destilada y finalmente se dejó secar en el horno a 105 °C por 24 (Ver tabla 3).

Tabla 3
Pretratamiento del material soporte bagazo de caña.

1. Obtención de bagazo de caña.	2. Molida de bagazo de caña.	3. Lavado del bagazo.	4. Secado del bagazo en el horno.

(Autores, 2020)

Piedra Pómez *(Pumicita)*

La piedra pómez se escogió como uno de los materiales adsorbentes debido a que tiene una composición química que favorece las propiedades hidrofóbicas para retener tanto humedad como hidrocarburos, siendo el trióxido de sílice y el trióxido de aluminio el componente que facilita la adherencia del crudo a los poros del material (Vélez, 2019), el fenómeno mencionado anteriormente se observa en la figura 17 donde la zona agrietada es donde se encuentra retenido el contaminante.

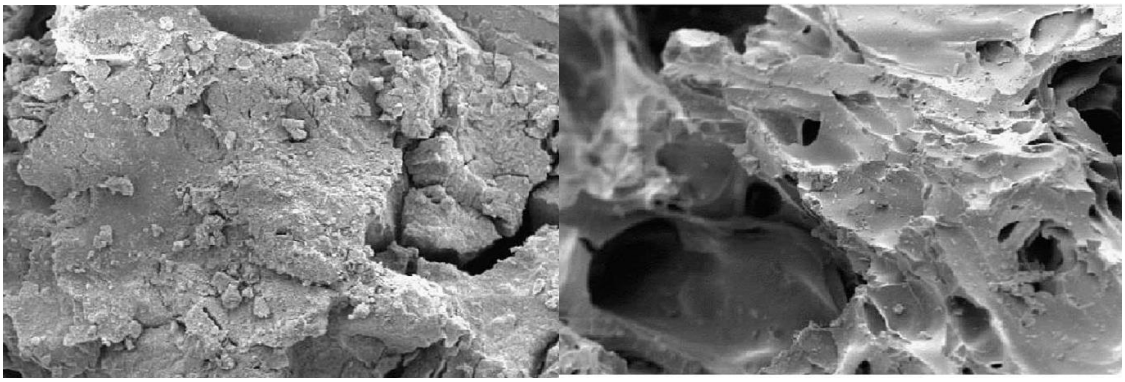
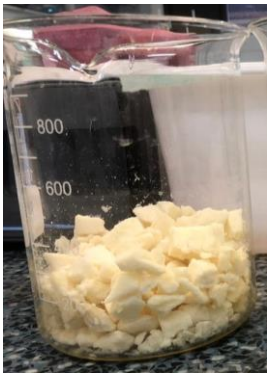


Figura 17. Partículas hidrófobas de la piedra pómez. Fuente, (Vélez,2019)

La piedra pómez fue obtenida de una droguería, el material fue cortado en trozos pequeños que permitiera la fácil acomodación en el vaso de precipitado, tal como lo plantea el autor Pazmiña, (2016). (Ver tablas 4)

Tabla 4.
Pretratamiento del material soporte piedra pómez.

1.Recolección de la piedra	2.Cortado del material
	

Fuente, (Autores, 2020)

Arena de río:

Este material filtrante se eligió ya que al contener sílice cuenta con propiedades hidrofóbicas gracias a su alto contenido de sílice, reduciendo la infiltración de agua y permitiendo absorber sustancias contaminantes, metales pesados o grasas y aceites (UPME, 2016). Además es muy conocida y utilizada comúnmente en las plantas de tratamiento de agua gracias a su capacidad para la reducción de la turbidez, tal como se muestra en la figura 18 la arena es altamente porosa y esa propiedad le confiere la disminución de contaminantes en el agua así como se evidencia a la derecha de la imagen.

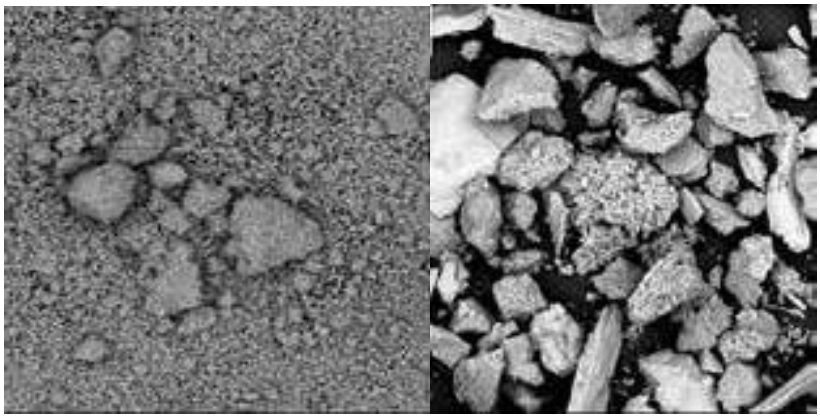
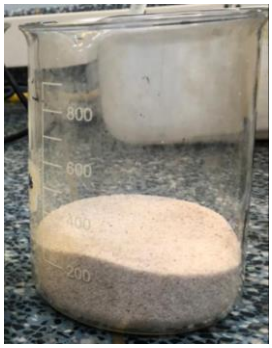


Figura 18. Partículas hidrófobas de la arena. Fuente, (Tolosa,Marín y Jaramillo, 2018).

Para la utilización de la arena como lecho se requirió realizar un pretratamiento el cual consistió en el lavado del material solo con agua, alrededor de tres veces hasta que esta quedara completamente sin color proveniente de la arena, así mismo pasó por un sistema de secado en el horno a 105 °C por 24 ver tabla 5.

Tabla 5
Pretratamiento de la Arena.

1.Selección de la Arena	2.Lavado de material
	

Fuente, (Autores, 2020).

8.2.2 Fase de configuración del sistema.

8.2.2.1 Prueba preliminar de los lechos filtrantes.

Se realizó una prueba preliminar para revisar la capacidad de adsorción de los lechos filtrantes, para ello se hizo una adaptación de la norma ASTM F726-99: Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents en su apartado Dynamic Degradation Test, teniendo en cuenta que el objetivo principal de esta prueba es el de determinar la capacidad de retención de contaminantes de un material adsorbente y sus propiedades hidrofóbicas bajo condiciones dinámicas.

Para llevar a cabo estos experimentos el procedimiento consistió en agregar 50 ml de la muestra de agua a un vaso precipitado de 100 ml de capacidad y adicionar la cantidad 0,5 g de cada absorbente (plumas, piedra pómez, arena y bagazo de caña). El vaso fue puesto sobre un agitador a una velocidad de 100 rpm durante un periodo de 15 minutos. El contenido del vaso se filtró con el fin de evaluar los parámetros como hidrocarburos totales, y así mismo anotar las observaciones, tal como se evidencia en la figura 19.

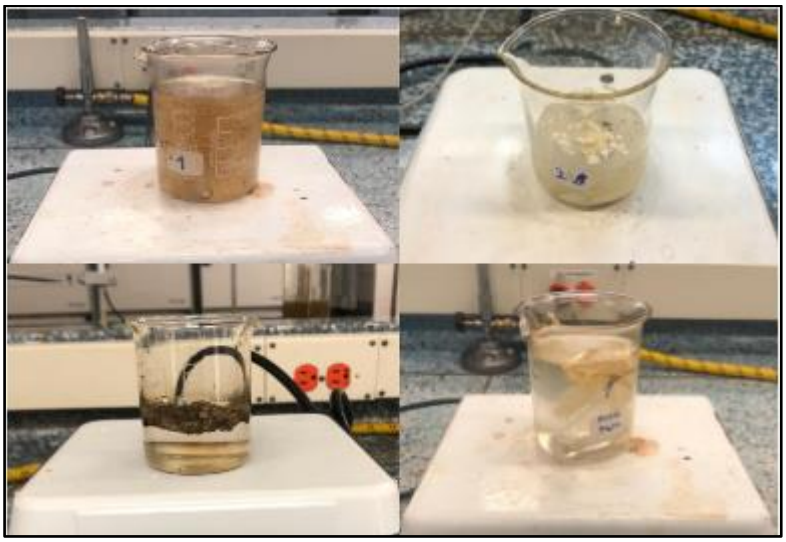


Figura 19. Prueba preliminar de los lechos filtrantes. Fuente, (Autores, 2020)

Es importante resaltar que para determinar la capacidad de retención de los hidrocarburos totales en cada absorbente, se tuvo en cuenta la siguiente ecuación 6:

$$\%CR = \frac{m_t - m_0}{m_0} x100$$

Dónde:
$\%CR$= Porcentaje de remoción.
m_t= Masa del material impregnado (peso del adsorbente e hidrocarburo sorbido).
m_0= Masa del material sorbente seco

8.2.2.2 Diseño del biofiltro

Para el sistema de biofiltración se construyó un biofiltro cilíndrico con fondo cónico, en pvc, cuyas dimensiones se diseñaron en base al estudio realizado por Cobos, Londoño y García en el 2009, donde implementaron medidas para un caudal de 550 ml, las cuales fueron modificadas para un caudal de 250 ml. La altura total del cilindro a escala de laboratorio donde se incluyen las 3 capas de absorbentes, además se tiene en cuenta la altura que ocupan los 250 ml de muestra en la ecuación 7:

$$A = \frac{a * v}{c}$$

Dónde:
A= Altura experimental (mm)

a = Altura teórica del filtro (mm)
v = Volumen de agua experimental ml
c= valor del volumen teórico

Para determinar el orden y el grosor que ocupará cada lecho filtrante se observaron las características físicas de cada material, y basados en los resultados de los parámetros medidos anteriormente se realizaron una pruebas experimentales que permitieran seleccionar el orden y tamaño que ocupará cada adsorbente como se muestra en la figura 20.

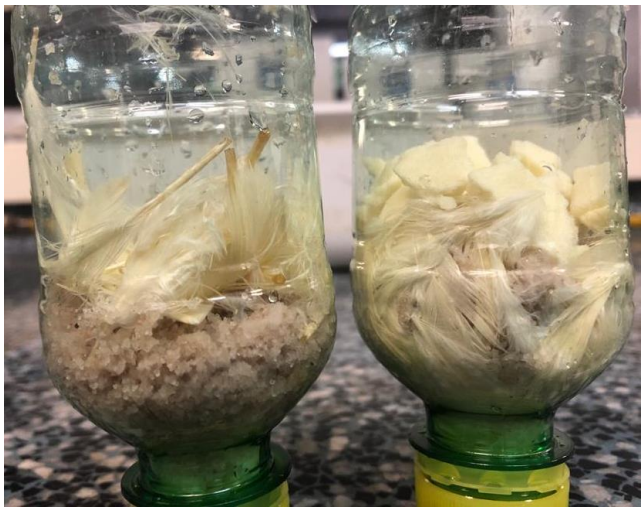


Figura 20. Prueba preliminar de orden de los lechos filtrantes. Fuente, (Autores, 2020)

Llevando a cabo la ecuación 7 se planteó el diseño, el cual cuenta con las dimensiones altura y diámetro, así mismo se muestra la medida para el espacio se rebose, el tamaño donde estará el agua que va entrando al biofiltro y finalmente la zona donde estarán dispuestas las capas de adsorbentes como se muestra en la figura 21.

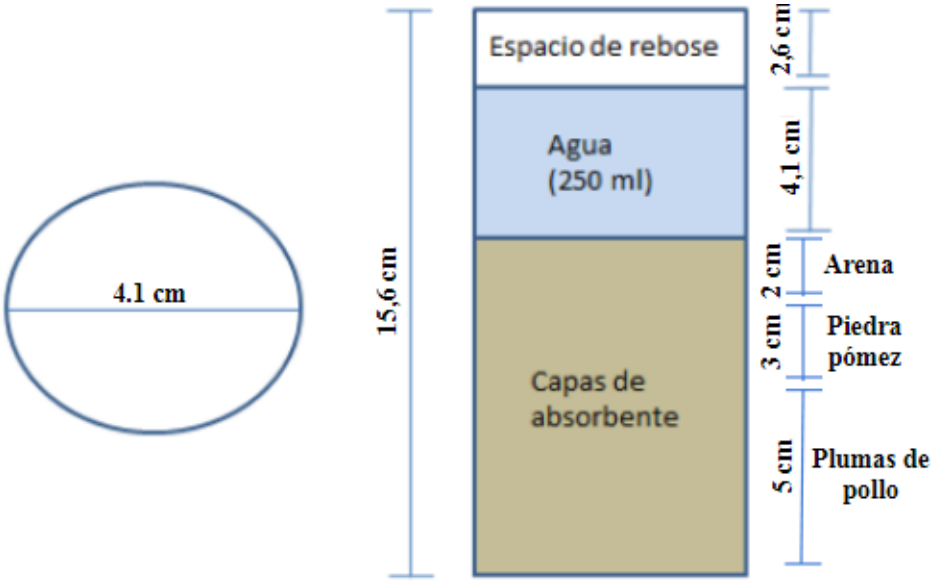


Figura 21. Dimensiones del biofiltro. Fuente, (Autores, 2020)

8.2.2.3 Operación del sistema.

Para estudiar la capacidad de adsorción de biofiltro, se planteó un diseño multifactorial de 3 cargas (alta, media y baja) basado en pruebas experimentales, se hicieron dos repeticiones por cada carga con el efluente agitado y otra sin agitar. Las cargas utilizadas se llevaron a 5, 25 y 40 rpm con la bomba peristáltica generando una variación en el caudal, pero manteniendo un volumen total de 600 ml de agua de producción, se tomaron muestras del efluente a intervalos de 20 min para carga baja, 5 min para carga media y 1,30 min para carga alta con el fin de obtener 6 datos hidrocarburos totales y otros parámetros de cada uno de los procesos, a los cuales se les realizó las ecuaciones 3, 5 y 6.

Es importante resaltar que para la selección de los parámetros se tuvieron en cuenta dos factores, primero que el parámetro afectará directamente la calidad del agua y que se considerara una variable significativa en la afectación del recurso por el vertimiento de aguas de producción, los cuales fueron: pH, turbidez, salinidad práctica, salinidad teórica, resistividad, sólidos disueltos totales, nitratos y el más relevante hidrocarburos totales. Para la obtención de la completa de los datos se llevaron a cabo diferentes procesos matemáticos y estadísticos como inter y extrapolaciones con el fin de lograr la totalidad de los valores de hidrocarburos debido a causas externas que impidieron continuar con la toma de los datos, por lo cual algunos de los valores de carga media y alta se les aplicó este proceso de estimación matemática.

Durante el desarrollo de este objetivo se tuvieron en cuenta por cada fase las diferentes actividades, los métodos, técnicas e instrumentos que permitieron analizar de manera más detallada y precisa todos los aspectos importantes para la ejecución del mismo. Tal como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6.
Descripción de las fases con sus diferentes actividades del objetivo 2.

Objetivo General	Objetivos Específicos	Fases	Actividades	Métodos	Técnicas	Instrumentos
Análisis del desempeño de un biofiltro a base del residuo cascarilla de cacao para el tratamiento de aguas de producción petroleras ubicadas en el sector de caño limón(Empresa Petrolima).	Diseñar una estrategia para el tratamiento del agua de producción con los materiales soporte bajo diferentes configuraciones de carga para emplear en el biofiltro.	Evaluación de pretratamiento del material soporte.	Análisis y revisión bibliográfica de los procesos y tratamientos para el manejo de las aguas de producción empleados en estudios y empresas extractoras.	Método analitico inductivo	Recolección de datos y análisis de contenido	Bases de datos , libros, artículos científicos, tesis.etc.
			Selección del material que constituirá el biofiltro, teniendo en cuenta tanto el desempeño obtenido en los otros estudios, como el tipo de hidrocarburo y agua de producción obtenida.	Método analitico inductivo		Bases de datos , libros, artículos científicos, tesis.etc.
			Determinar la eficiencia de remoción de los lechos para disminuir hidrocarburos totales del agua de producción	Método Empririco y Método Analítico-sintetico.	Observación científica y estructurada, recolección de información.	Norma ASTM F 726-99 y Standard Test Method
		Configuración del sistema(diseño)	Búsqueda y selección de metodologías para tener en cuenta los requerimientos para el diseño y construcción del biofiltro.		Recolección de datos y análisis de contenido	Norma ASTM F 726-99: Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents en su apartado Dynamic Degradation Test, ibros, artículos científicos, tesis.etc.
			Desarrollo de bosquejo o dibujo, ecuaciones y criterios para llevar a cabo el diseño			Paint 3D RAS, libros, artículos científicos, tesis.etc
			Implementar el tratamiento según metodologías estándar para la preparación indicada del bagazo de caña, piedra pomez, arena y plumas.		Tecnica experimental	Lechos filtrates, elementos de medición, equipos e instrumentos de laboratorio.
			Diseñar y fabricar planta de tratamiento con el biofiltro incluido.			Biofiltro, elementos de medición, equipos e instrumentos de laboratorio.
		Operación del sistema	Prueba de funcionamiento del biofiltro.			
			Operación del sistema a diferentes caudales(medio,alto y bajo).			

Fuente, (Autores, 2020)

8.3. Objetivo específico 3:

Establecer la eficiencia del sistema de tratamiento en el mejoramiento de la calidad del agua estudiada.

Para el desarrollo del objetivo, se aplicó la fase 7 con respecto a los resultados obtenidos en la fase 6, de tal manera que a través de diferentes actividades se pudieran analizar las variables y los datos obtenido como se muestra en la figura 22..

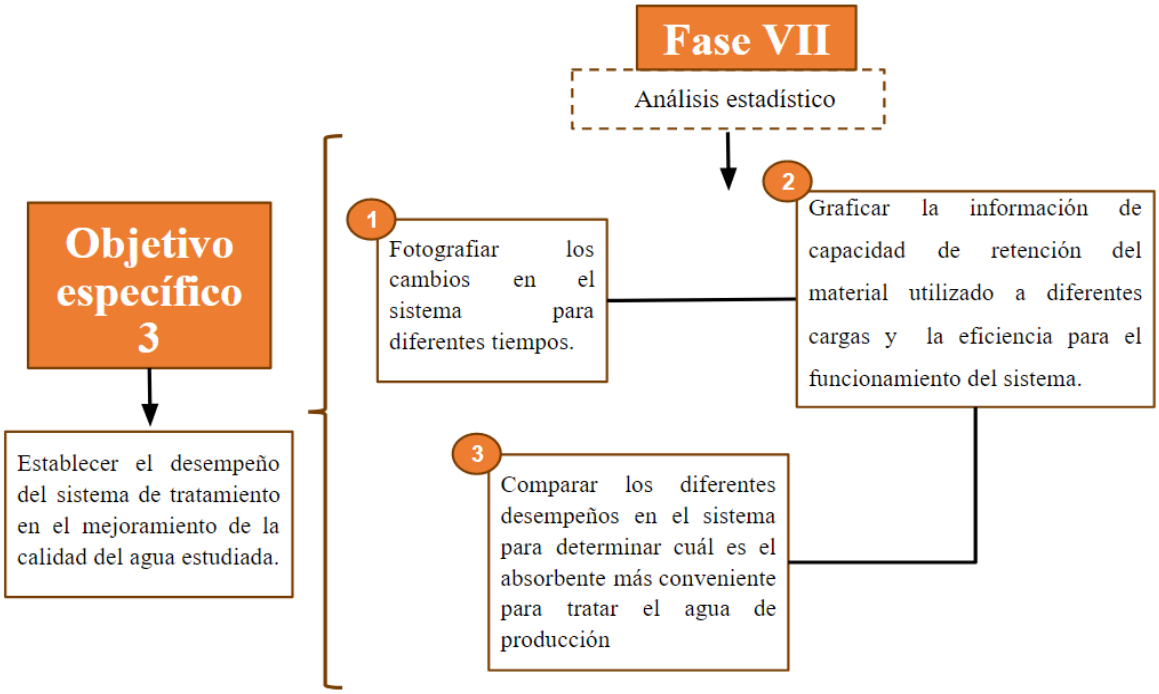


Figura 22. Diagrama actividades objetivo 3. Fuente, (Autores, 2020*)*

Fase de análisis estadístico.

Para construir las curvas se tuvo en cuenta la concentración del adsorbato (hidrocarburo) en función del tiempo de operación, de tal manera que se pudo analizar la variación en la presencia del contaminante, tanto cualitativo como cuantitativo. El procesamiento estadístico de los datos se realizó con el software MINITAB, obteniendo el análisis de varianza (ANOVA) el cual se llevó a cabo con el fin de comparar las diferencias y similitudes entre los procesos con agitación y sin agitación, y de la misma relacionar los demás parámetros en función del tiempo, cabe mencionar que los gráficos indicaron cuáles fueron los efectos significativos entre factores. Además la metodología mencionada anteriormente facilitó la selección de carga que maximiza la capacidad de adsorción y el tiempo de operación del lecho.

Para llevar a cabo el desarrollo del objetivo 3 se tuvieron en cuenta por cada fase las diferentes actividades, métodos, técnicas e instrumentos que permitieron analizar de manera más detallada y precisa todos los aspectos importantes para la ejecución del mismo.

Tabla 4.
Descripción de las fases con sus diferentes actividades del objetivo 3.

Objetivo General	Objetivos Específicos	Fases	Actividades	Métodos	Técnicas	Instrumentos
Análisis del desempeño de un biofiltro a base del residuo cascarilla de cacao para el tratamiento de aguas de producción petroleras ubicadas en el sector de caño limón(Empresa Petrolima).	Establecer el desempeño del sistema de tratamiento en el mejoramiento de la calidad del agua estudiada.	Cálculos teóricos y análisis estadístico	Fotografiar los cambios en el sistema para diferentes tiempos.	Método Analítico	Tecnica de observación deductiva directa e indirecta.	Equipos de laboratorio y cámara fotográfica.
			Basados en la fase de operación determinar por medio de cálculos la capacidad de retención del material utilizado y a su vez el tiempo óptimo de retención		Cálculos matemáticos, tecnicas de observación y medición.	Norma ASTM F 726-99: Standard Test
			Graficar la información de capacidad de retención del material utilizado a diferentes cargas y la eficiencia para el funcionamiento del sistema.	Método Inductivo Analítico	Recolección de datos y análisis de contenido	Instrumentos de medición, matrices, instrumentos estadisticos.
			Comparar los diferentes desempeños en el sistema para determinar cuál es el absorbente más conveniente para tratar el agua de producción			RAS y resolución 631 de 2015

Fuente. (Autores, 2020)

8.4. Objetivo específico 4:

Proponer una alternativa sustentable para el sector productivo con base a los resultados obtenidos.

Con el fin de ver la aplicabilidad del sistemas experimental propuesto anteriormente al proceso productivo de la empresa Petrolima, se desarrolló la fase 8 (diseño de un sistema escaldo), los datos de caudal y volumen diario del agua de producción utilizados fueron un promedio, del valor aproximado brindado por el personal de la empresa y un valor proyectado por referentes bibliográficos, así mismo con los datos obtenidos se determinó el posible uso que se le puede dar al agua después de pasar por el proceso de biofiltración. En la figura 23 se puede observar las diferentes actividades para desarrollar este objetivo.

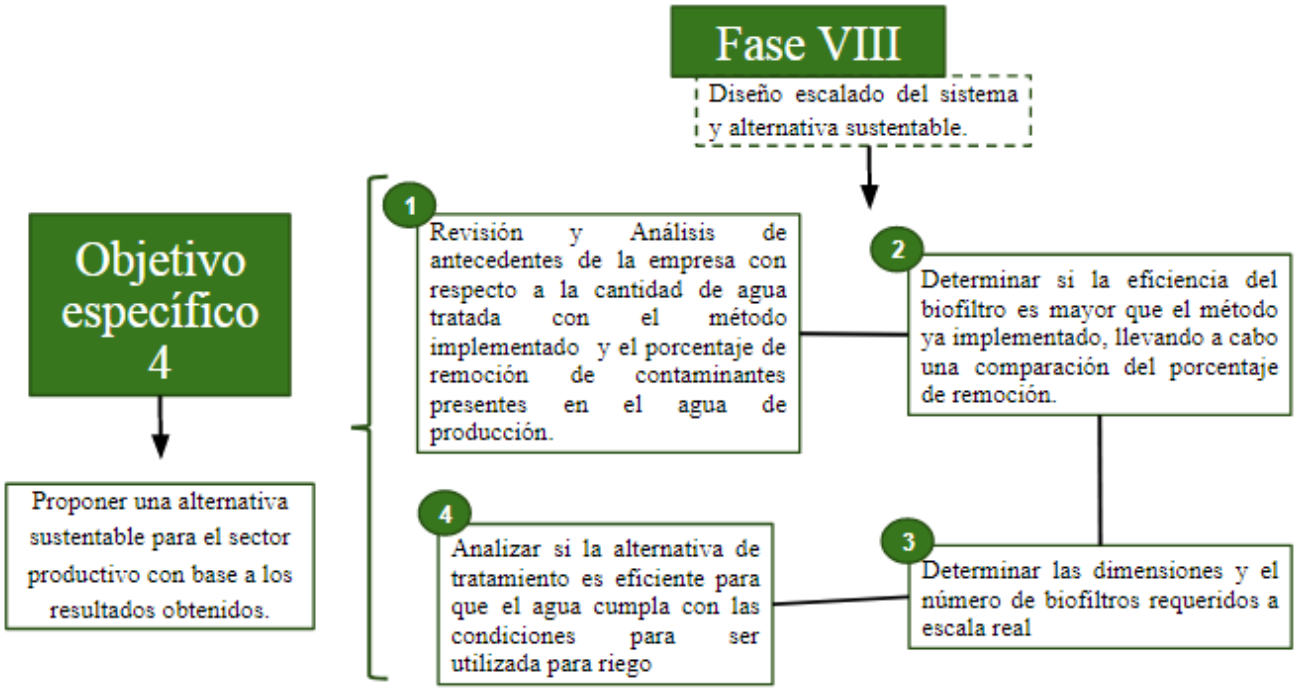


Figura 23. Metodología para determinación de hidrocarburos. Fuente, (Autores, 2020).

Diseño escalado del sistema y alternativa sustentable:

Para el sistema escalado de biofiltración se diseñó un biofiltro teniendo en cuenta los criterios y condiciones realizados en la planta de inyección de agua de Ecopetrol 2010 en el Alto Magdalena, donde establecieron medidas para un caudal de 101800 barriles al día, modificándolo por el valor de generación de agua de producción en Petrolima que es de 178133 barriles diarios, usando la ecuación 7 para la obtención de todas las dimensiones y así mismo del número de filtros requerido en la empresa por medio de la siguiente ecuación 8.

$$N = 0{,}044 * \sqrt{Q}$$

Donde

N = Número de filtros

Q = *Caudal* $(\frac{m^3}{día})$

Basados en los valores obtenidos para el diseño del modelo, se utilizó el programa blender 2,8 con el fin de realizar una aproximación del modelo a gran escala. Finalmente se hizo una revisión de los datos obtenidos respecto a la resolución 1207 de 2014, por el cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.

Para el desarrollo del objetivo 4 se tuvieron en cuenta por cada fase las diferentes actividades, métodos, técnicas e instrumentos que permitieron analizar de manera más detallada y precisa todos los aspectos importantes para la ejecución del mismo (Ver tabla 8).

Tabla 8.

Descripción de las fases con sus diferentes actividades del objetivo 4.

Objetivo General	Objetivos Específicos	Fases	Actividades	Métodos	Técnicas	Instrumentos
Análisis del desempeño de un biofiltro a base del residuo cascarilla de cacao para el tratamiento de aguas de producción petroleras ubicadas en el sector de caño limón(Empresa Petrolima).	Evaluar la alternativa experimentada como un mecanismo de gestión ambiental sustentable para un proyecto a gran escala.	Diseño escalado del sistema..	Análisis de antecedentes de la empresa con respecto a la cantidad de agua tratada con el método implementado y el porcentaje de remoción de contaminantes presentes en el agua de producción.	Método Inductivo-Analítico	Tecnica de observación deductiva directa e indirecta, recolección de datos y análisis de contenido	Instrumentos de diseño y modelación.
			Determinar si la eficiencia del biofiltro es mayor que el método ya implementado, llevando a cabo una comparación del porcentaje de remoción.			
			Evaluar costos comparando los método implementado al experimentado, para un posterior análisis de rentabilidad económica.	Método Inductivo-Analítico	Cálculos matemáticos, tecnicas de observación y medición.	Instrumentos de medición, instrumentos estadisticos.
			Determinar la eficiencia tanto económica como funcional del biofiltro dentro de la empresa.			

Fuente. (Autores, 2020)

9. Análisis y resultados

9.1 Objetivo 1:

Determinar las características fisicoquímicas en muestras de aguas de producción petrolera colectadas en el pozo Caño Lima.

Caracterización fisicoquímica del agua de producción (Muestra):

La determinación de las características fisicoquímicas de la muestra permitieron inferir cómo se encontraba la calidad del agua, con base a la normativa vigente nacional (resolución 631 de 2015) y la normativa internacional (EPA) como un referente ideal, para consolidar la información y determinar cuáles de los resultados de cada parámetro requerían una mayor atención y un mejor tratamiento. Cabe mencionar que de las tres repeticiones mencionadas en la metodología, se utilizó como valor final el promedio de cada prueba.

A través de los datos obtenidos en la tabla 9 se denotan los valores que superan el límite de la normativa colombiana o que se pueden referenciar mediante la normativa internacional como la turbidez, sólidos suspendidos, DQO, DBO e hidrocarburos totales, aquellos parámetros reflejan la magnitud de carga contaminante y las graves problemáticas que generan las aguas residuales de producción para el medio ambiente debido a la toxicidad.(Florida 2019 y Bravo, 2007).

Tabla 9.
Promedios y desviaciones estándar de parámetros para la muestra problema.

Parámetros fisicoquímicos	Valor muestra	Unidades	Valor máximo permisible	
			Normativa Nacional	Normativa Internacional
			Resolución 631 de 2015	EPA
Conductividad	298,63 +/- 30,62	µS/cm	N.R	1000
Salinidad	0,1817 +/- 0,014	PSU	N.R	12-38%
Salinidad NaCl	0,1518 +/- 0,014	PSU	N.R	N.R
Resistividad	3,2643 +/- 0,288	Ω·m	N.R	N.R
Sólidos Totales	0,0006 +/-	mg/L	N.R	N.R
Sólidos Disueltos	155,3667 +/- 12,86	mg/L	N.R	N.R
Alcalinidad	100,4667 +/- 0,411	mg/L	Análisis y reporte	N.R
Color Aparente	676,66 +/- 20,997	UPC	Análisis y reporte	N.R

Color Real	475,33 +/- 68,78	UPC	Análisis y reporte	20 mg/l Pt/Co
Turbidez	64,2333 +/- 1,922	NTU	N.R	1
Sólidos Suspendidos	371,3	mg/L	50	N.R
pH	6,27 +/- 0,070		6-9	6,5 - 8,5
DQO	381 +/- 120,841	mg/L	180	40
DBO	27	mg/L	60	5-7
Hidrocarburos totales	7,7933 +/- 5,034	mg/L	10	0,01- 1
Cloruros	4,4967 +/- 1, 459	mg/L	1200	250
Sulfatos	0,2057	mg/L	300	N.R
Nitratos	0,2807 +/-0,005	mg/L	Análisis y reporte	<=0.03

Fuente. (Autores, 2020)

El valor de la DQO es elevada en comparación con las normativas y esto se debe a la presencia de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos presentes en el agua de producción, aunque las piscinas de oxidación reducen la DQO, el mal manejo de estas técnicas han hecho que se generen desbordamientos e incluso vertimientos inadecuados a los afluentes, produciendo así la eutrofización por el agotamiento del oxígeno y por ende la pérdida de la vida animal (Jaimes y Pico, 2009).

En cuanto a la DBO es importante para determinar la contaminación biológica del agua (Sánchez, 1994), y aunque cumple con la normativa nacional, sería ideal lograr un acercamiento al valor estándar propuesto por la EPA. Según Casanova et al.,2008, es posible clasificar el agua según la concentración de DBO, basado en los datos obtenidos la muestra de agua es considerada medianamente contaminada, siendo un factor aceptable para la calidad del agua como se ve en la tabla 10, por ende se evidenció una baja probabilidad de producir efectos adversos en la salud de la población por consumo directo o indirecto del agua.

Tabla 10.
Rangos de calidad del agua según DBO

Variable	Rango(mg/L)
Excelente (No Contaminada)	<= 3
Buena Calidad (Baja materia orgánica)	3 < DBO < 6
Aceptable (Agua Medianamente Contaminada)	6 < DBO < 30
Agua Contaminada	30 < DBO < 120
Fuertemente Contaminada	DBO > 120

Fuente. (Casanova et al, 2008).

Sin embargo por medio de la relación DBO/DQO se pudo observar que este vínculo es inferior a 0,3 con un valor de 0,07 (ver tabla 11) lo cual hace referencia a vertidos de procedencia industrial tal como lo es la industria petrolera (Gerencia de calidad del agua, 2019), estos residuos tienden a no ser biodegradables y por ello se recomiendan tratamientos químicos para depurarlas y prevenir impactos mayores al ambiente.

Tabla 11
Criterios de biodegradabilidad según la relación $\boldsymbol{DBO_5/DQO}$

Variable DBO 5/DQO	Carácter
Muy Biodegradable	>0,8
Biodegradable	0,7- 0,8
Poco Biodegradable	0,3- 0,7
No Biodegradable	<0,3

Fuente. (*Gerencia de calidad del agua, 2019*)

En cuanto a los sólidos suspendidos el valor es considerablemente alto en comparación a la resolución 631 del 2015 y a la tabla 12 donde se muestra que el el valor obtenido se clasifica dentro de un agua contaminada indicando así la mala calidad, lo que se debe posiblemente a la presencia de arenas y limos obtenidas durante el proceso de extracción del crudo y así mismo la presencia de partículas pequeñas de crudo sostenidas y también emulsificadas (De Turris, et al, 2011). Este parámetro incide además en el incremento del valor de la turbidez porque los sólidos hacen que el recurso pierda su transparencia, así mismo cuando el agua de producción es vertida con estas cantidades de sólidos como arenas puede causar obstrucción de bronquios de los peces, y se puede generar toxicidad en animales y plantas por hidrocarburos y otras sustancias (González, 2011).

Tabla 12
Rangos de calidad del agua según Sólidos Suspendidos Totales

Variable	Rango
Excelente	SST <= 25
Buena Calidad	25< SST <= 75
Aceptable	75< SST <= 150
Contaminada	150 < SST <= 400
Fuertemente Contaminada	SST > 400

Fuente. (Gerencia de calidad del agua, 2019)

Los hidrocarburos determinados en la muestra están dentro del máximo permitido por la norma nacional pero lo ideal sería lograr un mejor rendimiento en el tratamiento de tal manera que se cumpla el estándar internacional, esto debido a que las afectaciones ambientales son altas, porque se forma en la superficie una capa de hidrocarburos flotantes los cuales evitan el paso de la luz y el intercambio de gases, otros se van al fondo como sedimentos y otros compuestos tóxicos derivados de los hidrocarburos se disuelven (ATSDR, 1999).

La agencia de protección ambiental EPA establece que algunas de las causas generadas por la presencia de Hidrocarburos totales en el agua es interferencia con procesos vitales como la transferencia de oxígeno del aire al agua (esencial en la regeneración de ríos), el deterioro de fauna y flora, afectaciones a la salud humana, problemas de olor y sabor, entre otras. Y aunque la cantidad de hidrocarburos totales presentes en la muestra es de solo 7 ppm, es necesario tener en cuenta que en este compuesto se encuentran derivados tóxicos del petróleo como benceno, tolueno, xileno, naftalenos, fenantrenos y dibenzotiofenos, y por otra parte al dimensionar aquellos residuos en el caudal diario (178.133 barriles al día) del pozo Caño Lima el impacto ambiental es aún mayor, pues la magnitud de la carga contaminante del agua de producción también se ve reflejada en la alteración de otros parámetros como son: relación DBO/DQO, sólidos suspendidos totales, nitrógeno y fósforo total y en la alta toxicidad de este (Bravo, 2007)

Cabe mencionar que algunos de los parámetros estudiados en el laboratorio no cuentan con análisis y reporte en la resolución lo que equivale a que el aspecto analizado no es un requisito, a pesar de tener una implicación indirecta en la calidad del agua, pero de igual manera se considero que es importante su reporte.

9.2. Objetivo 2:

Diseñar una estrategia para el tratamiento del agua de producción con los materiales soporte bajo diferentes configuraciones de carga para emplear en el biofiltro.

9.2.1. Pruebas de desempeño de los adsorbentes.

Tal como se expone en la metodología en base a las características ideales para este tipo de agua residual se seleccionaron los lechos, teniendo como uno de los principales factores sus propiedades físicas y atributos de filtración, no obstante para eliminar impurezas o partículas que alteran el funcionamiento de los absorbentes se les hizo el pretratamiento ya mencionado. Con base a la literatura se observaron los diferentes parámetros físicos del material como un preámbulo del comportamiento que tuvo el adsorbente con las aguas de producción y así por medio de los valores experimentales obtenidos se corroboró el buen desempeño de cada uno de los materiales.

9.2.1.1 Plumas de pollo:

Las Plumas de pollo contienen diferentes propiedades físicas que facilitan la capacidad de retención de contaminantes, según Lauria (2013) las características fundamentales de la pluma de pollo son las mencionadas en la tabla 13.

Tabla 13
Parámetros físicos de las plumas de pollo.

Parámetro	Literatura	Parámetro	Literatura
Humedad (%)	67,7	Densidad Real (g/cm3)	1,46
Densidad Aparente (g/cm3)	0,054	Porosidad (% vol)	96,3
Capacidad de aireación (% vol)	85,2	Capacidad de retención total de agua (g/l material)	111
Flotabilidad	Si		

Fuente. (Lauria, 2013)

Para la implementación de las plumas de pollo como lecho en el biofiltro se llevó a cabo una prueba preliminar que permitió las observación de la remoción del hidrocarburo como se evidencia en la figura 23, la prueba consistió en la agitación del lecho con 50 ml de agua de producción por un tiempo determinado de 15 minutos a 100 rpm, esto facilitó una muestra homogeneizada y una adsorción del contaminante lo cual se observa en la figura 24 con el cambio de color presentando una eliminación de las grasas y aceites, uno de los factores más significativos de la prueba fue la adherencia del crudo en los vexilos de las plumas.

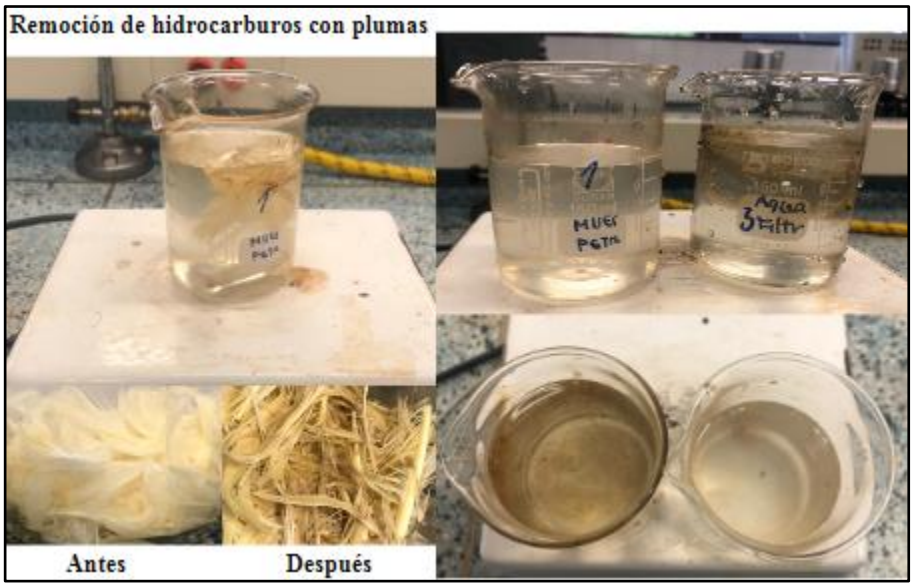


Figura 24. Remoción de hidrocarburos con plumas de pollo. Fuente,(Autores, 2020).

Con el proceso que se llevó a cabo para la remoción de contaminantes del agua por medio de la adsorción con las plumas, se obtuvieron los resultados de los parámetros plasmados en la tabla 14, donde se evidencia un cambio notorio en la mayoría de los valores con relación a la muestra inicial (tabla 9), logrando bajar la presencia de sólidos y por ende tener una disminución en la turbidez del 75%, además una reducción total de nitratos y un porcentaje de remoción del 99% de hidrocarburos totales, de igual forma estos resultados permitieron confirmar que el uso del material para remover sustancias químicas presentes en el agua es eficiente, gracias a que como se menciona en la tabla 13 arriba es un lecho altamente poroso (96,3%) y además el alto contenido de queratina que presentan las plumas y a la red tridimensional de cadenas polipeptídicas que se forman por la presencia de cisteína se genera una gran rigidez en la estructura del adsorbente, permitiéndole mejorar la capacidad para retener contaminantes y por ende cumplir con los estándares de la norma (Gallardo, 2015).

Tabla 14
Promedios y desviaciones estándar de parámetros para el agua tratada con plumas de pollo

Parámetro	Valor promedio y desviación estándar	Parámetro	Valor promedio y desviación estándar
pH	6,53 +/- 0,133	**SDT (mg/L)**	111 +/- 12,869
Conductividad (µS/cm)	221 +/- 8,524	**Turbidez (NTU)**	16 +/- 0
Salinidad (PPT)	0,131 +/- 0,003	**Color Real (PCU)**	127 +/- 12,356
Salinidad NaCl (PPT)	0,110 +/- 0,002	**Nitratos (mg/L N-NO3)**	0 +/- 0
Resistividad (kΩ/cm)	4,4733 +/- 0,083	**Hidrocarburos totales (TPH)**	0,0533 +/- 0,019

Fuente. (Autores, 2020)

9.2.1.2. Piedra Pómez *(Pumicita)*.

Según Vélez (2019), la piedra pómez es un material altamente poroso y con diversas propiedades físicas que incrementan la capacidad de retención del adsorbato, tal como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15
Parámetros físicos de la piedra pómez.

Parámetro	Literatura	Parámetro	Literatura
Humedad (%)	65	Densidad Real (g/cm3)	0,262
Densidad Aparente (g/cm3)	0,085	Porosidad (% vol)	96,5
Flotabilidad -	Si	Capacidad de retención de agua (%)	40-50

Fuente. (Vélez, 2019)

El tratamiento por el que pasó la muestra de agua de producción fue el mismo que se llevó a cabo con las plumas pero cambiando el lecho, en la figura 25 se muestra la adsorción que tuvo el material

reteniendo las partículas de grasas y aceites en su estructura, uno de los cambios físicos más notorios fue el color del agua que incluso se ve más clara que la obtenida en el proceso con las plumas de pollo, también se observa en la parte derecha de la imagen como el hidrocarburo queda retenido en los poros que componen el material

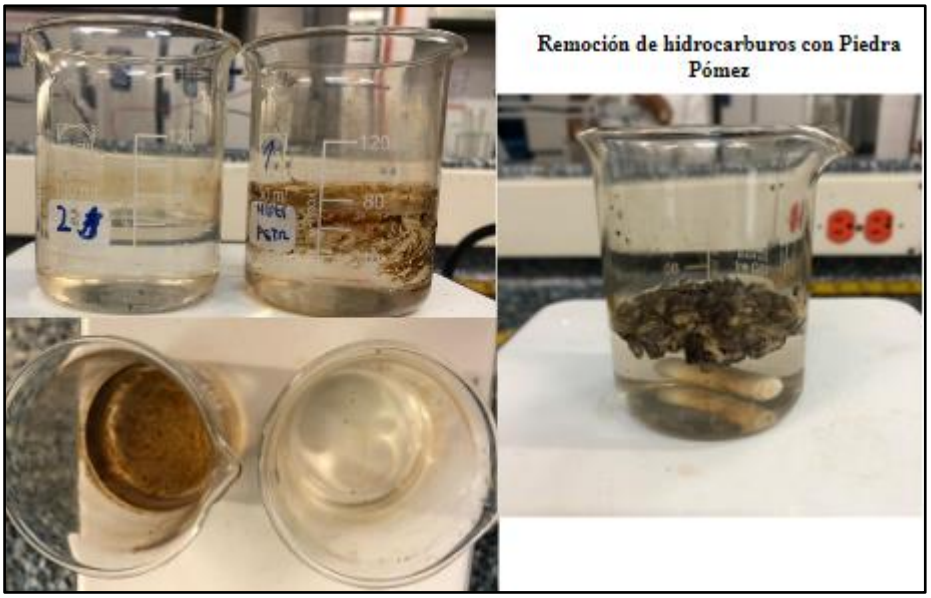


Figura 25. Remoción de hidrocarburos con Piedra Pómez. Fuentes, (Autores, 2020).

Una vez terminado el tratamiento se midieron los diferentes parámetros fisicoquímicos mostrados en la tabla 16, los cuales fueron comparados con los datos tomados inicialmente de la muestra problema plasmada en la tabla 9, donde se vió una variación representativa en los valores principalmente en la turbidez la cual se redujo hasta un 85% y esto se debe a que la presencia de sólidos y el color en el agua también bajó, los nitratos desaparecieron completamente y la presencia de hidrocarburos totales disminuyó en un 79%, demostrando la buena capacidad de adsorción de contaminantes que tiene el lecho gracias a que este material es una roca piroclástica y por ende una de sus propiedades principales es la porosidad, mencionado así mismo en la tabla 15. (Altashig & Vinicio, 2018)

Tabla 16.
Promedios y desviaciones estándar de parámetros para el agua tratada con la piedra pómez.

Parámetro	Valor promedio y desviación estándar	Parámetro	Valor promedio y desviación estándar
pH	7,18 +/- 0,257	**SDT (mg/L)**	107,33 +/- 0,943
Conductividad (µS/cm)	221,33 +/- 9,877	**Turbidez (NTU)**	9,333 +/- 2,357
Salinidad (PPT)	0,138 +/- 0,009	**Color Real (PCU)**	111 +/- 10,033

Salinidad NaCl (PPT)	0,110 +/- 0,007	**Nitratos (mg/L N-NO3)**	0 +/- 0
Resistividad (kΩ/cm)	4,53 +/- 0,232	**Hidrocarburos totales (TPH)**	1,67 +/- 0,330

Fuente. (Autores, 2020)

9.2.1.3. Arena.

Este material tiene características físicas que aumentan la superficie de contacto con el adsorbato, por ello es considerado uno de los materiales convencionales más utilizados en procesos de filtración. Algunas de las propiedades del lecho según Pire y Pereira, (2003) son las mencionadas en la tabla 17.

Tabla 17
Parámetros físicos de la arena.

Parámetro	Literatura	Parámetro	Literatura
Humedad (%)	1,6	Densidad Real (g/cm3)	2,327
Densidad Aparente (g/cm3)	1,458	Porosidad (%)	37,3
Capacidad de aireación (% vol)	4,7	Capacidad de retención de humedad (%l)	32,6
Flotabilidad	No		

Fuente. (Pire y Pereira, 2003)

Como se refleja en la figura 26 el tratamiento del agua con la arena logra reducir el porcentaje de hidrocarburos totales, ya que el tamaño de los granos y el contenido de humedad del sustrato permiten infiltrar el crudo y por tanto presenta una remoción considerable (ITOPF, 2011), no obstante a pesar de que se observa una cambio significativo en el color, también se distingue un incremento en la turbidez del agua problema por medio del color opaco.

Figura 26. Remoción de hidrocarburos con Arena. Fuente, (Autores, 2020).

Los parámetros fisicoquímicos mostrados en la tabla 18 provienen de las mediciones en la muestra para la prueba de adsorción con el soporte arena, allí se observó una variación en todos los parámetros, los cuales en su mayoría disminuyeron, exceptuando la turbidez cuyo valor se incrementó pasando de 64,23 NTU a 103,66 NTU. Sin embargo se resalta que hubo una eliminación total de nitratos y una disminución considerable de hidrocarburos totales del 74%.

Aunque según la literatura la arena cuenta con parámetros ya establecidos para su uso en procesos de filtración en el tratamiento de aguas residuales para cargas contaminantes medianas y altas. Buenfil (2009) menciona que las principales ventajas de los filtros de arena son: alta eliminación de patógenos, eliminación de turbidez, color y olor, no obstante aunque se cumplio con la reducción del valor de algunos parámetros, otros como la turbidez en lugar de disminuir aumentaron, lo se debe al incremento de las partículas en suspensión por la agitación realizada y posiblemente se presentó una falencia en el pretratamiento del lecho; cabe mencionar que no se ha utilizado este lecho para aguas de producción, sin embargo cuando se dan vertimientos en playas o costas abiertas un 10% del hidrocarburo queda infiltrado en la arena, ya que el crudo puede mezclarse con sustratos de tal manera que se infiltran naturalmente. (ITOPF, 2011).

Tabla 18.
Promedios y desviaciones estándar de parámetros para el agua tratada con arena.

Parámetro	Valor promedio y desviación estándar	Parámetro	Valor promedio y desviación estándar
pH	7,13 +/- 0,042	**SDT (mg/L)**	117 +/- 2,160

Conductividad (µS/cm)	234,67 +/- 3,091	**Turbidez (NTU)**	103, 666 +/- 9,809
Salinidad (PPT)	0,142 +/- 0,001	**Color Real (PCU)**	453,666 +/- 31,563
Salinidad NaCl (PPT)	0,115 +/- 0	**Nitratos (mg/L N-NO3)**	0 +/- 0
Resistividad (kΩ/cm)	4,27 +/- 0,048	**Hidrocarburos totales (TPH)**	1,83 +/- 0,544

Fuente. (Autoras, 2020)

9.2.1.4 Bagazo de caña.

Así como se muestra en la tabla 19 el bagazo de caña es un material bastante poroso(89,4%), influenciado por sus características físicas e hidrófobas que favorecen la retención de contaminantes, y por ende es un material usado frecuentemente en plantas de tratamiento de agua.

Tabla 19
Parámetros físicos del bagazo de caña.

Parámetro	Literatura	Parámetro	Literatura
Humedad (%)	8,9	Densidad Real (g/cm3)	0,623
Densidad Aparente (g/cm3)	0,065	Porosidad (% vol)	89,4
Porosidad de aireación (%)	47,0		
		Capacidad de retención de agua (%)	
			42,4
Flotabilidad -	Si		

Fuente. (Pire y Pereira, 2003)

Con el fin de ver la eficiencia para remover contaminantes del bagazo de caña, se desarrolló el mismo proceso que para los otros lechos, esperando que el desempeño fuese bueno debido a lo expresado en la revisión sistemática de tal, sin embargo a simple vista en la figura 27 se evidenció que el color del agua se incrementó y de igual manera se vió que las partículas más grandes de aceite se adhirieron al bagazo, mientras que las fracciones más pequeñas continuaron disueltas o flotando en el agua.

Figura 27. Remoción de hidrocarburos con Bagazo de Caña. Fuente (Autores, 2020)

Con la evaluación de los valores obtenidos de las pruebas de laboratorio plasmados en la tabla 20 se observó que la remoción de nitratos se presentó completamente y los hidrocarburos tuvieron una disminución del 17%, así mismo otros parámetros se incrementaron como el color, el cual subió a casi el doble del valor inicial de la muestra, causando junto con la alta presencia de sólidos un aumento en el valor de la turbidez.

Según (Danglad, Marfisi, Cova & Linero, 2013), en su tesis "Las partículas hidrófobas del bagazo de caña de azúcar son ideales para el tratamiento de hidrocarburos en agua, aquello debido al efecto de la granulometría de las partículas, la cantidad de agente hidrófobo y el método de operación para el contacto hidrocarburo/bagazo facilitan un buen tratamiento", no obstante a nivel experimental el porcentaje de remoción fue muy bajo frente al 93% que se esperaba en referente a la tesis de Molina, consideramos que estos resultados se pudieron ver afectados debido al pretratamiento que se le dió al lecho, ya que al triturarlo le generó una mayor presencia de material en suspensión y posiblemente no se le dió el lavado adecuado para que este no produjera color en el agua.

Tabla 20
Promedios y desviaciones estándar de parámetros para el agua tratada con Bagazo de caña.

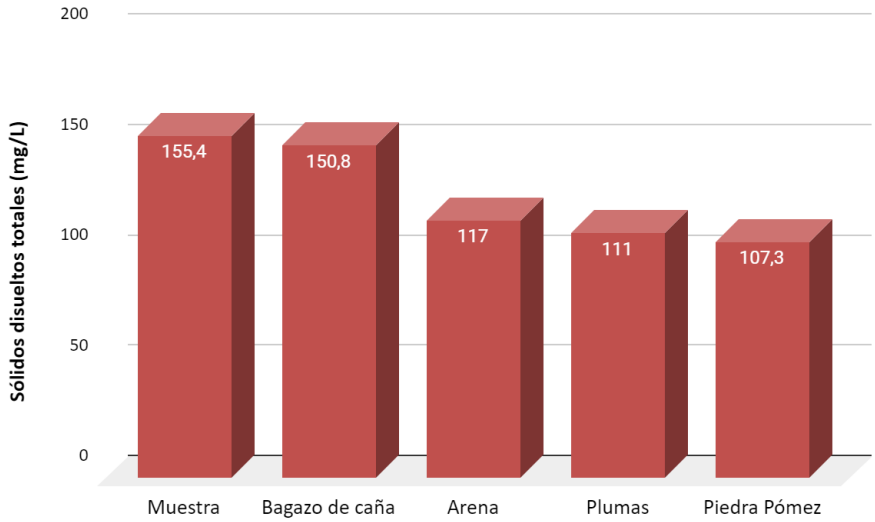
Parámetro	Valor promedio y desviación estándar	Parámetro	Valor promedio y desviación estándar
pH	6,71 +/- 0,216	**SDT (mg/L)**	159,8333 +/- 7,390
Conductividad (µS/cm)	288,00 +/- 10,231	**Turbidez (NTU)**	134,5672 +/- 0,665
Salinidad (PPT)	0,142 +/- 0,013	**Color Real (PCU)**	990 +/- 42,708
Salinidad NaCl (PPT)	0,1358 +/- 0,005	**Nitratos (mg/L N-NO3)**	0 +/- 0
Resistividad (kΩ/cm)	3,7797 +/- 0,171	**Hidrocarburos totales (TPH)**	6,4933 +/- 0,858

Fuente. (Autores, 2020)

9.2.2. Análisis comparativo del desempeño de cada uno de los absorbentes.

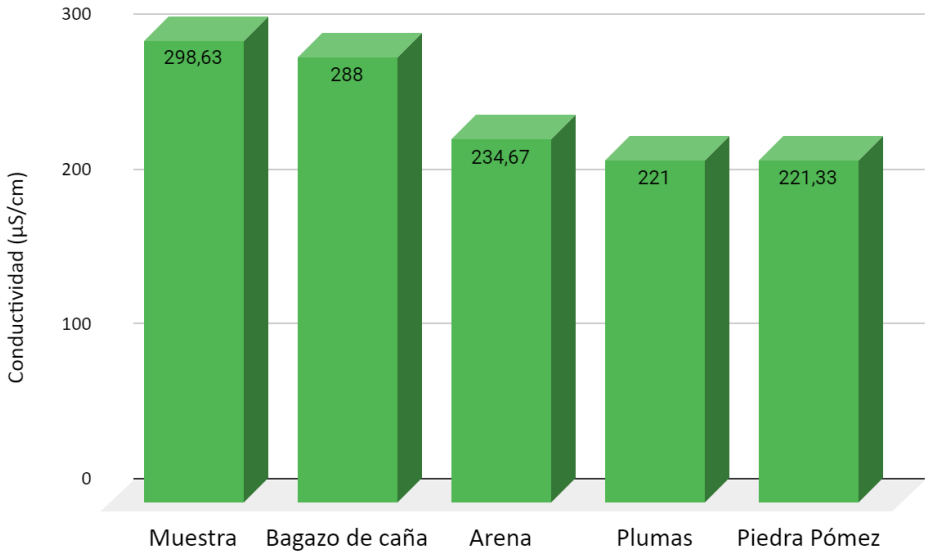
Para el análisis de los resultados obtenidos de los lechos se tuvieron en cuenta los parámetros que presentaron un cambio significativo como los nitratos y así mismo los que inciden en el incremento o disminución de otro, como son los sólidos disueltos totales y la conductividad, también se seleccionaron los valores de la turbidez debido a que este parámetro es uno de los indicadores representativos para el análisis de la calidad del agua (De Viana, 2010). Los hidrocarburos totales al ser nuestro foco del estudio para entender la capacidad de retención del filtro y la disminución del contaminante principal de un agua de producción.

Los adsorbentes que más retuvieron sólidos fueron las plumas y la piedra pómez con 29% y 31% respectivamente, además como lo menciona Vásconez (2018) en su tesis, la piedra tiene mayor retención de los sólidos por su alta porosidad en comparación con la arena, por lo cual el valor de retención fue menor con un 25%, el material de soporte que menos eficiencia tuvo para remover los partículas fue el bagazo de caña con un 2% como se evidencia en la gráfica 1.



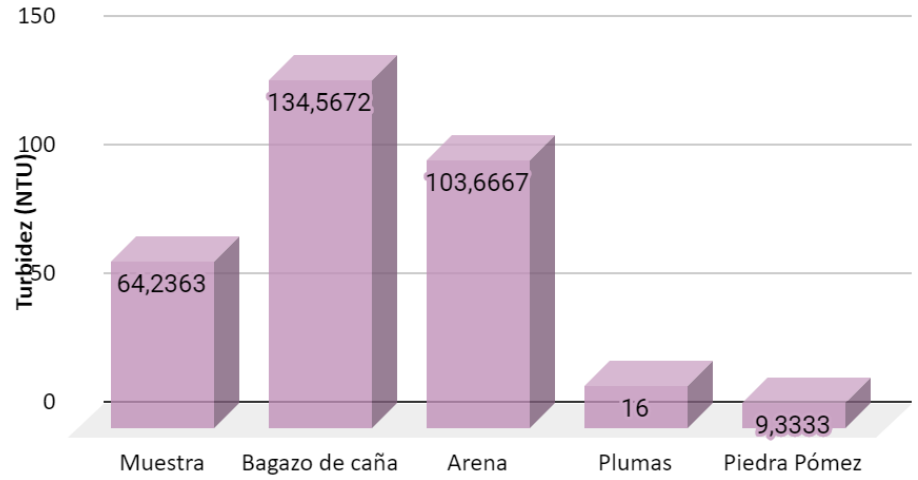
Gráfica 1 .Comparación de los sólidos disueltos totales entre la muestra y los diferentes lechos. Fuente, (Autores, 2020*)*

El valor de la conductividad se redujo en comparación con el valor inicial como se observa en la gráfica 2, donde los materiales con la mayor capacidad de reducción fueron las plumas y la piedra pómez, y esto se debe a sus propiedades fisicoquímicas como la porosidad la cual les permite la retención de iones presentes en el agua, la arena tuvo una menor remoción de sales o material que influye en la conductividad debido a que a diferencia de la piedra pómez su porosidad es mucho menor. Finalmente con el bagazo de caña no se presentó una variación tan significativa respecto a la inicial, a causa posiblemente de que la presencia de sólidos disueltos no tuvo gran disminución y la influencia de este parámetro es alta frente a la conductividad (Pazmiño, 2016).



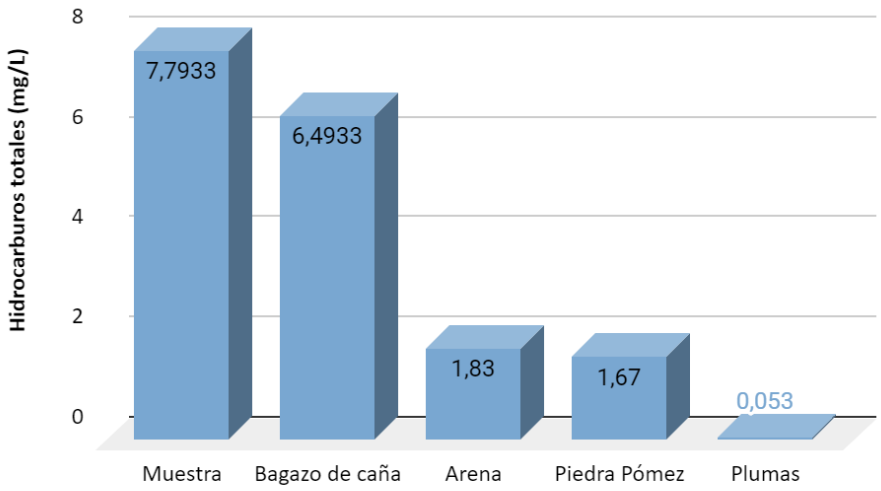
Gráfica 2 .Comparación de la conductividad entre la muestra y los diferentes lechos. Fuente, (Autores, 2020).

Con la turbidez se evidenció un comportamiento diferente en comparación con los otros parámetros puesto que el valor incrementó con algunos de los lechos como el bagazo de caña y la arena los cuales sobrepasan significativamente el valor inicial, como se mencionó anteriormente esto se pudo deber a un pretratamiento inadecuado del material generando la presencia de color al agua, a diferencia de estos adsorbentes las plumas tuvieron una disminución del 75% y la piedra pómez fue el más eficiente reduciendo hasta un 85%.(Ver gráfica 3).



Gráfica 3 .Comparación de la turbidez entre la muestra y los diferentes lechos. Fuente, (Autores, 2020).

La mayoría de los lechos poseen una alta capacidad de remoción de hidrocarburos como se evidencia en la gráfica 4, la cual muestra que el material de soporte que tiene un mayor porcentaje es el de las plumas de pollo con un 99% reduciendo el valor inicial de mg/L de hidrocarburos totales a 0,053, posterior a este material están la piedra pómez y la arena con valor muy aproximado entre los dos y así mismo una gran capacidad de absorber el contaminante con el 79% y el 76% respectivamente, finalmente se consiguió un resultado inesperado frente al bagazo de caña debido a que este material es representativo en el tratamiento de aguas residuales en especial la de producción petrolera por su alta eficiencia en la remoción de hidrocarburos, pero en este caso su porcentaje fue muy bajo en comparación con los otros adsorbentes con un 17%.



Gráfica 4 .Comparación de presencia de hidrocarburos totales entre la muestra y los diferentes lechos. Fuente, (Autores, 2020).

9.2.3. Diseño del filtro a escala del laboratorio:

Teniendo en cuenta la remoción de los contaminantes que tuvo cada uno de los materiales se seleccionaron las plumas, la arena y la piedra pómez para el diseño del filtro, excluyendo el bagazo de caña como lecho, debido a que primero no remueve una cantidad considerable de hidrocarburos y sólidos disueltos totales, y segundo incrementa otros valores como la turbidez, generando así una menor calidad del agua. En la tabla 21 se muestran las dimensiones que se obtuvieron para la fabricación del biofiltro teniendo en cuenta los criterios mencionados en la metodología.

Tabla 21
Dimensiones del biofiltros con sus respectivos lechos.

Medidas del biofiltro a escala de laboratorio	
Diámetro	5 cm
Altura	15,6 cm
Lechos	**Dimensión**
Plumas	5 cm
Piedra Pómez	3 cm
Arena	2 cm
Espacio de rebose	5,6 cm

Fuente.(Autores, 2020).

Cabe resaltar que las dimensiones que se tuvieron en cuenta para los lechos se llevaron a cabo teniendo presente los resultados de los parámetros fisicoquímicos de cada uno de los materiales y la capacidad de remoción de hidrocarburos totales de cada uno de ellos, por lo cual se propuso el siguiente orden: las plumas se pusieron en mayor cantidad por su alto desempeño para la eliminación de crudo, mientras que la piedra pómez se puso en mayor proporción que la arena como medio para reducir la turbidez del agua generada y finalmente la proporción de la arena fue suficiente para retener los sólidos disueltos que ingresaban al inicio del proceso, cabe mencionar que uno de los factores relevantes para el orden de los materiales fue la flotabilidad. Revisar figura 28.

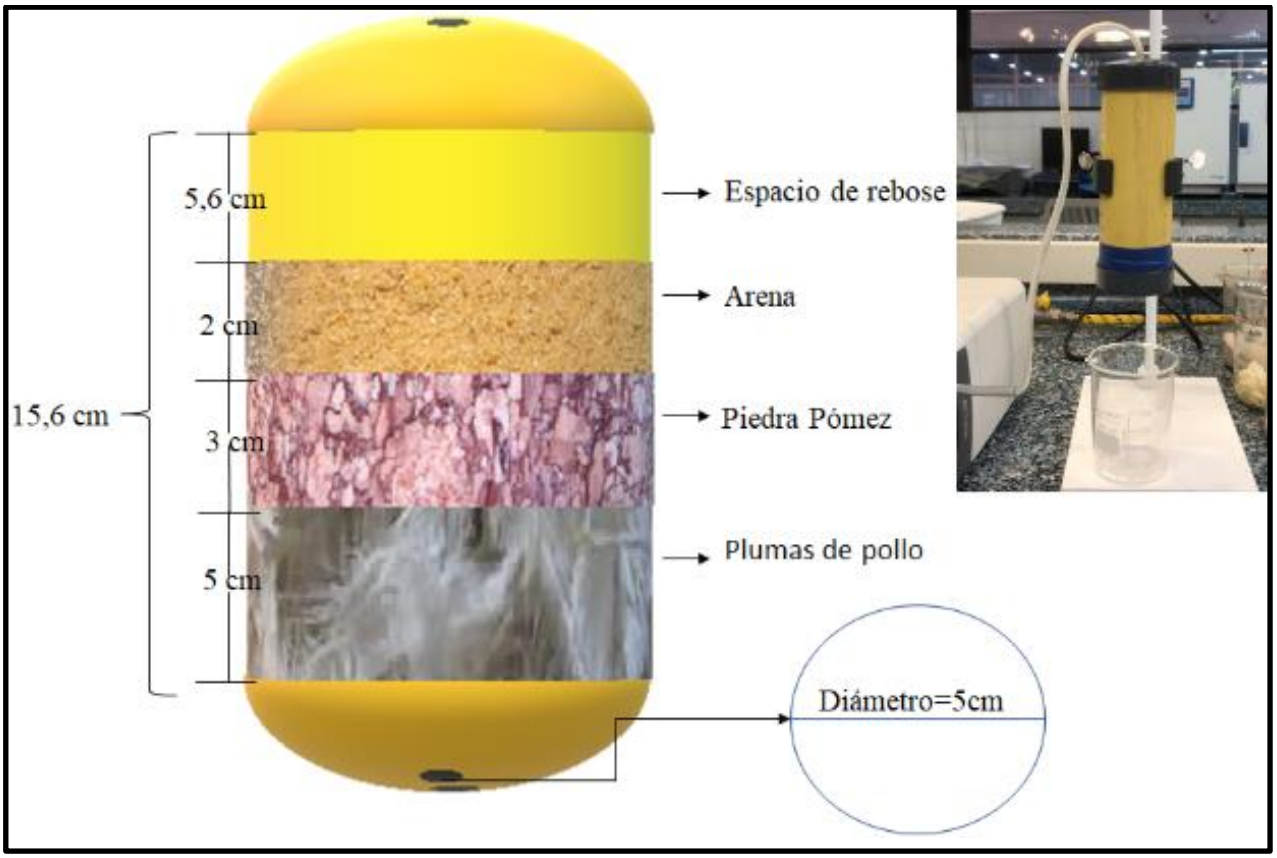


Figura 28. Dimensiones y distribución lechos del Biofiltro. Fuente, (Autores, 2020).

9.2.4. Operación del sistema.

Con base al diseño se elaboró el siguiente prototipo de sistema de filtración, biofiltro (figura 29), donde el funcionamiento del sistema fue el siguiente: el afluente (agua de producción) fue agitado por un agitador magnético que va conectado a una bomba peristáltica (Thermo Scientific FH100DX 4000ML) al biofiltro, bajo 3 caudales: 5ml/min (bajo), 30 ml/min(medio) y 77 ml/min (alto) para un volumen constante de 600ml que fue seleccionado teniendo la capacidad del filtro evaluado durante las pruebas eexperimentales.

Gran parte del aceite quedó retenido en la superficie del lecho por su afinidad hidrófoba con ésta; gradualmente el aceite fue removido y el líquido purificado a medida que fluyó a través de la columna. La corriente de salida (efluente) fue almacenada en el recipiente recolector para la medición del hidrocarburo residual.

Figura 29. Prototipo de configuración del sistema. Fuente, (Autores, 2020).

9.3 Objetivo 3:

Establecer la eficiencia del sistema de tratamiento en el mejoramiento de la calidad del agua estudiada.

9.3.1. Determinación de eficiencias.

Durante el proceso experimental se tuvieron en cuenta 3 cargas: alta, media y baja, de allí se determinó como variaba la capacidad de retención del biofiltro a lo largo de cada prueba. Cabe señalar que fundamentado en las observaciones de las pruebas preliminares del funcionamiento del biofiltro, este demostró una capacidad de caudal más alto, por ende se decidió utilizar un volumen de 600 ml de muestra, un valor más grande que el planteado inicialmente. A continuación se presenta el comportamiento que tuvo el biofiltro a diferentes velocidades de flujo al dejarlo sin agitación expresando que la muestra se encontraba en un modelo estático o con agitación para representar un modelo de distribución más homogéneo.

9.3.1.1. Determinación de eficiencia para carga baja sin agitación.

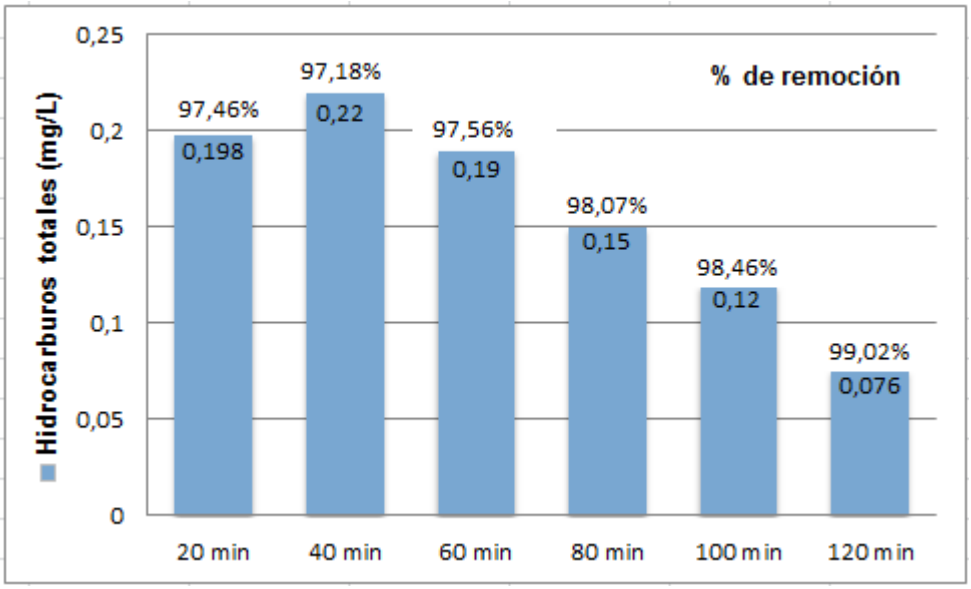
Aunque el objetivo del proyecto era reducir hidrocarburos totales, a medida que fue pasando el flujo de agua también fueron decreciendo la conductividad y los SDT, logrando modificar una conductividad de 298,63 ɲs/cm hasta un mínimo de 204 ɲs/cm y por otra parte los SDT cambiaron de 155,37 mg/L a un valor mínimo de 103 mg/L, logrando una eficiencia promedio para disminuir conductividad del 27% y para sólidos disueltos del 29%; además aunque no se muestra en la tabla, el biofiltro logró una eliminación completa de nitratos lo cual es favorable para la calidad del agua muestra.(Ver tabla 22).

Tabla 22
Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga baja sin agitación.

	1	2	3	4	5	6
Parámetro	**20 min**	**40 min**	**60 min**	**80 min**	**100 min**	**120 min**
pH	7,3	8,2	8,3	7,87	7,58	7,58
Resistividad (kΩ/cm)	3,9	4,44	4,65	4,98	4,87	4,85
Conductividad (µS/cm)	271	220	218	185	204	204
SDT (mg/L)	129	112	108	102	104	103
Salinidad (PPT)	0,161	0,139	0,135	0,124	0,129	0,13
Salinidad NaCl (PPT)	0,127	0,111	0, 106	0,11	0,101	0,102
Hidrocarburos totales (TPH)	0,198	0,22	0,12	0,19	0,15	0,076

Fuente, (Autores, 2020).

Los resultados de remoción de hidrocarburos totales tienen una tendencia a disminuir considerablemente a medida que aumenta el tiempo de retención, sin embargo en el min 40 hubo un pico de aumento con 0,22 mg/L de hidrocarburo, lo que demuestra que a pesar de que el comportamiento no fue lineal las condiciones son favorables para la retención de materia contaminante, teniendo en cuenta que la remoción promedio de hidrocarburos fue de 0,159 mg/l, se logró un porcentaje de remoción promedio de 97,96%, el tiempo en que hubo mayor reducción de hidrocarburos fue en el minuto 120 con 99,02% de remoción. Tal como se muestra en la gráfica 5.



Gráfica 5. Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga baja sin agitación. Fuente, (Autores, 2020).

9.3.1.2. Determinación de eficiencia con carga baja con agitación.

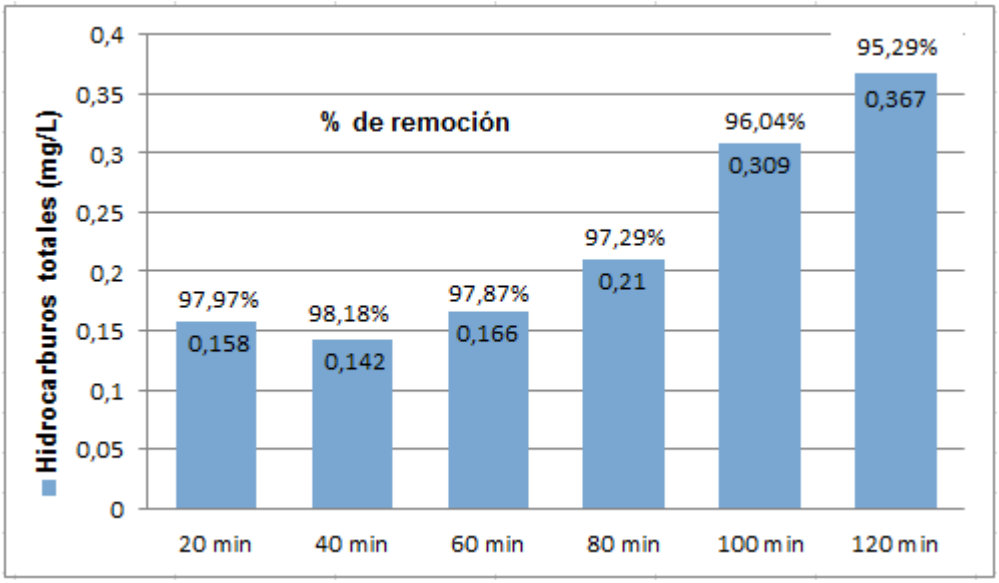
Con base a los resultados obtenidos en la tabla 23, se observa una reducción considerable de la conductividad pasando del valor inicial de 298,63 µs/cm hasta un mínimo de 150 µs/cm, al igual pasó con los SDT que pasaron de 155,37 mg/L a un valor mínimo de 71,8 mg/L logrando una eficiencia promedio para disminuir conductividad del 43% y para sólidos disueltos del 46%, para este proceso también se dio una eliminación completa de nitratos.(Ver tabla 23).

Tabla 23
Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga baja con agitación.

	1	2	3	4	5	6
Parámetro	**20 min**	**40 min**	**60 min**	**80 min**	**100 min**	**120 min**
pH	7,48	7,64	7,81	7,86	7,83	7,72
Resistividad (kΩ/cm)	4,39	5,73	6,34	6,45	6,52	6,96
Conductividad (µS/cm)	234	174	158	155	153	150
SDT (mg/L)	114	87,5	79,2	77,7	76,8	71,8
Salinidad (PPT)	0,143	0,114	0,105	0,105	0,104	0,1
Salinidad NaCl (PPT)	0,113	0,102	0,078	0,076	0,075	0,071
Hidrocarburos totales (TPH)	0,158	0,142	0,166	0,21	0,309	0,367

Fuente.(Autores, 2020).

Por otra parte tal como se muestra en la gráfica 6 el comportamiento de la gráfica cambio con respecto a la gráfica 5 donde se ve una mayor remoción a un tiempo más bajo, la remoción promedio de hidrocarburos fue del 97,12% ques es un valor considerable en la eliminación casi completa de los hidrocarburos y en mejorar la calidad del agua, también se denota que en la prueba el minuto 40 logra la mayor remoción de hidrocarburos con un 98,18%.



Gráfica 6 .Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga baja con agitación. Fuente, (Autores, 2020).

9.3.1.3. Determinación de eficiencia con carga media sin agitación.

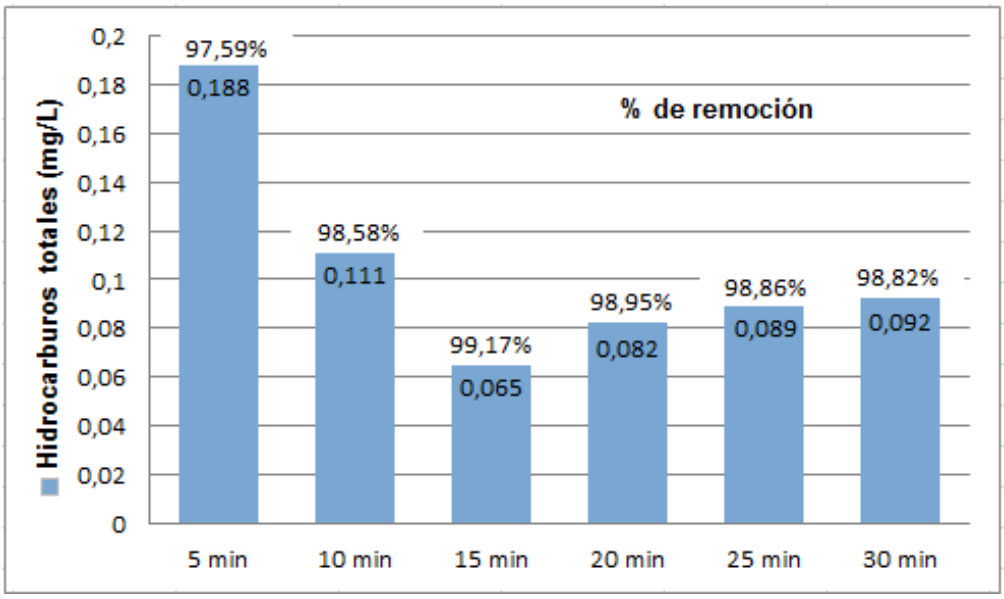
La tabla 24 plasma como al igual que en la carga baja hubo una reducción de la conductividad, transformándose de 298,63 ɲs/cm hasta un mínimo de 260 ɲs/cm, al igual pasó con los sólidos disueltos totales que pasaron de 155,37 mg/L a un valor mínimo de 129 mg/L,lo cual se evidencia en un porcentaje de remoción de 6,07% de la conductividad y de 10,86% en sólidos disueltos; en este proceso también se logró remover los nitratos en su totalidad y los otros parámetros presentaron disminución hasta el tiempo 3 y luego manifestaron un incremento en los valore.

Tabla 24.
Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga media sin agitación.

	1	2	3	4	5	6
Parámetro	**5 min**	**10 min**	**15 min**	**20 min**	**25 min**	**30 min**
pH	7,51	7,47	7,39	7,47	7,55	7,63
Salinidad (PPT)	0,175	0,17	0,165	0,164	0,163	0,16
Salinidad NaCl (PPT)	0,143	0,135	0,135	0,134	0,131	0,129
Conductividad (µS/cm)	290	287	284	282	280	260
SDT (mg/L)	148	139	137	136	142	129
Resistividad (kΩ/cm)	3,42	3,62	3,66	3,68	3,61	3,86
Hidrocarburos totales (TPH)	0,188	0,111	0,044	0,082	0,128	0,092

Fuente. (Autores, 2020).

Tal como se evidencia en la gráfica 7 la remoción de hidrocarburos fue mayor a los 15 min de comenzar la filtración con un 99,17%de eliminación de hidrocarburos, no obstante el comportamiento no oscilo demasiado y se logró un porcentaje promedio de remoción de 98,66%. lo cual es equivalente a que el proceso de filtración a esta carga es bastante eficiente.



Gráfica 7. Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga media sin agitación. Fuente, (Autores, 2020).

9.3.1.4. Determinación de eficiencia con carga media con agitación.

Los resultados obtenidos de este proceso de filtración permitieron ver la tendencia disminuir que presentan todos los parámetros, en especial como se redujo el valor inicial de conductividad a uno mínimo de 148 µs/cm y por otra parte una reducción de sólidos disueltos totales a un valor mínimo de 71,3 mg/L, logrando una eficiencia del 41,29% para la conductividad y de 44,03% para SDT, además de una remoción completa de nitratos. (Ver tabla 24).

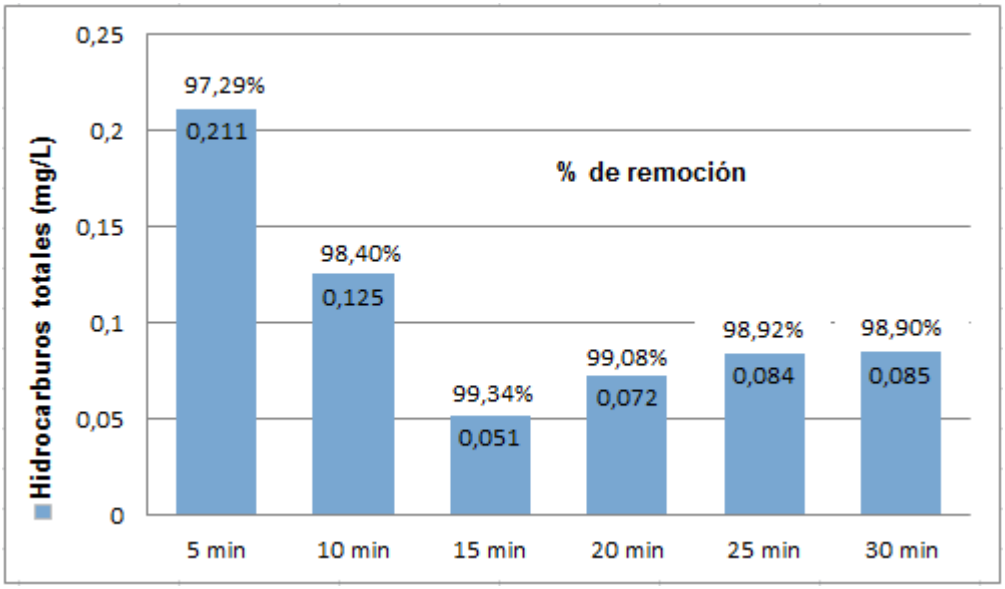
Tabla 25
Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga media con agitación.

	1	2	3	4	5	6
Parámetro	**5 min**	**10 min**	**15 min**	**20 min**	**25 min**	**30 min**
pH	7,72	7,58	7,69	7,5	7,6	7,48
Conductividad (µS/cm)	213	201	183	156	151	148
Salinidad práctica (PPT)	0,136	0,129	0,12	0,106	0,103	0,101
Salinidad NaCl (PPT)	0,104	0,0994	0,0908	0,0774	0,0744	0,0699
Resistividad (kΩ/cm)	4,81	4,97	5,42	6,37	6,59	6,7

SDT (mg/L)	104	100	92,2	78,5	75,8	71,3
Hidrocarburos totales (TPH)	0,211	0,125	0,051	0,072	0,084	0,085

Fuente.(Autores, 2020).

En cuanto a los hidrocarburos totales hubo una mayor remoción en el min 15 con un porcentaje del 99,34%, si bien es un porcentaje alto en general el promedio de remoción fue muy bueno con 98,66%, logrando una eliminación casi total, evidenciado en la gráfica 8.



Gráfica 8 .Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga media con agitación. Fuente, (Autores, 2020).

9.3.1.5. Determinación de eficiencia con carga alta sin agitación.

La eficiencia de remoción en esta carga fue buena, ejemplo de ello fue la conductividad que cambio de 298,63 µs/cm hasta un mínimo de 250 µs/cm, al igual pasó con los SDT que pasaron de 155,37 mg/L a un valor mínimo de 134 mg/L; cabe mencionar que el porcentaje promedio de remoción fue de 16,28% y de 13,75% respectivamente, de la misma manera que en todos los procesos se logró eliminar completamente los nitratos en la muestra. (Ver tabla 26).

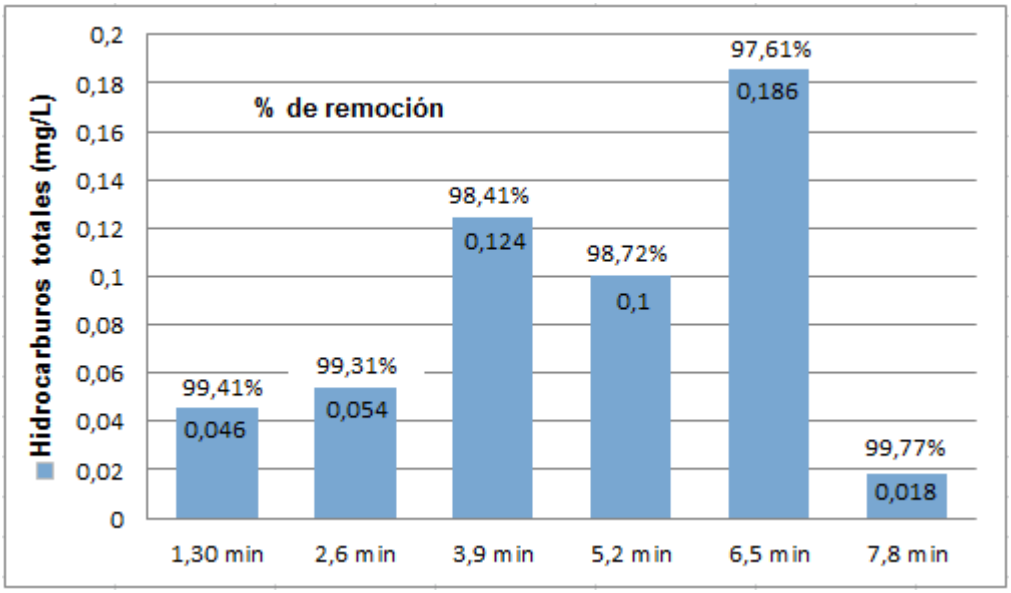
Tabla 26.
Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga alta sin agitación.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Parámetro	**1,30 min**	**2,6 min**	**3,9 min**	**5,2 min**	**6,5 min**	**7,8 min**

pH	7,64	7,61	7,53	7,46	7,42	7,34
Conductividad (µS/cm)	250	241	250	255	265	290
Salinidad práctica (PPT)	0,166	0,164	0,162	0,161	0,16	0,18
Salinidad NaCl (PPT)	0,135	0,135	0,132	0,13	0,13	0,149
Resistividad (kΩ/cm)	3,66	3,76	3,72	3,77	3,38	3,31
SDT (mg/L)	136	134	134	134	147	152
Hidrocarburos totales (TPH)	0,046	0,054	0,124	0,1	0,186	0,018

Fuente. (Autores, 2020).

En la gráfica 9 se observa un comportamiento variable de remoción a lo largo del tiempo, ya que en algunos momentos disminuye considerablemente y en otros tiempos su disminución no era muy significativo, esto se debe a que posiblemente en ese momento el filtro podría estar presentando una colmatación lo que impedía el paso del agua haciendo que el transcurso durante los lechos fuera más lento y se pudiera lograr una mayor retención del contaminante. El porcentaje de remoción tuvo una tendencia muy diferente en cada tiempo, de tal figura se destaca que en el minuto 7,8 hubo una reducción del 99,77% de hidrocarburos, y el promedio de remoción de hidrocarburos fue de 98,87%.



*Gráfica 9.*Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga alta sin agitación. Fuente, (Autores, 2020).

9.3.1.6. Determinación de eficiencia con carga alta con agitación.

Los resultados de la tabla 27 plasman una disminución considerable de la conductividad, pasando de 298,63 ɲs/cm hasta un mínimo de 221 ɲs/cm, y de igual manera con los SDT que pasaron de 155,37

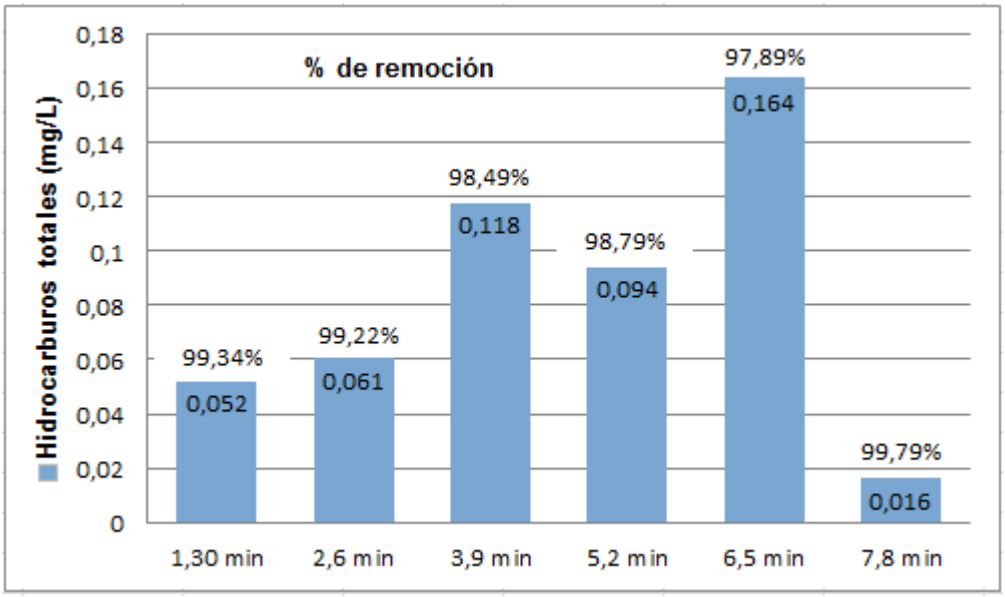
mg/L a un valor mínimo de 110 mg/L,con un promedio de remoción de conductividad del 23,26% y de SDT del 26,09%;también se continúa generando una eliminación total de nitratos.

Tabla 27.
Valores obtenido de los parámetros a tratamiento con carga alta con agitación.

	1	2	3	4	5	6
Parámetro	**1,30 min**	**2,6 min**	**3,9 min**	**5,2 min**	**6,5 min**	**7,8 min**
pH	7,53	6,38	6,39	6,38	6,13	6,69
Conductividad (µS/cm)	246	243	222	221	221	222
Salinidad práctica (PPT)	0,154	0,153	0,141	0,14	0,142	0,14
Salinidad NaCl (PPT)	0,123	0,119	0,11	0,11	0,11	0,107
Resistividad (kΩ/cm)	4,01	4,1	4,51	4,62	4,38	4,47
SDT (mg/L)	125	122	111	110	110	111
Hidrocarburos totales (TPH)	0,052	0,061	0,118	0,094	0,164	0,016

Fuente. (Autores, 2020).

Tal como se muestra en la gráfica 10 el porcentaje de remoción promedio fue bastante eficiente con un valor de 98,92% , de aquel se observa que en el minuto 7,8 fue la remoción más alta de hidrocarburos con un valor del 99,79%. Es importante mencionar el comportamiento de la curva fue muy variable, con patrones muy similar al de la carga alta sin agitación.



Gráfica 10 .Concentración y porcentaje de remoción de hidrocarburos para el tratamiento con carga alta con agitación. Fuente, (Autores, 2020).

De los resultados obtenidos se destaca que para los procesos de filtración sin agitación se generó un porcentaje promedio de remoción de hidrocarburos del 98,50%, mientras que para los procesos de filtración sin agitación el porcentaje promedio de remoción de hidrocarburos fue del 98,23%, la diferencia de valores para los dos procesos, se deben a que al agregar agitación a la muestra la dispersión del contaminante fue más uniforme y eso pudo hacer que hubiese menos pérdida de carga, ya que para el primer proceso(con agitación) no se consideraron variables como concentración de hidrocarburos en unos puntos, adherencia de hidrocarburos al recipiente y adherencia al tubo de la bomba.

Sin embargo para respaldar la coherencia y veracidad de los datos se aplicó el análisis multivariable ANOVA, el cual permitió la comparación y la relación de las variables de estudio. Se llevó a cabo un diseño de experimentos multifactorial dos factores, dos y seis niveles (2x6), donde C_1 hace referencia a la muestra con agitación y C_2 se refiere a la muestra sin agitación. Este sistema permite conocer el desempeño de los parámetros de calidad del agua en función del tiempo y de conocer si la agitación afecta o no, los atributos mencionados como se observa en la figura 30.

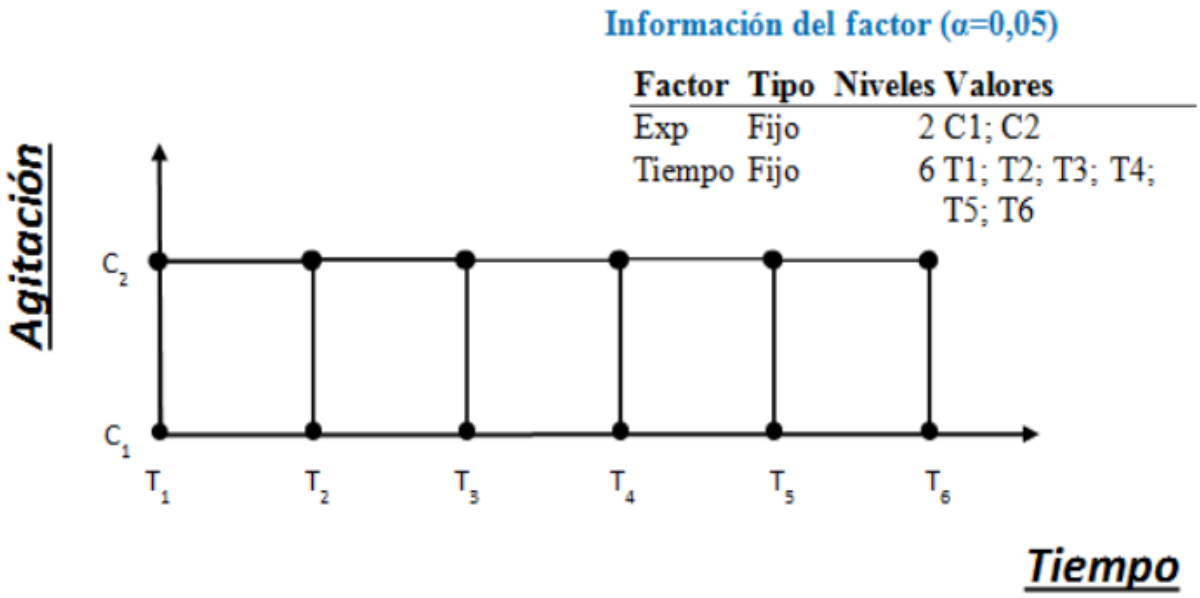
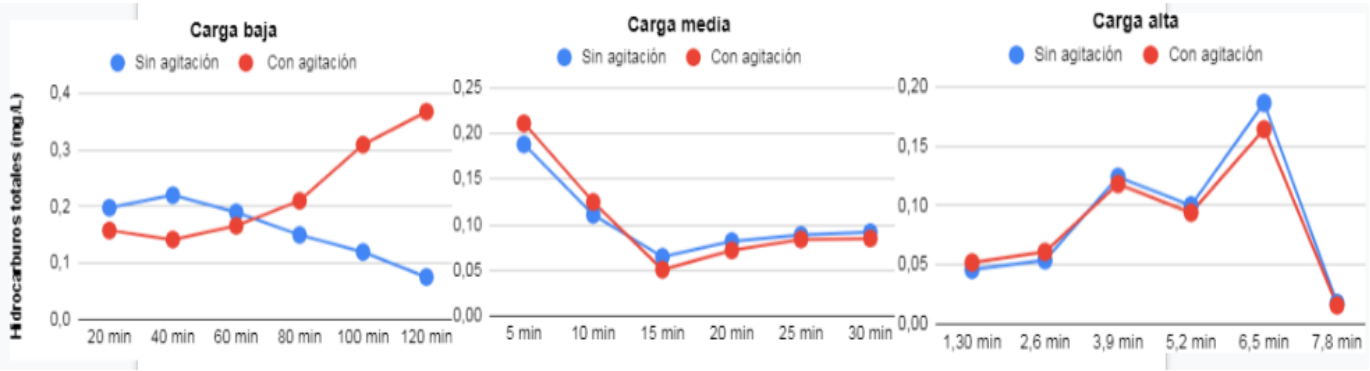


*Figura 30.*Atributos de agitación y tiempo. Fuente, (Autores, 2020).

Teniendo en cuenta que el ANOVA permite conocer la correlación estadística entre los distintos factores, se puede plantear que con base en los resultados mostrados en el **anexo 2,** donde la hipótesis planteada fue el análisis del factor p y el α (0,05), donde se muestra que no hay una diferencia estadísticamente significativas en la prueba sin agitación (p> α) en todos los parámetros de calidad del agua como la conductividad, salinidad práctica, salinidad NaCl, resistividad, turbidez, sólidos disueltos totales e hidrocarburos con el paso del tiempo. Caso contrario con el factor de agitación, en el que hay diferencias estadísticamente significativas (p< α) para todos los parámetros evaluados salvo los

hidrocarburos totales).Finalmente, las interacciones de las variables evidencian que no hay variación significativa entre los factores estudiados (p> α) y la totalidad de los parámetros de calidad del agua analizados.



Gráfica 11 .Comportamiento de remoción de hidrocarburos vs tiempo a diferentes cargas sin agitación. Fuente, (Autores, 2020).

Por medio de la información generada en los resultados se eligió el proceso de biofiltración sin agitación debido a que los cambios con respecto al otro proceso no tienen muchas diferencias entre sí, y por otra parte se seleccionó la carga media como la carga más óptima a usar debido a que su comportamiento fue más uniforme con respecto a la carga alta, así el tiempo de filtración es mucho menor que en la carga baja y su potencial de remoción es alto, cabe mencionar que este último parámetro fue óptimo en todas las cargas.(Ver Gráfica 11).

9.4 Objetivo 4:

Analizar la viabilidad y efectividad de la alternativa experimentada como un mecanismo de gestión ambiental sustentable para un proyecto a gran escala.

Durante el desarrollo del objetivo 4 se revisaron referentes bibliográficos para corroborar la cantidad y el caudal de agua de producción generada diariamente en el pozo Caño Lima, pues debido al acuerdo de confiabilidad el valor fue estimado. Para el diseño se tuvo como referente un modelo de biofiltro de cáscara de nuez desarrollado por la empresa Ecopetrol, ya que al escalar el modelo experimental realizado en el proyecto, no se contemplaban factores externos que hacen influyeron en la variación del dimensionamiento en la planta piloto.

Finalmente para un caudal de 146.133 barriles al día de agua de producción en el pozo Caño Limón, se requirió de 7 biofiltros para el tratamiento, donde las dimensiones que se tuvieron fue una altura fue de 16m y el diámetro de 13,1m, mostradas en la figura 31.

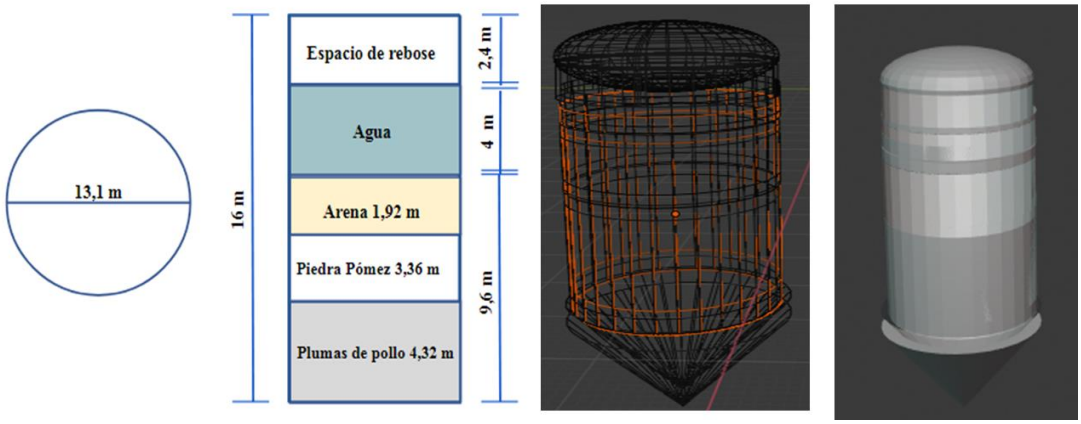


Figura 31. Dimensionamiento a escala real del biofiltro. Fuentes, (Autores, 2020).

En consecuencia a todos los resultados obtenidos a lo largo del proyecto se estableció en el momento de incorporar los biofiltros al proceso de tratamiento que se le da en la empresa Petrolima se lograría casi eliminar los hidrocarburos totales para así lograr unos parámetros de la calidad del agua mejores y así mismo cumplir con la normativa nacional a cabalidad. Tal como se muestra en la figura 32 el hecho de adicionar al tratamiento el biofiltro aumentaría la eficiencia en la remoción de contaminantes con base a los valores previos, sin embargo se consideró un tratamiento complementario por ende es necesario que proceso anterior (Tanques de lavado y piscinas de estabilización) se continúe llevando a cabo. Además para el escalamiento del modelo es necesario tener en cuenta criterios para el desarrollo y mantenimiento como adición a las variables propias del sistema diseñado, como son las pérdidas de carga, rigurosidad en el análisis técnico y económico, sistema de bombeo, mantenimiento del filtro y lavado por colmatación.

*Figura 32.*Diagrama de variación de hidrocarburos a través de los procesos de tratamiento. Fuente, (Autores, 2020).

Finalmente al revisar algunas de las características que presento el agua con el tratamiento empleado, se planteó la posibilidad de utilizar el agua en procesos agrícolas, específicamente para cultivos que permitan la obtención de biocombustibles y cultivos forestales de maderas y fibras; el decreto 1207 de 2014, propone parámetros fisicoquímicos para saber si la muestra cumple para uso agrícola, teniendo cuenta los parámetros de enfoque del proyecto se cumpliria con la normativa, sin embargo sería necesaria evaluar los otros parámetros que presenta la norma antes de recircular el agua tal como se muestra en la tabla 28.

Tabla 28.
Parámetros fisicoquímicos para utilización de agua residual en usos agrícolas.

Parámetros fisicoquímicos	Valor muestra	Unidades	Valor máximo permisible
			Normativa Nacional Decreto 1207 de 2014
pH	7,50		6,0-9,0
Conductividad	281	µS/cm	1500
Hidrocarburos Totales	0,1045	mg/L	1,0
Nitratos	0	mg/L	5

Fuente. *(Autores, 2020).*

10. Conclusiones.

- Las características fisicoquímicas con las que contaba el agua inicialmente pudieron evidenciar que no presentaba valores altos como se esperaba, aunque parámetros como la DQO y los sólidos suspendidos totales no eran óptimos comparados con la normativa colombiana. Sin embargo, según los criterios de evaluación de calidad del agua, la muestra se encontraba medianamente contaminada por ende requería de un tratamiento adicional.
- La aplicación de residuos naturales como materiales no convencionales, específicamente las Plumas de pollo y al piedra pómez para la adsorción y remoción de la carga contaminante de las aguas de producción petrolera no han sido muy profundizadas, por ende es un tema que aún está en desarrollo. No obstante, experimentalmente se logró demostrar que estos materiales presentan una alta eficiencia para el tratamiento de estas aguas residuales, alcanzando un porcentaje de remoción de 99,32% en las plumas y 78,63% en la piedra pómez.
- El análisis de las características físicas de los adsorbentes, permitió establecer las variables con las que debe contar el material para que su desempeño sea alto al momento de su aplicación, entendiéndose que la porosidad y la capacidad hidrofóbica del material son de gran incidencia para lograr adsorción y absorción del contaminante problema.
- Se pudo observar que el pretratamiento es vital para el funcionamiento del lecho filtrante debido a que si el método de limpieza y purificación no es el adecuado se pueden incrementar otros parámetros como sólidos suspendidos totales, turbidez y cargas contaminantes que

empeoren la calidad del agua inicial, tal como sucedió con el bagazo de caña que a pesar de ser un material utilizado comúnmente en procesos de filtración tuvo una eficiencia poco óptima que generó una alteración de las condiciones iniciales.

- Para los procesos de biofiltración de denotó que el tamaño de las partículas de cada lecho filtrante son incidentes en la adsorción más efectiva del hidrocarburo y disminución de otros parámetros, como se presentó con la piedra pómez la cual al ser pulverizada generaba mayor turbidez por lo cual el implementarla en fracciones más grandes permitió una mayor superficie de contacto facilitando la adherencia de contaminantes.
- Se evidencio que la normativa nacional carece de instrumentos o guías para el manejo, control y disposición final de aguas producción, así mismo, no se encontró alguna rúbrica o requisitos técnicos para el diseño que incluya los criterios para dimensionar biofiltros a pruebas industriales, por lo cual en este proyecto para el diseño se adaptaron algunos criterios del RAS para tratamiento de aguas potables y de igual manera se tuvieron en cuenta condiciones planteadas en bibliografía referente.
- Con base a los resultados evaluados anteriormente se evidenció que el filtro tuvo una eficiencia alta, y que los diferentes lechos permiten un desempeño bueno en la adsorción casi completa de los hidrocarburos, además la configuración inicial del sistema logró disminuir otros parámetros que alteran la calidad del agua. Es importante destacar que el comportamiento de la curva no presentó una tendencia creciente o decreciente lo que se debe a factores tanto internos como externos como la toma de datos, la colmatación, la pérdida de carga en la manguera, entre otras.
- Se concluyo que en un trabajo experimental como este se debe implementar una análisis estadístico de significancia como el ANOVA, para el caso de este proyecto el uso de tal herramienta facilitó entender que al incluir el proceso de agitación no hubo un cambio relevante en los resultados, y que la variación entre las diferentes cargas no fue significante.
- Con el mejoramiento de la calidad del agua se puede dar un uso sostenible a los residuos generados en otros procesos de producción implementando sistemas de simbiosis industrial, causando un menor impacto ambiental y disminuyendo la demanda del recurso hídrico, finalmente el uso de biofiltración es un desafío científico para implementar alternativas de tratamiento más limpias pero con una eficiencia alta en la eliminación de contaminantes orgánicos en este caso hidrocarburos totales.

11. Recomendaciones.

- Se recomienda realizar investigaciones que profundicen más acerca del tema, de tal manera que se exploren: otros materiales para adsorción de hidrocarburos y metales pesados, diferentes caudales, tiempos óptimos de retención y aplicativos en aguas provenientes de otros procesos industriales.
- Con el fin de saber más a profundidad la capacidad de remoción de contaminantes y así mismo ver la eficiencia del filtro en condiciones de cargas altas de contaminantes se aconseja realizar este mismo estudio en diferentes puntos de salida como los tanques de lavado.

- Para analizar la viabilidad del uso del agua tratada como riego agrícola para el consumo humano y de animales se recomienda hacer pruebas preliminares y posteriores al tratamiento de toxicidad y carga microbiana que permitan determinar si es posible su uso.
- Se sugiere realizar pruebas experimentales para los parámetros físicos de los materiales, que permitan la comparación con los valores teóricos y así sustentar la influencia de las variables en la adsorción del hidrocarburo, además por medio de la microscopia electrónica se permite detallar más a fondo el proceso de adsorción.
- En caso que se desee implementar el modelo a gran escala se recomienda analizar la viabilidad económica del proyecto teniendo en cuenta que incluir el proceso de agitación durante el tratamiento puede generar un costo adicional .que no se verá reflejado en la eficiencia del sistema. Además al recircular mayor cantidad de agua el número de filtros se puede reducir.
- Finalmente se aconseja hacer una medición de las pérdidas de carga que ocurren durante operación del sistema, para evaluará profundidad el desempeño del sistema.
- Se recomienda realizar investigaciones que profundicen más acerca del tema, explorando nuevos materiales para la adsorción y así mismo procesos de tratamiento, (RESPEL, compost y landfarming.

12. Aspectos éticos

A los largo de la elaboración del proyecto se trabajaron los aspectos éticos por medio de la confidencialidad de la información brindada por la empresa la cual fue y será usada netamente con fines académicos.

Referencias

Adebayo, A. R., & Tawabini, B. (2012). Hydrocarbon Exploration and Production-a Balance between Benefits to the Society and Impact on the Environment. J. Pet Environ. Biotechnol, 3, 1-9.

Abdelwahab, O. (2014). Assessment of raw luffa as a natural hollow oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup. Alexandria Engineering Journal, 53(1), 213-218.

Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades el residuo, ATSDR, (1999). Resumen de la salud pública hidrocarburos totales de petróleo. Estados Unidos. Recuperado de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs123.pdf

Aguilar, G. J. (2015). Estimación del potencial de energía eléctrica a partir de una unidad de volumen de excreta de gallina proveniente de granjas avícolas (Doctoral dissertation, Tesis de grado). Universidad del Valle. Colombia.

Alcaldía del municipio de Arauquita, (2016). Plan de desarrollo municipal. Arauca, Colombia. Recuperado de http://www.arauca-arauca.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/Acuerdo%20N%C3%BAmero%20200.02.2009%20del%2031%20de%20mayo%20de%202016.pdf.

Altashig, S., & Vinicio, C. (2018). Análisis de la piedra pómez como material biodegradable y filtrante en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la Curtiduría Artesanal Palahua, ubicado en la parroquia Totoras, del cantón Ambato y de la provincia de Tungurahua (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil).

Annunciado, T. R., Sydenstricker, T. H. D., & Amico, S. C. (2005). Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. Marine pollution bulletin, 50(11), 1340-1346.

Arroyo, L. D., & Ruiz, D. M. (2018). Determination of adsorption kinetics of chloride sewage of the agricultural sector energy crops, on activated carbon (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe, ARPEL. (2012). Disposición y tratamiento de agua producida. Uruguay. Recuperado de. http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf.

Autoridad nacional de licencias ambientales, ANLA, (2017). Glosario de términos ambientales. Recuperado de.http://portal.anla.gov.co/permiso-vertimientos.

Ayyaswami, A., & Vishwanathan, S. (2010). State of the Art of Remediation for Petroleum Industries. SPE Middle East Health, Safety, Security, and Environment Conference and Exhibition. Manama, Bahrain., 1–5.

Bautista, M. A., Hastamorir, M., & Vanessa, J. (2017). Caracterizacion Y Desarrollo De Una Metodologia Para La Selección De Biomateriales Sorbentes En Respuesta A Derrames De Hidrocarburo (Doctoral dissertation, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. De Petróleos).

Biblioteca Digital ILCE. (2012). Plumas y plumajes. Recuperado el 9 de marzo de 2012, de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/138/htm/sec_8.htm.
-Bravo, E. (2007). Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad. *Acción ecológica*, *24*(1), 35-42.

Buenfil, J. (2009). Manual para el filtro de bioarena. Manual De Capacitación Y Entrenamiento. Obtenido de http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/BUENFIL La Jardinera que Filtra las Aguas-SPANISH.pdf

Calao, J. E. (2007). Caracterización ambiental de la industria petrolera: tecnologías disponibles para la prevención y mitigación de impactos ambientales (Tesis de pregrado). Universidad nacional de Medellín. Colombia.

Calvo, B., Gajardo, A., Maya, M., Proaño, G., & Jarrín, J. (2000). Rocas y minerales industriales de Iberoamérica. Instituto Tecnológico Geominero de España, España, 436.

CENSAT, (2001). Aguas de producción. Bogotá, Colombia, CENSAT, Agua viva.

Clair N. Sawyer,P., L., McCarty, G, F. (2000) .QUÍMICA para Ingeniería Ambiental.

CASTILLO, A. (2017). Adsorbentes naturales en la mitigación del impacto adverso causado por derrames de crudo en fuentes hídricas (Doctoral dissertation, Tesis (Ingeniero Ambiental). Lima.

CASANOVA, R. M., MARTÍNEZ, A. J. G., SÁNCHEZ, E. M. O., IBARRA, J. R. V., SANDOVAL, O. A. A., & GARCÍA, F. P. (2008). Modelación de la calidad del agua del Río Tula, Estado de Hidalgo, México. Dyna, 75(154), 5-18.

Comisión nacional del agua, CNA. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Tlalpan, México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Danglad, J. A., Marfisi, S., Cova, A. J., & Linero, G. E. (2013). Partículas hidrofobadas de bagazo de caña de azúcar para el tratamiento de hidrocarburos en agua. Saber, 25(1), 97-103.

De la Cruz, A (2007) "Química Orgánica Vivencial" McGraw Hill.

De Mesa, J. B. L., Quintero, G., Vizcaíno, A. L. G., Cáceres, D. C. J., Riaño, S. M. G., & García, J. M. (2006). Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. Nova, 4(5), 82-90.

De Turris, A., Yabroudi, S. C., Valbuena, B., Gutiérrez, C., Cárdenas, C., Herrera, L., & Rojas, C. (2011). Tratamiento de aguas de producción por flotación con aire disuelto. Interciencia, 36(3), 211-218.

Departamento Nacional de Planeación, DNP .(2018). Bases del Plan Nacional de desarrollo 2018-2022.Bogotá, Colombia. Recuperado de https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/PND-2018-2022.pdf.

Díaz, S. E., Zamora, E. R., Caselles, A., & León, J. A. (2013). Diseño de un humedal construido para el tratamiento de agua de producción de una campo petrolero colombiano. Revista Fuentes, 11(2).

De Viana, J. (2010). Disposición y Tratamiento del Agua Producida.

Ecopetrol, S. A. (2016). Reporte integrado de gestión sostenible 2015. *Sourced from: www. ecopetrol. com. co/documentos/Ecopetrol_IA_2015_29marzo. pdf. Accessed on September 20th*.
Flores, J. A., Valladares, S., Bonillo, A. J., & Acosta, G. E. (2013). Partículas hidrófobas de bagazo de caña de azúcar para el tratamiento de hidrocarburos en agua. Saber, 25(1), 97-103.

Florida, N. (2019). Plumas: Implicancia ambiental y uso en la industria agropecuaria. Universidad Nacional del Altiplano Puno Perú. Revista de Investigaciones Altoandin. 2019; Vol 21 Nro 3, 225 - 237.

Food and Agriculture Organization, FAO, (2019). Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba. Cuba. Recuperado de http://www.fao.org/3/t2363s/t2363s0n.htm.

García, P. (2010). Caracterización del agua recirculada y optimización de la dosificación de lechada de cal en el agua residual del ingenio Risaralda SA. Risaralda, Colombia.

García, F. M., Güiza, R. A., & Baquero, B. A. (2019). Estudio exploratorio de arcilla expandida y piedra pómez como agregados en la producción de concretos ligeros. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, 37(2), 233-255.

Gallardo Carpio, C. H. (2009). Determinación de la calidad del agua que abastece a cuatro comunidades del cantón el Almendro del municipio de Jucuarán, Usulután.(Tesis de maestría). El salvador, Ecuador.

Gómez, L. P. (2014). Análisis del comportamiento histórico del manejo de las aguas provenientes de la extracción del crudo y formulación de alternativas de aprovechamiento de aguas en actividades de explotación de hidrocarburos en el municipio de San Luis de Palenque.

González, C, T. (2011). Monitoreo de la calidad del agua, la turbidez. Colegio de ciencias agrícolas.

International Tanker Owners Pollution Federation.(2011).Reconocimiento de hidrocarburos en costas.https://www.itopf.org/uploads/translated/Final_TIP_6_2011_SP_01.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, (2000). Diagnóstico ambiental y lineamientos para el uso sostenible del área Caño Limón-Estero de Lipa. Bogotá. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/011031/canolimon.pdf.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP8.pdf

Jaimes, D. M., & Pico, M. I. (2009). Diseño De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Y De Producción Evaluando Las Diferentes Alternativas Nacionales Y Extranjeras-Aplicacion Campo Colorado (Doctoral dissertation, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. De Petroleos).

Kalmykova, Y., Moona, N., Strömvall, A. M., & Björklund, K. (2014). Sorption and degradation of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, alkylphenols, bisphenol A and phthalates in landfill leachate using sand, activated carbon and peat filters. Water research, 56, 246-257.
Kar, P. Misra, M. (2004). Use of keratin fiber for separation of heavy metals from water. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 79, 1313-1319.

Karnitz Jr, O., Gurgel, L. V. A., De Melo, J. C. P., Botaro, V. R., Melo, T. M. S., de Freitas Gil, R. P., & Gil, L. F. (2007). Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse. Bioresource technology, 98(6), 1291-1297.

Kelly, E. N., Short, J. W., Schindler, D. W., Hodson, P. V., Kwan, A. K., & Fortin, B. L. (2009). Oil sands development contributes polycyclic aromatic compounds to the Athabasca River and its tributaries. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(52), 22346-22351.

KOcatepe, S & Mara, N, (2018). Investigación de sonido propiedades de adsorción de nonwoven producido a partir de pollo en fibra de plumas. Alabahama.

Kondo, G. (1975). Use of sorbents for oil spills. Marine Pollution Bulletin, 6(5), 73-76.

La voz del cinaruco.(2018). Planta de sacrificio de aves en Arauquita abandonada y convertida en basurero. Arauca, Colombia.

Lauria S.L. (2013). Denominación del material plumas de pollo. Matadero industrial de aves.Valencia.

Lizarazo, J. A., & Leal, C. H. (2011). Estudio Para La Implementacion De Reinyección De Cortes Durante La Perforacion De Pozos (Doctoral dissertation, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. De Petroleos).

Luyando, J. R., & López, D. (2018). Los efectos de la contaminación petrolera en el desarrollo de comunidades ejidales: el caso de la cuenca del Río San Juan. Investigación & Desarrollo, 26(1), 92-124.

Martínez, A. (2013). Estudio sobre los impactos socio-económicos del sector minero en Colombia: encadenamientos sectoriales.

Martínez P, Rodríguez I, Pérez G, Leiva, J.(2014). Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos. Afinidad. p.57-62.

Martínez, M. I. (2018). Repertorios de acción colectiva frente al extractivismo minero en América Latina. Andamios, 15(37), 43-73.

Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ramírez, A. T. O., & Herrera, J. A. S. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. Gestión y Ambiente, 21(1), 87-98.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Minambiente, (2011). En uso de las funciones delegadas mediante la Resolución 1711 del 3 de septiembre de 2010, proferida por el Ministro de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/Otros/Autos/2011/auto_3023_2011.pdf.

Ministerio de agricultura y desarrollo rural, MADR, (2006). El sector panelero colombiano. Bogotá, Colombia. Recuperado de, http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/el-sector-panelero-colombiano.pdf

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.(2010).Gestión Integral del Recurso Hídrico. Recuperado de. https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Presentaci%C3%B3n_Pol%C3%ADtica_Nacional_-_Gesti%C3%B3n_/libro_pol_nal_rec_hidrico.pdf

Ministerio de minas y energía ,(2016). Normativa. Recuperado de https://www.minenergia.gov.co/normatividad.

NATIONAL RESPONSE TEAM SCIENCE & TECHNOLOGY COMMITTE.(2007) Application of Sorbents and Solidifiers for Oil Spills..

Noyola, A., Morgan, J. M., & Güereca, L. P. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Instituto de Ingeniería-UNAM, Ciudad de México.

Pazmiño, L. (2016). Evaluación del nivel de eficiencia de un tratamiento primario con un filtro artesanal elaborado con bagazo de caña de azúcar, arena, ladrillo triturado y piedra pómez, para el tratamiento del efluente producido por una lavadora de autos. Universidad Técnica de Ambato.

Piergiorgio, M. (2019). EE.UU se erige en primer productor petrolero con los precios disparados. Revista La Vanguardia. España.

Pire, R y Pereira, A. (2003). Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del Estado Lara, Venezuela: propuesta metodológica.. Bioagro. 15. 55-63.

Pulido, L. L. (2014). Trenes de Tratamiento para Agua de la Industria Petrolera. *Kuxulkab*, *17*(33).

Quemada, J. M. M., & González, E. S. M. (2011). El futuro de los combustibles fósiles. Carbón, 27(21), 34.

Rodriguez, T. (2014). Biofiltros, una opción para mejorar las características de las aguas residuales provenientes de tratamientos convencionales. Universidad militar “nueva granada”. Bogotá, Colombia.

Roig, M.G., Ramírez, F.I. y Manzano, T. (2003). Bioadsorción de metales pesados de aguas ácidas de minas II. Sobre residuos con queratina (pelos de cerdo, pluma de ave) y quitina (caparazones de crustáceos). INGENIERÍA QUÍMICA 400, 184-204.

Sáez, Á. S. (2015). Diseño de una planta de aminas para tratamiento de la corriente de hidrocarburos gaseosa procedente del reactor catalítico de lecho fluidizado (FCC) en refinería.

Salazar, E. (2012). Remoción de hidrocarburos mediante biopolímeros naturales: efecto del tamaño de partícula. REPOSITORIO NACIONAL CONACYT.

Sánchez, R. A. (1998). El desarrollo de la industria petrolera en América Latina. Revista mexicana de sociología, 157-179.

Sánchez, CD (2019). Análisis espacio temporal de los parámetros fisicoquímicos de la quebrada las delicias, cerros orientales de Bogotá.

Sarkheil, H., & Tavakoli, J. (2015). Oil-polluted water treatment using nano size bagasse optimized-isotherm study. European Online Journal of Natural and Social Sciences, 4(2), 392.

Schroeder, R. H. A., Rodríguez, V. I. D., & Hernández, L. G. (1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. Terra Latinoamericana, 17(2), 159-174.

Srikanth, S., Kumar, M. y Puri, SK (2018). Sistema bio-electroquímico (BES) como un enfoque innovador para la gestión sostenible de residuos en la industria del petróleo. Tecnología Bioresource , 265 , 506-518.

Sierra , M. M. (2017). Evaluación técnica financiera del sistema de bombeo hidráulico para dos pozos tipo del campo Chichimene (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Tesfaye, T., Sithole, B. y Ramjugernath, D. (2018). Valorización de las púas de plumas de pollo: utilización en la producción de hilados y aplicaciones técnicas textiles. Química sostenible y farmacia , 8 , 38-49.

Toloza, M. J. A., Marín, P. A., & Jaramillo, C. A. P. (2018). Evaluación de hidrogeles de lodos resultantes del lavado de arena y piedra como alternativa para el tratamiento de suelos áridos. Respuestas, 23(1), 60-67.

Unidad de planeación minero energética, UPME, (2016) Balance de las arenas silíceas 2012-21016. Colombia. Recuperado de . http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-nal/MNAL_arenassiliceas.pdf

Valladares, M. G., Valerio, C., de la Cruz, P., & Melgoza, R. M. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 16(31), 55-73.

Vásquez, H. (2012). La historia del petróleo en Colombia. Revista Universidad EAFIT, 30(93), 99-109.

Vásconez , V. H. (2018). Análisis de la piedra pómez como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Centro de Faenamiento Ocaña del cantón Quero (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil).

Velandia, Á. E. (2017). Adsorbentes naturales en la mitigación del impacto adverso causado por derrames de crudo en fuentes hídricas. Universidad Libre, Bogotá.

Vélez, F. A. (2019). Adsorción de metano (ch4) de biogás mediante un filtro relleno de un soporte con carbón activado y piedra pómez molida (Bachelor's thesis, Quito: Universidad de las Américas, 2019).

Villegas, L. N. (2017). Evaluación de riesgos en la operación de una planta de tratamiento de agua de producción para pozos inyectores. Universidad Nacional de Piura.

Zamudio-Perez, E., Bandala, E. R., Fernandez, L. C., & Torres, L. G. (2013). Surfactant enhanced washing of soil contaminated with petroleum hydrocarbons and treatment of produced wastewaters using a biofilter. Journal of Environmental Treatment Techniques, 1(2), 110-116.

ANEXOS

ANEXO 1. Lista de abreviaturas.

DBO: Demanda Biológica de oxígeno.
DQO: Demanda Química de oxígeno.
µS: Microsiemens
PSU: Unidades prácticas de salinidad
NTU: Unidad nefelométrica de turbidez
Ω: Ohms
UPC: Unidades de Platino Cobalto
N.R: No reporta
Norma ASTM F-276: Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents.
RAI: Resumen analitico de investigación.
g: gramos
L/s: Litro por segundo
ANLA: Autoridad Nacional De Licencias Ambientales

ATSDF: Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades el residuo
CNA:Comisión Nacional de agua
DNP: Departamento Nacional de Planeación.
ARPEL: Asociación regional de empresas de petróleo y de gas natural de Latinoamerica y el caribe.
UPME: Unidad De Planeación Minero Energética
Separadores API: American petroleum institude
POHR: Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico
rpm: Repeticiones por minuto.
EPA: Agencia de Protección del Medio Ambiente de EEUU.
Barriles/día: Barriles de petróleo o agua al día
FWKO: Free-Water Knock Out
FAO: Food and Agriculture Organization
GIRH: Gestión integral del recurso hídrico
PRTGV:planes de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos

ANEXO 2. Datos obtenidos en ANOVA.

Análisis de Varianza Conductividad vs Exp.; Tiempo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Exp	1	32701	32700,7	27,94	0,000
Tiempo	5	7306	1461,2	1,25	0,312
Error	29	33935	1170,2		
Falta de ajuste	5	1895	379,1	0,28	0,917
Error puro	24	32040	1335,0		
Total	35	73942			

Análisis de Varianza Salinidad práctica vs Exp; tiempo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Exp	1	0,009088	0,009088	29,47	0,000
TIempo	5	0,002328	0,000466	1,51	0,217
Error	29	0,008943	0,000308		
Falta de ajuste	5	0,000372	0,000074	0,21	0,956
Error puro	24	0,008571	0,000357		
Total	35	0,020360			

Análisis de Varianza Salinidad NaCl vs Exp; tiempo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Exp	1	0,008871	0,008871	36,44	0,000
TIempo	5	0,001989	0,000398	1,63	0,182
Error	29	0,007059	0,000243		

Falta de ajuste	**5**	**0,000626**	**0,000125**	**0,47**	**0,797**
Error puro	**24**	**0,006433**	**0,000268**		
Total	**35**	**0,017919**			

Análisis de Varianza Resistividad vs Exp; tiempo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Exp	**1**	**19,068**	**19,0678**	**29,15**	**0,000**
TIempo	**5**	**4,402**	**0,8805**	**1,35**	**0,273**
Error	**29**	**18,968**	**0,6541**		
Falta de ajuste	**5**	**1,926**	**0,3851**	**0,54**	**0,742**
Error puro	**24**	**17,043**	**0,7101**		
Total	**35**	**42,438**			

Análisis de Varianza TDS vs Exp; tiempo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p

Exp	**1**	**10275,2**	**10275,2**	**34,99**	**0,000**
TIempo	**5**	**1702,0**	**340,4**	**1,16**	**0,353**
Error	**29**	**8516,8**	**293,7**		
Falta de ajuste	**5**	**558,7**	**111,7**	**0,34**	**0,885**
Error puro	**24**	**7958,1**	**331,6**		
Total	**35**	**20494,0**			

Análisis de Varianza HT vs Exp; tiempo.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Exp	**1**	**0,003927**	**0,003927**	**0,59**	**0,447**
TIempo	**5**	**0,010598**	**0,002120**	**0,32**	**0,896**
Error	**29**	**0,191440**	**0,006601**		
Falta de ajuste	**5**	**0,014908**	**0,002982**	**0,41**	**0,840**
Error puro	**24**	**0,176532**	**0,007356**		

Total	**35**	**0,205965**

ANEXO 3

Revisar cálculos adjuntos