



## **Tratamiento de Aguas Residuales de Perforaciones Petroleras**

Karen Alexandra Gualy Martínez

Kevin Adrián Romero Barrios

Universidad de Pamplona

Diplomado en Ingeniería Ambiental y Herramientas Aplicadas en Recursos Hídricos

Julio Isaac Maldonado Maldonado

Asesor

12 de diciembre de 2022

## **Resumen**

Se realizó un análisis general de los distintos métodos usados actualmente para manejar el agua residual, la clasificación de estas y que afectaciones puede generar su inadecuado manejo al medio ambiente. Se investigó acerca del petróleo, desde los inicios como producto comercial en Colombia y como este ha ganado tanta importancia a nivel nacional convirtiéndose en uno de los productos que más genera ingresos al Estado, también se analizaron los procedimientos y equipos necesarios para su extracción mediante la perforación rotatoria, método actualmente más usado por las empresas nacionales. Se evaluaron los principales residuos que genera la industria, analizando que el agua es uno de los recursos más contaminados durante la mayor parte de las etapas de producción de un pozo petrolero. Se analizaron los métodos de tratamiento de agua residual en perforaciones petroleras y la normatividad colombiana acerca de los vertimientos de estas en fuentes hídricas. Se examinaron los métodos de tratamiento por medio de tres estanques, el primero de flotación y sedimentación simple, el segundo de coagulación, floculación y sedimentación floculenta y el último de remoción de materia orgánica. Se analizaron los métodos de disposición final de residuos y el aprovechamiento las aguas residuales mediante estudios que planteaban la reutilización de estas aguas en distintas industrias, con el fin de darles un nuevo uso y reducir su contaminación en las fuentes hídricas.

## Contenido

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Resumen.....                                           | 2  |
| Introducción .....                                     | 9  |
| Generalidades.....                                     | 10 |
| Historia de las Aguas Residuales .....                 | 10 |
| Tratamiento de Aguas Residuales.....                   | 11 |
| Origen y Clasificación de las Aguas Residuales.....    | 12 |
| Aguas Blancas.....                                     | 12 |
| Aguas Residuales Domésticas .....                      | 12 |
| Aguas Residuales Industriales .....                    | 12 |
| Aguas Residuales de Agricultura.....                   | 13 |
| Impactos de los Vertimientos de Aguas Residuales ..... | 13 |
| Impactos en la Salud Humana.....                       | 13 |
| Impactos en el Medio Ambiente .....                    | 14 |
| Impactos en la Economía .....                          | 14 |
| Etapas de Tratamiento de Aguas Residuales .....        | 14 |
| Tratamiento Preliminar .....                           | 14 |
| Tratamiento Primario .....                             | 15 |
| Tratamiento Secundario .....                           | 16 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tratamiento Terciario o Complementario .....                          | 17 |
| El Petróleo.....                                                      | 18 |
| Historia del Petróleo en Colombia.....                                | 19 |
| Usos del Petróleo .....                                               | 20 |
| Transporte .....                                                      | 20 |
| Poder Industrial.....                                                 | 21 |
| Calefacción e Iluminación .....                                       | 21 |
| Lubricantes.....                                                      | 21 |
| Proceso de Explotación Petrolera .....                                | 21 |
| Upstream.....                                                         | 22 |
| Midstream .....                                                       | 28 |
| Downstream .....                                                      | 28 |
| Base Teórica.....                                                     | 30 |
| Disposiciones para la Exploración y Explotación de Hidrocarburos..... | 30 |
| Resolución 18-1495 de 2009 .....                                      | 30 |
| Impactos Ambientales de la Industria Petrolera .....                  | 36 |
| Medio Biótico .....                                                   | 36 |
| Medio Abiótico .....                                                  | 37 |
| Medio Antrópico.....                                                  | 38 |
| Importancia del Tratamiento de Aguas Contaminadas de Petróleo.....    | 39 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Estabilizacion de la Materia Organica Mediante Lagunas .....      | 40 |
| Tipos de Lagunas .....                                            | 40 |
| Lagunas Aeróbicas.....                                            | 40 |
| Lagunas de Aireación Artificial.....                              | 41 |
| Lagunas Anaeróbicas .....                                         | 41 |
| Lagunas Facultativas.....                                         | 41 |
| Ventajas y Desventajas de las Lagunas .....                       | 42 |
| Ventajas.....                                                     | 42 |
| Desventajas .....                                                 | 42 |
| Construcción de Lagunas de Estabilización .....                   | 43 |
| Consideraciones de construcción.....                              | 43 |
| Norma de Vertimientos (Resolución 0631 de 2015) .....             | 47 |
| Aguas Residuales con Hidrocarburos .....                          | 47 |
| Valores Límites Máximos Permisibles .....                         | 47 |
| Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria del Petróleo..... | 50 |
| Características de los Fluidos de Perforación .....               | 50 |
| Fluidos de Perforación Primera Sección.....                       | 53 |
| Etapas de Tratamiento de las Aguas de Perforación.....            | 55 |
| Tratamiento Preliminar .....                                      | 57 |
| Flotación y Sedimentación Simple .....                            | 58 |

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Coagulación, Floculación y Sedimentación Floculenta..... | 61 |
| Estabilización de Materia Orgánica .....                 | 68 |
| Disposición Final del Líquido Tratado .....              | 70 |
| Aprovechamiento de las Aguas Tratadas.....               | 71 |
| Recuperación de Residuos Aceitosos .....                 | 75 |
| Disposición de Lodos.....                                | 75 |
| Biorremediación en Suelos .....                          | 76 |
| Conclusiones .....                                       | 78 |
| Bibliografía .....                                       | 80 |

## Índice de Tablas

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Clasificación del Petróleo según su Grado API.....                                       | 19 |
| <b>Tabla 2.</b> Valores Máximos Permisibles para el Vertido de ARnD asociadas con<br>Hidrocarburos ..... | 47 |
| <b>Tabla 3.</b> Dosificación de Coagulante y Floculante. Por Bruno 2020.....                             | 65 |
| <b>Tabla 4.</b> Parámetros Hidráulicos del Sistema .....                                                 | 65 |
| <b>Tabla 5.</b> Parámetros Básicos para la Inyección de Aguas Residuales en Yacimientos ...              | 72 |

## Índice de figuras o ilustraciones

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Ilustración 1.</b> Excavación de Terraplenes de una Laguna .....                                    | 44 |
| <b>Ilustración 2.</b> Diques de Lagunas de Estabilización.....                                         | 44 |
| <b>Ilustración 3.</b> Tubería de Interconexión de Lagunas .....                                        | 45 |
| <b>Ilustración 4.</b> Detalle de Entrada, Salida y Terraplenes .....                                   | 46 |
| <b>Ilustración 5.</b> Unidad de Salida .....                                                           | 46 |
| <b>Ilustración 6.</b> Tipos de Fluidos de Perforación.....                                             | 52 |
| <b>Ilustración 7.</b> Tipos de Fluidos de Perforación Base Agua .....                                  | 53 |
| <b>Ilustración 8.</b> Esquema de Tratamiento .....                                                     | 56 |
| <b>Ilustración 9.</b> Relación entre el Diámetro y Velocidad de Sedimentación de la Partícula<br>..... | 61 |
| <b>Ilustración 10.</b> Sedimentación en Función del Tiempo .....                                       | 67 |
| <b>Ilustración 11.</b> Sistemas Aerobios .....                                                         | 68 |
| <b>Ilustración 12.</b> Requerimientos para la Biorremediación Aerobia .....                            | 69 |



## **Introducción**

La industria hidrocarburífera es y ha sido una parte fundamental en el desarrollo de Colombia. El petróleo crudo es uno de los productos exportados más importantes del país y por tanto uno de los más importantes para la economía nacional, todo esto ha desencadenado que año tras año sea cada vez más importante la construcción de nuevas zonas de extracción para adquirir este preciado recurso.

La extracción de petróleo es un proceso en el que se desarrollan labores como la exploración, perforación, producción, etc. Cada una de estas actividades tiene un mayor o menor impacto sobre el medio ambiente. Durante la mayor parte de la vida de una estación extractora de petróleo uno de los principales recursos que se consume y contamina es el agua, esto debido a la gran cantidad de actividades en la que se utiliza.

El tratamiento de estas aguas por lo general es algo lento debido a la gran cantidad de contaminantes que contiene, en algunos casos la presencia de agua con contenidos elevados de sales en los yacimientos genera gran cantidad de barriles de agua extraídos. Existen métodos para tratar estas aguas, que permiten su posterior reúso en distintas actividades de la propia industria o en externas, lo que genera una reducción en la cantidad de agua residual tratada que va directamente a las fuentes agua y la reutilización de los lodos finos.

A nivel mundial es cada vez es más importante el manejo que se le da a estas aguas, algunos estudios han mostrado, como el uso de estas aguas en distintas actividades donde normalmente se usa agua potable no genera ningún tipo de alteración en las producciones y hasta en algunos casos traer consigo impactos positivos sobre el medio ambiente.

## **Generalidades**

### **Historia de las Aguas Residuales**

Uribe (1996), habla acerca de la historia de las aguas residuales, la cual se remonta a cuando el hombre toma la decisión de utilizar el agua como medio de transporte para residuos orgánicos generados en las actividades cotidianas, ante esto surge la necesidad de regular y limpiar el flujo de los alcantarillados, lo que llevo a los Romanos a construir cloacas, siendo la más famosa la cloaca máxima construida por Tarquino el Antiguo y Tarquino el Soberbio alrededor del año 600 A.C, desembocando en la parte baja del rio Tíber.

El aumento en la densidad poblacional, genera la necesidad de mejora en la administración de las aguas residuales, debido al incremento de cargas contaminantes producto de actividades industriales y comerciales, ya que, estas generan deterioro en las fuentes de agua potable.

Cuando se presentó una epidemia de cólera en Londres en 1848, que contó con un total de 14.600 víctimas, se evidenció una relación directa entre la enfermedad y el agua de consumo contaminada, en base a esto surgió la idea de construir un sistema de alcantarillado sanitario, el cual fue terminado en 1865. Fecha en la cual también se contaban con sistemas de alcantarillado en tan solo 10 ciudades de Estados Unidos.

En 1912 se descubrió el sistema de lodos activados, lo que generó un impulso en el desarrollo de los sistemas de tratamiento, sin embargo, los estudios científicos a este sistema solo se dieron hasta la década de los 50. Posteriormente en el año 1962 se intentó instaurar una teoría cinética para el tratamiento y los fundamentos de Microbiología Sanitaria, para darle apertura al establecimiento de métodos prácticos en los años setenta.

A partir de los inicios del siglo XXI se han visto grandes avances en el tratamiento de aguas residuales a nivel internacional, haciendo uso de filtros percoladores, biodiscos rotatorios, lodos activados, carbón activado, osmosis inversa, fotocátalisis, etc. A nivel nacional el desarrollo y adopción de dichos métodos ha sido escaso respecto a otros países del mundo. El establecimiento de normatividad para la correcta implementación de sistemas de tratamiento en Colombia ha permitido llevar a cabo la difusión, entendimiento y control del proceso de manejo del agua residual.

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

Las aguas residuales, se definen como aquellas aguas que al ser usadas por el hombre se convierten en peligrosas para el medio ambiente, generando la necesidad de ser desechadas y expuestas a un proceso de tratamiento, ya que, presentan un alto grado de sustancias y microorganismos contaminantes. (Espigares & Pérez, 2003)

Se consideran como vertimientos combinados la mezcla de efluentes, que pueden ser de origen doméstico, como las aguas negras y grises, mezcladas con efluentes de establecimientos comerciales o instituciones; industriales, pluviales y escorrentías urbanas; también aquellos generados por escorrentías de actividades agrícolas y acuícolas (Raschid-Sally y Jayakody, 2008).

El tratamiento del agua residual se basa en separar este líquido, de los componentes no deseables, llegando al punto de que la fuente receptora sea suficiente para autopurificarse, es decir, cuente con la capacidad de eliminar la contaminación restante. (Uribe, 1996)

## **Origen y Clasificación de las Aguas Residuales**

Espigares García, M. y Pérez López, J. (2003), realizan la clasificación de las aguas residuales desde sus diferentes orígenes o procedencia:

### ***Aguas Blancas***

Proceden de la atmosfera, es decir, de precipitaciones, nevadas y heladas, o del riego en sitios públicos. Estas no han llevado ningún proceso de transformación, por lo tanto, son aguas ligeramente limpias y el impacto ambiental generado en la recolección puede ser mínimo o nulo, es por esta razón, que no necesitan ser sometidas a ningún proceso de tratamiento avanzado, recalcando que esto solo aplica si se lleva a cabo por separado, debido a que si se une con un sistema que transporte aguas domesticas o industriales automáticamente se estarían contaminando y se debe realizar todo el debido proceso de tratamiento.

### ***Aguas Residuales Domésticas***

Estas son aguas desechadas provenientes de la cotidianidad del ser humano, las cuales están contaminadas por heces y orina, productos a base del aseo personal, aseo de la casa y de la cocina. Usualmente presentan una alta dosis de materia orgánica y microorganismos, además de residuos de productos de limpieza y grasas.

### ***Aguas Residuales Industriales***

Cuando se llevan a cabo procesos realizados en fábricas e industrias, se genera el desecho de aguas aceitosas, detergente, antibióticos, ácidos, grasas y otros productos o subproductos de procedencia mineral, química, vegetal o animal, etc. La estructura de estas aguas es muy alterable, ya que, esto depende del tipo de actividad que realice la industria y los insumos que utilice.

### ***Aguas Residuales de Agricultura***

En las zonas rurales se realizan labores agrícolas, estas aguas son procedentes de estas actividades, con la posibilidad de estar contaminadas por pesticidas, fungicidas, herbicidas entre otros.

### **Impactos de los Vertimientos de Aguas Residuales**

WWAP (2017), indica los impactos ambientales que se tienen al realizar el vertimiento de aguas residuales sin tratar o tratadas inadecuadamente, como la contaminación del recurso hídrico superficial, subterráneo y el medio geológico, generando así afectación en las condiciones del agua suministrada. Las aguas residuales tienen como último destino el océano, puesto que los lagos y ríos donde son vertidas desembocan allí.

### ***Impactos en la Salud Humana***

Desde 1990 ha sido notorio el mejoramiento de las acometidas para el saneamiento de residencias, sin embargo, existen riesgos para la salud humana a causa de la mala contención, fugas durante el retiro, transporte y tratamiento inadecuado de las aguas.

Aún existen países en los que la eficacia de estos servicios precaria, en los cuales se usan de manera informal las aguas residuales, surgiendo la necesidad del uso de agua superficial contaminada para el consumo y producción de alimentos, propagando de esta manera enfermedades que están ligadas directamente al saneamiento.

Como estrategia para controlar y eliminar enfermedades, se tiene la mejora del saneamiento y tratamiento de aguas residuales, debido a que se propagan a través de bacterias como el cólera o por medio de insectos como son las enfermedades tropicales.

### ***Impactos en el Medio Ambiente***

Cuando se alteran las condiciones del agua, se afecta directamente la cantidad de recursos hídrico disponible, generando preocupaciones desde 1990 por el aumento en la contaminación en gran parte de los ríos del continente africano, los territorios Asiáticos y de América Latina, a causa del crecimiento demográfico, aumento de actividades económicas, industriales y agricultura, al igual que el vertimiento de aguas residuales no tratadas. Esto impacta directamente los ecosistemas, reduciendo la biodiversidad, degradando los medios acuáticos, se generan olores desagradables, aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero, bioacumulación de toxinas, entre otros impactos y de esta manera provocando deficiencia en los servicios que prestan como oportunidades recreativas.

### ***Impactos en la Economía***

Para mantener la economía de cualquier comunidad, es primordial disponer con agua limpia, contar con agua de mala calidad representa un impedimento para el desarrollo económico, afectando directamente la producción industrial, pesca, acuicultura, agricultura y turismo, siendo estas actividades beneficiadas directamente por la disposición de agua limpia.

Un ejemplo claro es la economía de las islas del caribe, las cuales dependen por completo del estado de los arrecifes para en actividades como turismo, pesca y protección de la costa, pero hoy en día hasta los arrecifes se encuentran en amenaza por causa de las aguas residuales no tratadas vertidas.

### **Etapas de Tratamiento de Aguas Residuales**

#### ***Tratamiento Preliminar***

Se realiza el proceso de regulación y medición del caudal de agua residual entrante a la planta y a su vez la remoción o reducción de sólidos de tamaño significativo, arena,

grasas, aceites y flotantes presentes, siendo estos provocadores de problemas en el mantenimiento y funcionamiento de la planta.

La protección de los equipos es fundamental en el proceso, ya que, gracias a estos se facilita la ejecución de actividades que son complejas para el hombre, en este caso los equipos de tratamiento como bombas y aireadores, tuberías y piezas que puedan ser desgastadas por la abrasión de arenas, sufrir atascamiento, así que el pretratamiento permite conservar el sistema de tratamiento en buenas condiciones, garantizando un proceso correcto y efectivo.

### ***Tratamiento Primario***

La eliminación de sólidos suspendidos es el objetivo principal en esta etapa del tratamiento, que se realiza mediante el proceso de sedimentación primaria siendo éste el método tradicional, consistiendo en un proceso simple por gravedad o asistido por sustancias químicas.

En el desarrollo de la sedimentación primaria se reduce la carga orgánica y sólidos eliminando una parte significativa de sólidos en suspensión en el agua residual tratada, logrando la remoción los sólidos sedimentables hasta del 90%, los sólidos suspendidos del 40% al 60% de y la demanda bioquímica de oxígeno entrante al sedimentador del 20% al 40%, esto si se realiza el proceso de manera eficiente. (BCN, 2018)

Reducir la velocidad de las aguas residuales por medio del sedimentador, es el sistema de tratamiento primario más común, contando con velocidades entre 30 y 60 cm/minuto aproximadamente, de tal manera que se pueda realizar sedimentación y flotación, generando así mejoras en la eliminación de sólidos suspendidos. Los tanques de sedimentación primaria

cumplen adicionalmente con la función de eliminar grasa y aceites flotantes, sólidos y recolección de estos para la dirigirlos a gravedad o por medio de bombeo hasta el destino donde se efectuará el tratamiento correspondiente. (CONAGUA, 2014)

### ***Tratamiento Secundario***

Son generalmente procesos biológicos por medio del uso de microorganismos, los cuales generan reacciones bioquímicas se elimina las cargas orgánicas presentes en las aguas residuales, principalmente disueltas. Estos procesos se fundamentan en el crecimiento biológico suspendido como en los lodos activados o en el crecimiento adherido mediante filtros aeróbicos o contactores biológicos). (De la Vega, 2012)

En este tipo de procesos, utilizando métodos ligados a organismos vivos, el crecimiento de los microorganismos se debe a contaminantes del agua que tienen por finalidad ser fuente de carbono y/o energía, los cuales facilitan el crecimiento de microorganismos, producen dióxido de carbono y demás sustancias que son inofensivas. (Ferrer. Seco & Robles, 2018)

En el tratamiento secundario, se ejecutan diversos procesos aeróbicos y anaeróbicos, las bacterias aerobias permiten que el agua tratada contenga muy poca materia disuelta y obtienen como producto principal nuevas células, y las bacterias anaerobias se enfocan durante su actividad en la generan bióxido de carbono y metano, de igual manera generan células nuevas en cantidades menores.

Hay generación de biomasa en el crecimiento celular y para que haya tratamiento surge la necesidad de separar la biomasa del agua, la cual se realiza por medio de gravedad, en los sistemas aerobios la separación se realiza en los sedimentadores secundarios y en los sistemas anaerobios generalmente dentro del reactor, ya que, por lo general después de un



reactor anaerobio sigue un reactor aerobio el cual genera la retención de biomasa arrastrada hacia este.

Además, la clasificación de los reactores biológicos se basa en la estructura en que se organiza la población microbiana dentro del reactor. Denominado como reactor de biomasa fija cuando el reactor cuenta con un medio natural o sintético, el cual brinda soporte para el desarrollo de la comunidad microbiana en forma de lama o película y biomasa suspendidas cuando los reactores no utilizan un medio y los microorganismos forman flóculos entre ellos. (De la Vega, 2012)

### ***Tratamiento Terciario o Complementario***

Este proceso tiene por objetivo la eliminación de los iones orgánicos, color residual, nutrientes y microorganismos, lográndose por medio de reacción biológica o química. Los tratamientos avanzados están diseñados por medio de procesos para eliminar nutrientes específicos como el fosforo o nitrógeno.

Un proceso de tratamiento biológico tiene mejores efectos que los procesos químicos, los cuales generalmente tienen un costo elevado para su implementación en la mayoría de las áreas y pueden causar contaminación secundaria. El tratamiento haciendo uso de métodos naturales como la acuicultura o reciclaje del agua residual por medio de sistemas de ingeniería han tenido un crecimiento sustancial los últimos años, su diseño tiene como objetivo tratar el agua residual que a su resuelven problemas ambientales, de salud y con la posibilidad de ser económicamente eficientes. (Céspedes, 2019)

## **El Petróleo**

El petróleo ha sido para el desarrollo mundial uno de los componentes más importantes, que inició la explotación y comercialización hace un poco más de 150 años. El 27 de agosto de 1859 fue la fecha en la que el petróleo fue hallado por William B. Smith en el estado de Pensilvania, Estados Unidos, mientras retiraba un barreno de un pozo de aproximadamente 23 metros de profundidad, del cual notó que de este surgía un extraño líquido aceitoso de tonalidad oscura. Dos años antes del suceso esta zona había sido visitada por Edwin L. Drake, a quien se le da el mérito del descubrimiento del petróleo, con el fin de establecer la posibilidad de producir petróleo en los terrenos pertenecientes a Pennsylvania Rock Oil Co. (Standard Oil Company Chile, 1987)

A partir de este suceso se empezó a desarrollar la industria de extracción y comercialización del petróleo. El uso de este recurso natural permitió el avance de las industrias mundiales y la mejorar la calidad de vida de la población, pero con fuerte impacto al medio ambiente.

El petróleo es un líquido aceitoso de tonalidad café oscura, al ser un hidrocarburo, está constituido principalmente por carbono e hidrogeno. El petróleo puede ser encontrado en acumulaciones subterráneas en estado líquido, al cual se le denomina crudo o en estado gaseoso, al cual se le denomina gas natural. Se cree que su origen es debido a la disposición de materia orgánica al interior de la tierra en periodos geológicos de hace más de 500 millones de años. (ECOPETROL, 2014)

El petróleo puede variar desde liviano, hasta pesado dependiendo su clasificación en base a los grados API (American Petroleum Institute). Entre mayor sea el grado API del petróleo

extraído, menor refinación se necesita para obtener productos de mayor costo denominados “blancos”. (Secretaria Tecnica Nacional, 2017)

El petróleo se clasifica en las siguientes categorías según su grado API en Colombia:

**Tabla 1.** Clasificación del Petróleo según su Grado API

| <b>Grado API</b>    | <b>Clasificación</b> |
|---------------------|----------------------|
| Mayor a 31,1°       | Liviano              |
| Entre 22,3° y 31,1° | Mediano              |
| Menor a 15°         | Pesado               |

*Nota.* Adaptado de *Informe EITI Colombia, 2016*, EITICOLOMBIA  
<https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/>

El petróleo también se puede clasificar según su contenido de azufre. Se demonizan “dulces” a los que tienen menos de 0.5% de azufre y “agrios” a los que tienen más de 1.0% de azufre. (Secretaria Tecnica Nacional, 2017)

### **Historia del Petróleo en Colombia**

El inicio de la industria de hidrocarburos en Colombia se da en el siglo XX, misma época en la cual finalizaba la guerra de los mil días y ocurría la independización de Panamá. Para el año 1918 cerca de la ciudad de Barrancabermeja se puso en marcha el primer pozo petrolero por parte de Tropical Oil Company. Gracias al posterior establecimiento de políticas para la promoción, aprovechamiento y condiciones de producción en yacimientos de petróleo encontrados, se dio un auge de la naciente industria. (Asociación Colombina del Petroleo, 2019)

Para el año 1931 se habían realizado 80 pozos en zonas privadas a nivel nacional con profundidades de 700 a 1.045 metros. A finales de 1949 ya se habían realizado 1845 perforaciones en concesiones y zonas privadas con profundidades entre los 1.600 y 3.599 metros, siendo el más profundo el Caravallo, con 3.599 metros. Durante este mismo año Colombia ocupó

el 9º puesto a nivel mundial en producción petrolera con 30.488.000 BB y exportaciones de 24.166.861 BB, con valor de US \$28.191.176,00. (Vasquez, 1994)

Para finales del 1951 cuando la concesión de Tropical Oil Company expiró, se entregó la operación a Ecopetrol, la cual inició las actividades y se encargó de manejar el recurso de hidrocarburos en el país. Para el año 1961 Ecopetrol inició la gerencia de la refinería de Barrancabermeja y posteriormente la refinería de Cartagena. En septiembre de 1983 Ecopetrol en convenio con OXY, descubren un yacimiento que contaba con 1.100 millones de barriles estimados en Campo Caño Limón, permitiendo que para el año 1986 Colombia pudiera volver a exportar petróleo. En los inicios del siglo XXI Ecopetrol ha acelerado el proceso de exploración y mejora de su competitividad a nivel mundial en el mercado, convirtiéndose en la principal empresa petrolera del país y perteneciendo al grupo de las 40 más grandes a nivel mundial. (Ecopetrol, 2014)

### **Usos del Petróleo**

La Asociación Colombiana del Petróleo y Gas (2018), define el petróleo como una sustancia muy demandada a nivel mundial por la gran cantidad de usos que tiene dentro de las distintas industrias, puede ser usado como combustible para la calefacción e iluminación, la fabricación de lubricantes necesarios en las industrias manufactureras, entre otros. Sus principales usos son:

#### ***Transporte***

El sistema mundial de transporte depende del petróleo, ya que, este se utiliza para fabricación de diésel y gasolina, las cuales son fuentes imprescindibles de energía para el funcionamiento de maquinarias y vehículos.

### ***Poder Industrial***

Para la producción de energía e industrial se hace uso del diésel y la gasolina en el funcionamiento de turbinas de gas.

### ***Calefacción e Iluminación***

Los aceites de mayor peso producidos a base del petróleo son usados en redes de calefacción de oficinas, tiendas y viviendas. También se suele usar el petróleo en la producción de energía eléctrica.

### ***Lubricantes***

Todos los lubricantes y grasas usados por las maquinarias de transporte e industria son fabricados en base al petróleo.

El petróleo también es usado en la agricultura para la fabricación de fertilizantes, la creación de plásticos y neumáticos, la producción de productos farmacéuticos, colorantes, detergentes y productos químicos usados como materia prima en distintas industrias.

### **Proceso de Explotación Petrolera**

Para realizar la extracción de petróleo se deben tener en cuenta características de la zona de perforación y en base a esto plantear las posibles medidas para la eficiente recolección de dicho material. Para que un pozo pueda iniciar su producción, es necesario realizar la perforación de la tubería de revestimiento hasta la profundidad a la que se encuentra el petróleo. La sustancia fluye por los orificios y su extracción se realiza por medio de una tubería de diámetro menor denominada “tubería de producción”. El sistema de producción de un pozo puede ser por flujo natural, en el cual el petróleo sale a la superficie por sí solo debido a la presión subterránea, o mediante levantamiento artificial, en el cual se extrae por medio de un bombeo mecánico, ya

que, la presión subterránea no es suficiente para hacer ascender el petróleo. (ECOPETROL, 2014)

Los pozos se clasifican en exploratorios o pozos de desarrollo. Se denominan exploratorios a aquellos pozos que tienen como objetivo el descubrimiento de nuevos yacimientos; mientras que los de desarrollo son aquellos que tienen como finalidad la extracción de la sustancia de un yacimiento previamente descubierto. Los pozos exploratorios pueden categorizarse como: A3, A2 y A1. Un pozo de categoría A3 es aquel que se perfora en una zona desconocida con el objetivo de establecer la existencia de petróleo y/o gas. Uno de categoría A2 es aquel que se perfora para conocer la profundidad a la que se encuentra el yacimiento. Por último, uno de categoría A1 es aquel que se perfora para delimitar el yacimiento. (Secretaria Tecnica Nacional de Colombia, 2017)

En Colombia los pozos construidos están entre los 800 y 7.000 metros de profundidad, el tiempo promedio para la perforación de estos es de dos a doce meses, la etapa de exploración del proyecto toma de uno a cinco años y el costo de perforación puede variar entre \$1,7 millones y \$150 millones de dólares. Todo esto depende de la región y su comunidad aledaña, la complejidad operacional y los permisos ambientales. (ECOPETROL, 2014).

Los proyectos de explotación petrolera pueden dividirse en las siguientes etapas:

### ***Upstream***

Esta etapa comprende las actividades de contratación, exploración, perforación y extracción. También se determinan los métodos y aspectos técnicos para la extracción del mineral y se tramitan las licencias ambientales necesarias. (Secretaria Tecnica Nacional de Colombia, 2017)

**Exploración.** Según Berasategui y Malagón (2021), se realizan estudios de afloramientos de petróleo líquido o gas condensado en las rocas, además del afloramiento de agua salada en la cuenca de estudio. Por lo general el afloramiento se nota en grebas, calizas y areniscas impregnadas de petróleo, estas rocas han ascendido a la superficie por levantamientos ecológicos o erosión de estratos superiores desde reservorios subterráneos originales, aunque dichos afloramientos aseguran la existencia de petróleo en la zona, no aseguran la existencia de grandes yacimientos. Durante la exploración se suele hacer uso de prospecciones que sirven como indicadores de posibles yacimientos de hidrocarburos. Dentro de estas tenemos:

***Prospecciones Magnetométricas.*** Mediante la medición de variaciones en el campo magnético de del subsuelo, se localizan rocas sedimentarias con propiedades magnéticas menores a rocas adyacentes.

***Prospecciones Fotogramétricas Aéreas.*** Mediante análisis fotográficos aéreos que suministran capturas tridimensionales del terreno, se determinan las formaciones geológicas con posibles yacimientos de petróleo y/o gas natural.

***Prospecciones Gravimétricas.*** Se basan en mediciones de las variaciones de la gravedad en la superficie terrestre, dichas variaciones son analizadas y pueden dar evidencia de estructuras geológicas constituidas por yacimientos.

***Prospecciones Sísmicas.*** Se realiza una medición de las vibraciones producidas por estructuras subterráneas ante la detonación de explosivos en agujeros pequeños. Este proceso puede advertir de la existencia de yacimientos y es método más utilizado en la actualidad.

Aunque las exploraciones geológicas pueden dar indicios de la existencia de un yacimiento petrolero en una zona de estudio, la única manera de probar la existencia de dicho mineral es mediante la construcción de pozos de exploración.

**Perforación.** Luego de realizadas las actividades de análisis geológico de la zona se procede a la perforación de pozos exploratorios. Dentro de estos se tienen los siguientes:

**Pozos Exploratorios.** Estos son pozos perforados en zonas donde anteriormente no se han hallado yacimientos de petróleo.

**Pozos de Descubrimiento.** Estos son pozos son aquellos donde se descubren yacimientos petroleros.

**Pozos de Delimitación.** Estos pozos son perforados para delimitar un yacimiento luego de su descubrimiento.

**Pozos de Valoración.** Estos pozos se reconstruyen para buscar formaciones de petróleo o gas cercanas al yacimiento previamente descubierto.

También se suele denominar pozo seco a aquellos pozos donde hay cantidades escasas o inexistentes de petróleo o gas. Luego de establecer que existencia de un yacimiento apto para la producción se perforan los pozos de desarrollo, estos tienen como objetivo producir petróleo y gas, su cantidad y tamaños varían de acuerdo a al yacimiento.

Dentro de los pozos de desarrollo tenemos:

**Pozos de Inyección.** Estos pozos bombean agua, aire, gases o productos químicos al yacimiento presente en campos de producción con el fin de conservar la presión o mover el petróleo a los pozos de producción.



**Pozos de Servicio.** Estos pozos se utilizan para la colocación de accesorios y cableado, así como su retiro y rehabilitación. También se usan para la evacuación subterránea de las aguas saladas que se separan del crudo.

**Pozos de Geopresión y Geotérmicos.** Estos pozos generan agua a presiones de 7000 psi y temperaturas de 149° aproximadamente, las cuales pueden contener hidrocarburos. El agua es convertida en vapor que se libera a atmosfera por la fuga o rotura.

Otros métodos para la extracción de petróleo de formaciones rocosas son la acidificación y la fracturación.

**Acidificación.** Es un proceso usado para mejorar en un pozo el rendimiento mediante el bombeo de ácido a un yacimiento productor, su finalidad es habilitar canales de flujo mediante las reacciones producidas por químicos y el terreno. En los inicios de este método se usó ácido clorhídrico, actualmente se añaden diferentes sustancias con el fin de moderar su reacción, para así evitar la formación de emulsiones o corrosiones. (ACP, 2017)

**Fracturación.** Este método consiste en la inyección de agua a alta presión para generar pequeñas fracturas en las rocas. Una vez es completado el proceso se inicia la producción, en la cual no se tendrán que realizar nuevamente estimulaciones hidráulicas. (ACP, 2017)

**Equipos de Perforación Rotatoria.** Según ECOPETROL (2014), los elementos principales con los que cuenta el sistema de perforación rotatoria son:

**Torre.** Estructura fabricada a base de metal en la que se concentran los trabajos de perforación.

**Tubería.** Conducto de acero que se une a otro a durante la perforación. Cuando se presentan varias tuberías conectadas entre sí, se denomina sarta de perforación. El tubo inicial cuenta con una broca.

**Broca.** Herramienta que realiza la perforación en el subsuelo.

**Malacate.** Herramienta que envuelve y desenvuelve una cuerda de acero con la que se eleva y desciende la sarta de perforación.

**Sistema de Lodos.** Es una sustancia preparada y almacenada, que se bombea e inyecta de manera permanente dentro de la sarta, tiene como objetivo lubricar y mantener fría la broca, sujetar la pared del pozo y expulsar el material excavado a la superficie.

**Sistema de Cimentación.** Por medio de este sistema se realiza la preparación e inyección de cemento especial que tiene como propósito la unión de las tuberías de acero de revestimiento con las paredes del pozo.

**Motores.** Es el conjunto de sistemas que proporcionan la fuerza motriz necesaria para la perforación.

**Preventoras.** Es un conjunto de válvulas que se instalan en la boca del pozo para evitar el brote de gas o petróleo, que pueda afectar los demás equipos, en ambiente o las personas.

Para la realización de perforaciones en subsuelo marino, generalmente se sigue el mismo procedimiento, solo que se trabaja sobre plataformas ancladas al suelo que sostienen los equipos.

**Producción.** Berasategui y Malagón (2021), señalan que la producción contempla el recorrido que sigue el petróleo desde el yacimiento, su paso por la tubería de producción y posterior llegada a la superficie ya sea naturalmente o por levantamiento artificial. La producción petrolera se lleva a cabo por medio del desplazamiento mediante el uso agua o el gas y se le denomina recuperación. Se puede clasificarse como primaria, secundaria o terciaria.

**Recuperación Primaria.** En este proceso solo se emplean las fuerzas de impulsión naturales del yacimiento para la recuperación de los hidrocarburos. La Presión es normalmente generada por el gas disuelto en el petróleo o si existe, el gas atrapado sobre el petróleo y el agua presente bajo el mismo.

**Recuperación Secundaria.** En este procedimiento se inyecta gas y se denominada “empuje de gas” o agua denominada “inundación”, al pozo para producir una presión de empuje artificial.

**Recuperación Terciaria.** Esta puede ser realizada de tres maneras distintas. Por la inyección de vapor, que aumenta la temperatura del petróleo y facilita su flujo. Por la inyección de aire similar a la inyección de agua. Finalmente, por desplazamiento miscible, el cual mejora la inyección de agua al reducir la tensión superficial del petróleo crudo. Inicialmente se lleva a cabo la inyección del líquido soluble en el crudo, luego se inyecta otro líquido que desplaza la mezcla hacia el pozo de producción, por lo general se usa agua espesada.

Luego de extraído el petróleo de los yacimientos, es bombeado hasta los patios de tanques, donde se recolecta y almacena toda la producción para posteriormente es tratada, eliminando el gas, agua y sales presentes.

### ***Midstream***

Esta etapa comprende las actividades de transporte de crudo hacia las refinerías o puertos para su exportación. (Secretaria Tecnica Nacional de Colombia, 2017)

**Transporte.** El transporte de crudo de los yacimientos hacia las refinerías se realiza por:

**Vía Terrestre.** Mediante el uso de tanques de ferrocarril o camiones.

**Vía Marítima.** En buques petroleros.

**Oleoductos.** Mediante tuberías de 30 a 60 centímetros de diámetro, con estaciones que lo bombean y lo calientan para reducir su viscosidad.

### ***Downstream***

Esta etapa comprende las actividades de refinación del crudo y la comercialización. Los principales productos producidos son: gasolina, gas licuado de petróleo, diésel, asfaltos, combustóleo, jet fuel, coque, aquilato. (Secretaria Tecnica Nacional de Colombia, 2017)

**Refinado.** El petróleo crudo no cuenta con aplicaciones directas, por esto es separado en fracciones con distinta volatilidad, aprovechando sus características. Luego de su extracción se somete a un tratamiento de refinado. El tipo y cantidad de procesos de refinación depende del producto que se desee fabricar, también se debe tener en cuenta que el balance entre los productos no debe permitir la acumulación de uno de ellos en la refinería.

Los procesos de refinación a los que se somete el petróleo se pueden clasificar en: destilación (Atmosférica y a vacío), extracción de disolventes, adsorción de gases de refinería (H<sub>2</sub>S), cristalización, adsorción y separación con membranas.

**Comercialización.** Esta etapa comprende la venta a nivel nacional e internacional del petróleo y/o productos de refinación.

El mayor desperdicio generado durante la extracción de hidrocarburos en un pozo, es el agua. Continuamente se manejan grandes cantidades de agua con enorme contenido de sales, metales pesados, hidrocarburos y sólidos disueltos o suspendidos. Se suele denominar esta agua como salmuera de yacimiento petrolífero o agua producida. A medida que se reduce la presión por la extracción, se producen movimientos en el agua presente en el yacimiento que alteran el contacto petróleo/agua. Estas variaciones hacen que el agua alcance pozo y salga en la producción. En algunos casos se suele inyectar agua de forma intencional en los yacimientos para mantener la presión e impulsar el petróleo hacia el pozo. Los pozos de extracción de gas producen agua en cantidades muy inferiores a los de petróleo, ya que, al hallarse comprimido el gas, no se puede hacer inyección de agua. (ARPEL, 2010)

Durante la perforación de pozos también se generan aguas residuales correspondientes a los fluidos usados en el proceso. Para garantizar el correcto funcionamiento del taladro perforador se deben suministrar fluidos aceitosos con aditivos químicos denominados lodos de perforación. (Camacho, 2020)

## **Base Teórica**

### **Disposiciones para la Exploración y Explotación de Hidrocarburos**

Las disposiciones que establece el estado para llevar a cabo actividades relacionadas con la producción de hidrocarburos se establecen en la resolución 18-1495 de 2009.

#### ***Resolución 18-1495 de 2009***

Por medio de esta se establecen los lineamientos para realizar actividades exploratorias y de explotación en yacimientos convencionales para la obtención de hidrocarburos, aumentando su recuperación final y evitando su desperdicio, siendo actividades reguladas por el Ministerio de Minas y Energía, MME.

**Exploración.** Previo al inicio de los trabajos exploratorios el contratista deberá notificar al MME, los objetivos, coordenadas geográficas, cronograma de actividades y demás requisitos especificados en Título II de la resolución 18-1495 de 2009. Cualquier cambio realizado en los documentos previamente mencionados también debe ser notificado al MME.

#### **Perforación.**

**Permiso Para Perforar.** Para comenzar a perforar un pozo, primero debe realizarse la solicitud y obtención la autorización completando el formulario 4 mencionado en la resolución 18-1495 de 2009. Los permisos tienen validez por 3 meses desde la fecha de inicio de perforación prevista. Los permisos son válidos por 3 meses desde la fecha de inicio de perforación. Si la perforación no comienza en el transcurso de este periodo, el contratista tiene 30 días para justificar la situación y generar la renovación del permiso.

Los permisos para perforar uno o más pozos de desarrollos, pueden solicitarse y obtenerse por medio de un único proceso completando el formulario 4 y presentando un plan de perforación global.

**Verificaciones.** Para operaciones realizadas en tierra después de instalada la subestructura y operaciones desarrolladas en zonas de agua y costeras después de instalada la plataforma, se deberá informar con 3 días de anticipación al MME. En caso de ser necesario, realizara una visita para comprobar el estado técnico de los equipos instalados y la ubicación del pozo, levantando un acta y dado el caso que no se presenten observaciones o recomendaciones que requieran atención inmediata, la perforación puede comenzar. En caso de que se formulen observaciones, el ministerio puede ordenar la suspensión de los trabajos si el contratista no hacer las correcciones necesarias. Finalmente, si el Ministerio no realiza la visita, el contratista puede dar inicio a la perforación sin perjuicio de las observaciones de las posteriores visitas.

**Suspensión y Revocación del Permiso.** El MME puede suspender los permisos de perforación e imponer multas, si determina que la seguridad durante los trabajos no es adecuada, o si se modifican los requisitos exigidos ya aprobados en el formulario 4.

**Prohibición.** La norma establece casos específicos donde no se permite la realización de perforaciones de poca profundidad por su distancia a elementos específicos mencionados en el Artículo 15 del Capítulo 1 del título III Perforación, de la resolución 18-1495 de 2009.

**Programa de Perforación.** La perforaciones deberán realizarse de acuerdo al plan aprobado el MME, en caso se realizar algún cambio debe ser actualizar y ser aprobado.

**Informes.** Durante la perforación de pozos, se deben presentar informes al MME, que contengan la información presentada en el Artículo 17 del Capítulo 1 del Título III Perforación, de la resolución 18-1495 de 2009.

### **Explotación.**

**Inicio de explotación.** Para dar inicio a la explotación el contratista tiene la responsabilidad de presentar lo establecido en el Artículo 37 del Capítulo 1 del Título V Periodo de explotación, de la resolución 18-1495 de 2009 y debe ser aprobado el MME. Una vez esté instalado se llevará a cabo la verificación de que todo corresponda al diseño previamente aprobado, en caso contrario no se dará inicio el proceso exploratorio.

### **Producción.**

**Requerimientos para la Producción.** El MME establece los requerimientos para el inicio de la producción en el Artículo 38 del Capítulo 2 del Título V Periodo de explotación, de la resolución 18-1495 de 2009.

**Pruebas de Pozos.** Todos los pozos productores deben someterse a prueba al menos una vez al mes, como mínimo 6 horas de duración. Los datos obtenidos deben ser reportados al MME mensualmente en los formularios 16 y 25 mencionados en la resolución 18-1495 de 2009.

**Trabajos Posteriores a la Terminación.** Las actividades para la estimulación, reparación o fondo de pozo, instalar o cambiar un sistema de levantamiento artificial, trabajos de reacondicionamiento que modifiquen el estado actual de un pozo o yacimiento, o abandono requiere del permiso del MME, que se solicita a través del formulario 7 mencionado en la resolución 18-1495 de 2009.



## **Terminación de Pozos**

***Programa de Terminación Oficial.*** Para los pozos exploratorios, los programas de prueba y terminación se envían al MME para la aprobación previa. Para los pozos de desarrollo y evaluación, se presenta en el formulario 4, y una vez completado el pozo, se presentará el formulario 6 mencionado en la resolución 18-1495 de 2009, dentro de los próximos 30 días del calendario al MME.

***Cambios en la Terminación.*** El cambio en la terminación de un pozo, deberá ser presentado mediante el formulario 7 con 15 días calendario de anticipación al MME. 15 días luego de concluidas la obra de debe presentar el formulario 10, ambos formularios mencionados en la resolución 18-1495 de 2009.

***Terminación Múltiple.*** Si un pozo se completa en forma múltiple deberá informarse por medio del formulario 11 mencionado en la resolución 18-1495 de 2009.

***Tubería de Revestimiento Usada en la Perforación de Pozos.*** Los tubos de revestimiento deben estar aprobados el MME después de ser inspeccionados y certificados por medio de la verificación de integridad otorgada por una compañía profesional con licencia para ese fin.

***Seguridad de las Tuberías de Revestimiento y Producción.*** Las tuberías usadas para revestir y producir durante la perforación y terminación del pozo se deben diseñar para soportar las fuerzas de colapso, tracción y presiones internas en condiciones previstas.

***Tubería de Revestimiento de Superficie en Presencia de Acuíferos.*** Dado el caso que se atraviesen cuerpos de agua dulce durante la perforación, se deberá cementar al menos 50 pies por debajo del límite inferior del agua.

***Terminación de Pozo en Hueco Abierto.*** Los pozos no pueden quedar abiertos, a menos que el MME lo permita.

***Pozo de Reemplazo.*** Si, se debe el abandonar el pozo por daños mecánicos antes de que alcance su propósito original, y se decide iniciar rápidamente otro para reemplazarlo o mover la ventana lateral para cumplir el propósito deseado, esto se puede hacer dando previa notificación por escrito o en su defecto por otro medio, al MME, seguida de la renovación del formulario 4.

***Toma de Registros Eléctricos.*** Todos los pozos deben contar con registros electrónicos especificados en el Artículo 26 del Capítulo 2 del Título 3 Perforación.

***Prueba Inicial.*** Al finalizar la actividad perforatoria y de desarrollo del pozo, se realizarán las primeras pruebas operativas, las cuales son necesarias para comenzar a presentar un programa al MME. La información recolectada en prueba se presentará en el formulario 6, para la prueba de pozos de tipo exploratorio, de avanza o de desarrollo para yacimientos compartimentados se debe completar el formulario 8, ambos formularios mencionados en la resolución 18-1495 de 2009.

Durante los procesos de exploración y desarrollo el MME realizará visitas para garantizar las condiciones de las instalaciones destinadas a la producción. En función de los resultados hace un acta, y si no hay comentarios o sugerencias que deban ser atendidos inmediatamente, se puede iniciar la prueba. Si el Ministerio realiza observaciones, pero el contratista no toma acciones correctivas necesarias, puede ordenar la suspensión de las operaciones.

***Análisis Físicoquímicos.*** Las muestras de las sustancias extraídas del pozo serán analizadas en cuanto a propiedades físicas y químicas, la información obtenida se incluirá en el formulario 6.

***Muestras de Corazones.*** Las muestras de corazones deben tomarse de cualquier reservorio encontrado. Contando con previa aprobación por parte del MME podrá suspenderse por condiciones operativas, económicas o mineras.

**Taponamiento y Abandono de Pozos.**

***Condiciones para el Taponamiento y Abandono.*** Si un pozo se perfora y resulta seco o debe abandonarse debido a problemas mecánicos, el pozo se tapa y demuele rápidamente. En este caso, el nuevo programa debe ser actualizado y aprobado por el MME previamente a la implementación de estas actividades.

Se debe seguir el mismo procedimiento si el pozo ha estado inactivo por más de seis meses sin una buena razón.

***Suspensión de Pozos en Perforación.*** Para dejar de perforar un pozo, es necesario solicitar el permiso del MME y enviar un informe que confirme tal decisión y muestre un plan de acción. La suspensión se concede por tres meses y puede ser renovada.

***Suspensión Temporal de Pozos Terminados.*** El MME podrá conceder permiso para suspender la perforación o terminación de pozos por un plazo de hasta 180 días, con posibilidad de una prórroga si concurre justa causa.

Los pozos suspendidos deben estar debidamente asegurados mediante la instalación de tapones y/o válvulas de compuerta sobre o bajo tierra. Una vez que un pozo es abandonado o reabierto y terminado, se debe completar en formulario 6.

***Permiso de Abandono de Pozos Oficialmente Terminados.*** Previo a iniciar el proceso de disposición en un pozo terminado de manera oficial, se debe solicitar un permiso por escrito al MME completando el formulario 7.

**Utilización de Acuíferos.** Si se descubre un recurso de agua dulce y el pozo deba abandonarse, el trabajo se realizará a fin que se permita su uso futuro como pozo de agua.

**Reglamentación del Taponamiento.** Las pruebas necesarias para el taponamiento final o provisional de pozos es establecido por MME.

### **Impactos Ambientales de la Industria Petrolera**

La realización de actividades de exploración y explotación generan impactos en los siguientes medios:

#### ***Medio Biótico***

La adecuación de las zonas para extracción de hidrocarburos normalmente contempla actividades como deforestación y remoción de la capa vegetal. La pérdida de hábitats de distintas especies es uno de los primeros impactos que se generan durante dichas actividades, pudiéndose notar la pérdida y/o desaparición de grandes masas boscosas y poblaciones de plantas de la zona. La fauna también es afectada por las labores de explotación, siendo muy común la pérdida de ejemplares de una especie, la generación extinciones locales y la pérdida de variabilidad genética de poblaciones pequeñas. El ruido y la luz también pueden generar alteraciones en el comportamiento de animales e interferir en las rutas migratorias de distintas especies. En suelos de bosque tropical, el suelo está lleno de microorganismos encargados de la fijación del nitrógeno y el Fosforo, los cuales desaparecen cuando la capa vegetal es removida. (Bravo, 2007)

Los hidrocarburos no permiten el libre intercambio gaseoso con la atmosfera, lo que produce reacciones físico-químicas, como la penetración y la evaporación, que, de acuerdo con las características del hidrocarburo, su temperatura, la humedad y textura del suelo producen

graves efectos ambientales sobre la flora y fauna. Muchas de estas sustancias pueden acumularse en el suelo causando retraso en el crecimiento vegetal y alteraciones en los microorganismos del suelo. (Velásquez, 2017)

### ***Medio Abiótico***

Al remover la capa vegetal de las zonas de extracción, el suelo queda en contacto directo con los agentes de intemperie, lo que genera erosión, sedimentación y patrones de flujo alterados que pueden además afectar fuentes hídricas cercanas. La construcción de vías de acceso, instalación de campamentos, establecimiento de la red de oleoducto y demás actividades de la industria, aumenta la expulsión de partículas al aire aumentando la sedimentación y la erosión. Las fuentes de agua cercanas a la zona de extracción también pueden verse afectadas por lodos de perforación, aguas de producción, lluvias acidas o por derrames accidentales de crudo. Cuando las aguas de producción entran en contacto con agua natural producen la muerte de microorganismos por el aumento en la salinidad y la presencia de contaminantes, estas aguas también pueden infiltrarse en el suelo y contaminar acuíferos. (Bravo, 2007)

El uso del suelo durante los procesos de perforación y/o extracción de petróleo, obedece a las actividades de instalación, movilización y funcionamiento de equipos de perforación, además contempla las actividades como el vertimiento y riego de vías exteriores a la zona, que generalmente se realizan con el fin de reducir la emisión de polvo producto del tránsito de vehículos. El agua es el recurso que más de afecta durante las etapas de producción de petróleo, este es usado para la preparación de lodos y lavado de equipos, debe ser el recurso principal a disponer. La perforación genera residuos tanto de carácter doméstico como cartón, papel, latas, textiles, plástico, vidrios y residuos orgánicos provenientes de cocina, dormitorios y oficinas de

trabajadores, y de carácter industrial como cortes de perforación impregnados con lodo, chatarra, químicos, bacterias y canecas. (Murillo, 2017)

A lo anterior se le suma el elevado uso de maquinaria con motores de combustión interna que emiten grandes cantidades de contaminantes al aire. La combustión de gas natural como al extraer petróleo, provoca emisiones anuales superiores a los 350 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, así como la expulsión de carbono negro y metano, los cuales tienen impacto en el medio ambiente. (Banco Mundial, 2018)

### ***Medio Antrópico***

Algunos de los impactos a nivel antrópico de la extracción de petróleo son el aumento en las oportunidades laborales, aumento en los ingresos de los dueños de los predios de exploración, así como la posibilidad de mejoramiento de las vías por la necesidad de tránsito de maquinaria, todo esto se traduce en el aumento ingresos y mejoramiento de la calidad de vida en la comunidad. En muchos casos estos impactos positivos se ven opacados por las malas prácticas de las industrias petroleras, como es la corrupción, la alteración desmedida del patrimonio natural, cultural y paisajístico, y la poca atención a las comunidades presentes este. (Vargas, 2020)

Las alteraciones en la actividad petrolera de una zona pueden tener impacto en el desarrollo de la comunidad. Algunos de los impactos más comunes a nivel social son la generación de conflictos internos, ejecución de actividades sociales por parte de los entes gubernamentales, el cambio de rol de organizaciones comunitarias, alteración en el proyecto de vida, aumento en la inseguridad y la densificación de la población. El ruido y vibraciones generados por el desarrollo de actividades petroleras también hacen parte de los posibles impactos que se pueden producir en las personas. Este genera el desplazamiento de especies

usadas como fuente de alimento por comunidades indígenas que practican la caza artesanal, además las captaciones y vertimientos no controlados reducen el recurso de agua adecuado para consumir. (Murillo, 2017)

### **Importancia del Tratamiento de Aguas Contaminadas de Petróleo**

Las aguas residuales producidas durante la extracción de petróleo pueden generar contaminación en el ecosistema debido a filtraciones accidentales o vertimientos. Durante los últimos años esta actividad ha generado una liberación de contaminantes en el medio ambiente capaces de generar afectaciones en la fertilidad de los suelos, la reducción en su humedad y/o nutrientes, alteraciones en su nivel de pH y salinidad. La industria petrolera en Colombia ha sido una parte fundamental de la economía del país durante los últimos años, sin embargo, la contaminación del ecosistema durante las distintas etapas de la producción es cada vez mayor, generando impactos en los seres vivos y recursos que se encuentran en contacto con esta. (Velásquez, 2017)

La necesidad que tienen los países frente a los recursos energéticos, sumado a la gran importancia del hallazgo de nuevas fuentes para producir hidrocarburos, han hecho que se intensifiquen las actividades exploratorias con el fin de contar con nuevas reservas para el abastecimiento energético y crecimiento económico. (Murillo, 2017)

Antes de realizar cualquier tratamiento a las aguas de producción de hidrocarburos, estas suelen contener grandes cantidades de partículas de petróleo suspendidas, por lo general también contienen cantidades variables de sales y gases disueltos, sólidos o metales pesados en suspensión y suelen tener niveles de radiación altos por presencia de estroncio o radio. En algunos casos estas aguas cuentan con una apariencia clara, lo que dificulta diferenciar una limpia de una contaminada. (ARPEL, 2010)

Durante el año 2016 se estimó que para producir un barril de crudo se generaban alrededor 12 barriles de agua residual, lo que permite evidenciar la gran cantidad de fluido que se contamina por la industria petrolera. (Ecopetrol, 2016)

En el año 2020 la captación de agua por parte de Ecopetrol representó el 0,003% de la oferta de agua superficial del país, siendo de aproximadamente 2 billones de metros cúbicos anuales. La mayor parte de este consumo se dio en actividades de refinación de crudo por la evaporación del agua debido a las altas presiones. (Ecopetrol, 2021)

### **Estabilizacion de la Materia Organica Mediante Lagunas**

Las lagunas de estabilización son depósitos contruidos en excavaciones no profundas en el suelo, donde se realiza el almacenamiento del agua residual durante un periodo determinado para tratarla a través de actividad bacteriana. (Martínez, 2003)

La biodegradación microbiológica es muy efectiva para tratar distintas sustancias de origen petrolífero disueltas en medios como el suelo o agua, por lo que se presentan como un método eficiente para disminuir la contaminación presente en las aguas producidas. (Digitalstorm, 2010)

### **Tipos de Lagunas**

#### ***Lagunas Aeróbicas***

En este sistema se degrada la materia orgánica en un entorno con gran cantidad de oxígeno disuelto debido a la acción fotosintética de las algas y los vientos predominantes. Con el fin de mantener las condiciones aeróbicas de la laguna surge la necesidad de generar agitaciones en toda la masa liquida, la cual también impide que aumente la turbiedad y la entrada de la luz solar en el fluido. Además, se debe implementar un revestimiento en el suelo para evitar el



crecimiento de vegetación y el desarrollo de insectos que pueden entorpecer el mantenimiento.

Las lagunas de estabilización aeróbicas no son muy aplicadas por la necesidad de cumplir rigurosamente con las condiciones anteriormente mencionadas. (Vázquez, 2016)

### ***Lagunas de Aireación Artificial***

Estas son lagunas a las que se le provee oxígeno mediante aireadores mecánicos que toman e inyectan el aire a la laguna, ya que la cantidad de oxígeno suministrada por el medio ambiente no es suficiente. Su funcionamiento es similar al de las lagunas aeróbicas naturales. (Moret, 2014)

### ***Lagunas Anaeróbicas***

Estas lagunas por lo general ocupan una menor área respecto a otros tipos de lagunas, pero su mantenimiento resulta ser más costoso ya que periódicamente se deben retirar lodos digeridos y producen malos olores. La estabilización por medio de lagunas anaerobias se realiza por medio de bacterias en ausencia de oxígeno. La temperatura tiene un papel importante, siendo que a temperaturas altas se suele presentar una reducción en el tiempo necesario para el proceso de estabilización. (Vázquez, 2016)

### ***Lagunas Facultativas***

También denominadas lagunas de oxidación. En estas se pueden distinguir tres capas de descomposición: Una primera capa en la parte superior de la laguna con oxígeno disuelto en la que se encuentran bacterias aeróbicas. Una segunda capa en la zona intermedia de la laguna donde el contenido de oxígeno disuelto es variable. Una tercera capa en el fondo de la laguna donde no hay presencia de oxígeno disuelto, en esta se sedimenta gran parte de los sólidos suspendidos en el líquido. La eficiencia en la remoción de DBO de las lagunas facultativas está

entre el 75% y 90%. Además, se estima que la aplicación de este método presenta una mayor eficacia al tratar las aguas residuales con respecto a las plantas convencionales. (Vázquez, 2016)

## **Ventajas y Desventajas de las Lagunas**

### ***Ventajas***

- Costos bajos para la construcción, operación y mantenimiento.
- Facilidad de construcción y mantenimiento.
- Buena eliminación de materia orgánica y microorganismos.
- Absorción de cargas orgánicas y compuestos tóxicos.
- No presentan problemas de manejo y depósito de residuos sólidos.
- Uso del agua tratada en agricultura y acuicultura.
- Pueden ser usados como sistemas para la regulación de riego.

### ***Desventajas***

- Necesitan grandes extensiones de terreno para su construcción.
- No deben construirse en suelos arenosos por la infiltración y posible contaminación de mantos acuíferos.
- Algunas lagunas pueden generar malos olores.
- Su correcta operación es dependiente a las condiciones ambientales de la zona.
- La ubicación del sistema debe estar por lo menos a 500 metros de la zona urbana.
- Los efluentes descargados contienen grandes cantidades de algas que pueden ocasionar problemas al usarse para en el riego de cultivos.

## **Construcción de Lagunas de Estabilización**

### ***Consideraciones de construcción***

Vásquez, 2016 establece que para construir estanques para estabilización se deberían tener en cuenta:

#### **Ubicación.**

- Disponibilidad de áreas adecuadas para la construcción.
- Dirección de los vientos de la zona.
- Distancia de las zonas urbanas.
- Calidad del suelo.
- Topografía y posibilidad de inundaciones.

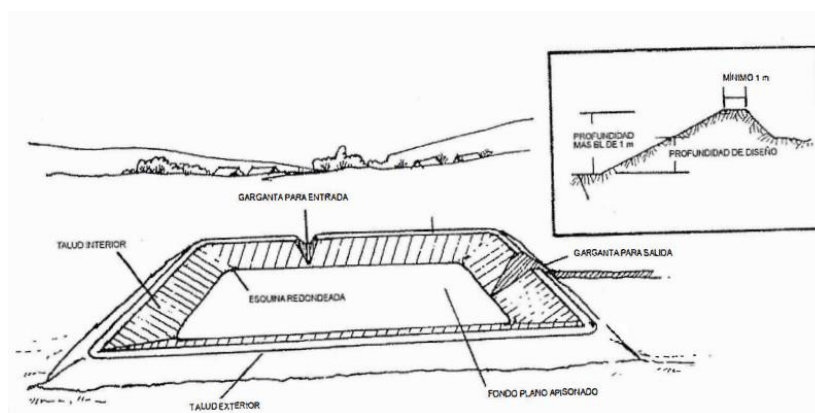
**Número de Unidades.** Por lo general la cantidad oscila entre una y cuatro unidades. La cantidad depende de la topografía del lugar y de la cantidad de sistemas de tratamiento a aplicar.

**Disposición de Unidades.** Se pueden disponer en paralelo o en serie si se quiere aumentar la eficiencia del sistema.

**Formas.** Presentan comúnmente una forma cuadrada o rectangular, con esquinas redondeadas para evitar la acumulación de espumas y flotantes.

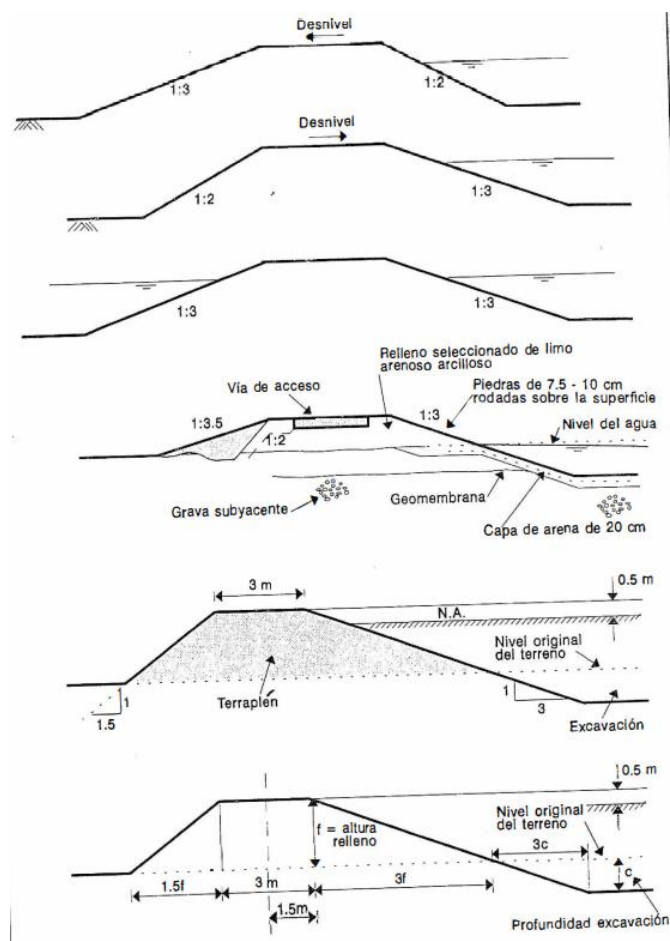
Romero, 2005 establece que las lagunas de estabilización deben presentar las siguientes características para su construcción.

### Ilustración 1. Excavación de Terraplenes de una Laguna



Nota. Tomada de, *Lagunas de estabilización de aguas residuales* por Romero, J., 2005

### Ilustración 2. Diques de Lagunas de Estabilización

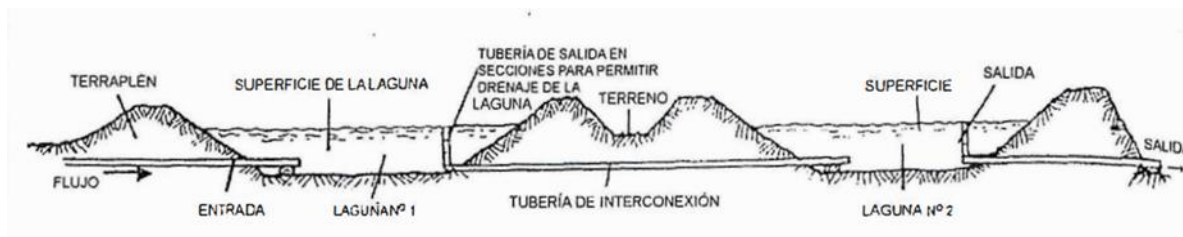


Nota. Tomada de, *Lagunas de estabilización de aguas residuales* por Romero, J., 2005.

**Diques.** La construcción de los diques anteriormente mostrados debe prevenir los efectos de erosión, especialmente entre los 0,3 metros tanto por encima, como por debajo del nivel agua. Esta protección puede lograrse por el uso de asfalto, concreto, telas plásticas, etc. Estos son diseñados para evitar la percolación del agua y el crecimiento de vegetación.

**Unidades de Entrada y Salida.** El objetivo de estas unidades es la distribución del agua dentro de las lagunas, esta debe ser uniforme y se debe prevenir la generación de un corto circuito. Por lo general se establece que la entrada se por el fondo a fin de que se deposite de manera sumergida el lodo, la tubería el elevada a unos 45 cm para evitar el taponamiento.

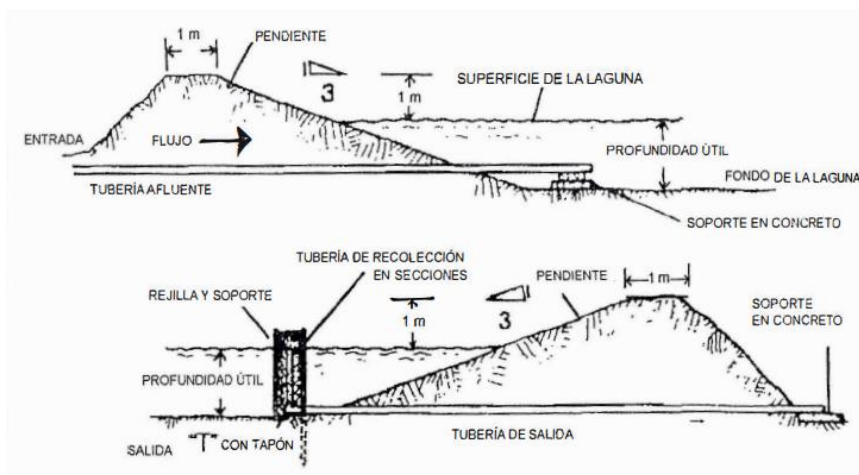
**Ilustración 3.** *Tubería de Interconexión de Lagunas*



*Nota.* Tomada de, *Lagunas de estabilización de aguas residuales* por Romero, J., 2005.

La unidad para la entrada del agua residual se debe localizar a la mayor distancia de la unidad de salida. En lagunas que presenten áreas superficiales superiores a 8 hectáreas, se deben establecer la distribución múltiple para que el agua presente velocidades uniformes desde la entrada hasta la salida, esto a fin de evitar cortocircuitos y la distribución de sólidos en una mayor área.

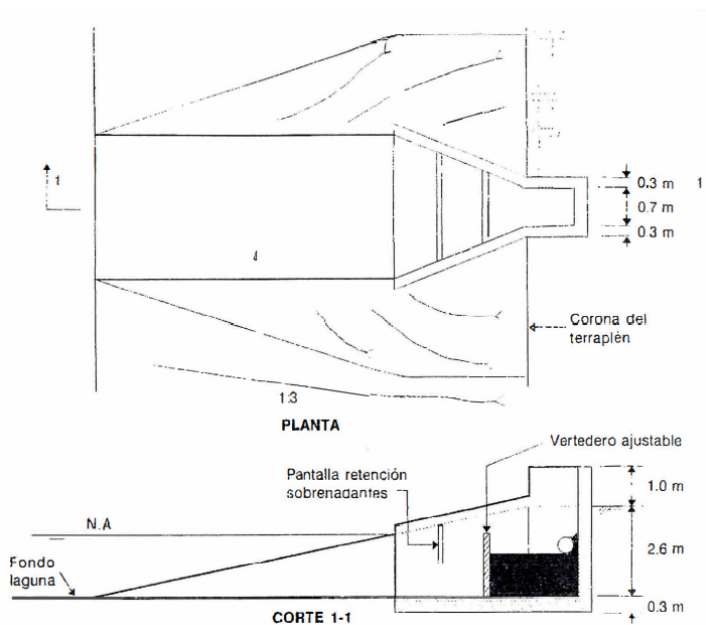
**Ilustración 4. Detalle de Entrada, Salida y Terraplenes**



*Nota.* Tomada de, *Lagunas de estabilización de aguas residuales* por Romero, J., 2005.

La unidad de salida del agua tratada debe ser en lo posible sumergida con el fin de impedir el flujo de sobrenadantes y biomasa, como se mencionó anteriormente en lagunas de gran tamaño es preferible adecuar varias unidades de salida.

**Ilustración 5. Unidad de Salida**



*Nota.* Tomada de, *Lagunas de estabilización de aguas residuales* por Romero, J., 2005.

### Norma de Vertimientos (Resolución 0631 de 2015)

Esta norma establece los parámetros a tener en cuenta para realizar el vertido de aguas residuales en alcantarillados y fuentes hídricas superficiales.

#### *Aguas Residuales con Hidrocarburos*

Además, establece los valores límites a tener en cuenta para realizar el vertido de aguas producidas tratadas por la extracción de hidrocarburos, como se muestra en la tabla 2.

#### Valores Límites Máximos Permisibles

**Tabla 2.** Valores Máximos Permisibles para el Vertido de ARnD asociadas con Hidrocarburos

| Parametro                                         | Unidades            | Exploración        | Producción         | Refino             | Venta y distribución | Transporte y almacenamiento |
|---------------------------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| <b>Generales</b>                                  |                     |                    |                    |                    |                      |                             |
| Ph                                                | Unidades de Ph      | 6,00 a 9,00        | 6,00 a 9,00        | 6,00 a 9,00        | 6,00 a 9,00          | 6,00 a 9,00                 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)                  | mg/L O <sub>2</sub> | 400,00             | 180,00             | 400,00             | 180,00               | 180,00                      |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) | mg/L O <sub>2</sub> | 200,00             | 60,00              | 200,00             | 60,00                | 60,00                       |
| Sólidos suspendidos Totales (SST)                 | mg/L                | 50,00              | 50,00              | 50,00              | 50,00                | 50,00                       |
| Sólidos sedimentables (SSED)                      | mg/L                | 1,00               | 1,00               | 1,00               | 1,00                 | 1,00                        |
| Grasas y aceites                                  | mg/L                | 15,00              | 15,00              | 15,00              | 15,00                | 15,00                       |
| Fenoles                                           | mg/L                | 0,20               | 0,20               | 0,20               | 0,20                 | 0,20                        |
| Sustancias activas al azul de metileno            | mg/L                | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte   | Análisis y reporte          |

|                                                    |      |                    |                    |                    |                    |                    |
|----------------------------------------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Hidrocarburos</b>                               |      |                    |                    |                    |                    |                    |
| Hidrocarburos totales (HTP)                        | mg/L | 10,00              | 10,00              | 10,00              | 10,00              | 10,00              |
| Hidrocarburos aromaticos policiclicos (HAP)        | mg/L | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |                    |
| BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)      | mg/L | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |                    |
| Compuestos organicos halogenados adsorbibles (AOX) | mg/L | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |                    |                    |
| Compuestos de fosforo                              |      |                    |                    |                    |                    |                    |
| Fosforo Total (P)                                  | mg/L | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |
| Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> )                  | mg/L | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |                    |                    |
| Compuestos de nitrógeno                            |      |                    |                    |                    |                    |                    |
| Nitratos (N-NO <sub>3</sub> )                      | mg/L | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |                    |                    |
| Nitrogeno amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )           | mg/L | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |                    |                    |
| Nitrogeno total (N)                                | mg/L | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |                    |                    |
| Iones                                              |      |                    |                    |                    |                    |                    |
| Cianuro total (CN)                                 | mg/L | 1,00               | 1,00               | 1,00               |                    |                    |
| Cloruros (Cl)                                      | mg/L | 1200,00            | 1200,00            | 500,00             | 250,00             | 250,00             |
| Fluoruros (F <sup>-</sup> )                        | mg/L | Análisis y repote  | Análisis y repote  | Análisis y repote  |                    |                    |
| Sulfatos                                           | mg/L | 300,00             | 300,00             | 500,00             | 250,00             | 250,00             |
| Sulfuros                                           | mg/L | 1,00               | 1,00               | 1,00               |                    |                    |



| Metales y metaloides                                                                                 |                           |                    |                    |                    |                    |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Arsénico (As)                                                                                        | mg/L                      | 0,10               | 0,10               | 0,10               |                    |                    |
| Bario (Ba)                                                                                           | mg/L                      |                    |                    |                    |                    |                    |
| Cadmio (Cd)                                                                                          | mg/L                      | 0,10               | 0,10               | 0,10               |                    |                    |
| Cinc (Zn)                                                                                            | mg/L                      | 3,00               | 3,00               | 3,00               |                    |                    |
| Cobre (Cu)                                                                                           | mg/L                      | 1,00               | 0,10               | 0,10               |                    |                    |
| Cromo (Cr)                                                                                           | mg/L                      | 0,50               | 0,50               | 0,50               |                    |                    |
| Hierro (Fe)                                                                                          | mg/L                      | 3,00               | 3,00               | 3,00               |                    |                    |
| Mercurio (Hg)                                                                                        | mg/L                      | 0,01               | 0,01               | 0,01               |                    |                    |
| Níquel (Ni)                                                                                          | mg/L                      | 0,50               | 0,50               | 0,50               |                    |                    |
| Plata (Ag)                                                                                           | mg/L                      |                    |                    |                    |                    |                    |
| Plomo (Pb)                                                                                           | mg/L                      | 0,20               | 0,20               | 0,10               |                    |                    |
| Selenio (Se)                                                                                         | mg/L                      | 0,20               | 0,20               | 0,20               |                    |                    |
| Vanadio (V)                                                                                          | mg/L                      | 1,00               | 1,00               | 1,00               |                    |                    |
| Otros parámetros para análisis y reporte                                                             |                           |                    |                    |                    |                    |                    |
| Acidez total                                                                                         | mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |
| Alcalinidad total                                                                                    | mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |
| Dureza calcica                                                                                       | mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |
| Dureza total                                                                                         | mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |
| Color - Real<br>(Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436nm, 525 nm y 620 nm) | m-1                       | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte | Análisis y reporte |

*Nota.* Tomado de Resolución 0631 de 2015, por Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015.

### **Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria del Petróleo**

En la industria petrolera existen actividades que generan aguas residuales, pero no necesariamente todas generan contaminación por hidrocarburos, por ejemplo, en la fase de exploración se generan aguas residuales domesticas que provienen de los campamentos.

Por otra parte, actividades como la perforación, extracción y refinado, generan aguas residuales de manera directa, es decir, durante el desarrollo de estas actividades se utiliza agua pura para el mejoramiento de la función de los equipos y se sabe que como consecuencia estas aguas son contaminadas por petróleo o residuos aceitosos. También, se pueden generar aguas residuales de manera indirecta en cuanto al transporte y comercialización, ya que, se pueden generar derrames de manera accidental.

A continuación, se realizará énfasis en las aguas residuales producidas por perforación, debido a que si se realiza la investigación para cada actividad se tendría que abarcar más temas que no son objeto de investigación. La fase de perforación se describe a continuación.

#### **Características de los Fluidos de Perforación**

Valbuena (2016), ha precisado acerca de los fluidos de perforación de manera específica en los siguientes párrafos:

Al perforar pozos petroleros, los fluidos utilizados permiten: controlar la formación de presión, retirar el corte, sellar las formaciones permeables, enfría y lubrica la barrena, transmite potencia hidráulica a las herramientas y barrena, y lo más importante, estabiliza y controla el pozo.

El sistema de fluidos de perforación está dividido en dos fases, la fase discontinua que la componen sólidos y la fase continua que la componen líquidos, a veces, se combina con una fase

gaseosa. Esta última parte puede ser causada por diseño o transporte de gas durante la perforación.

En la fase continua se clasifican en:

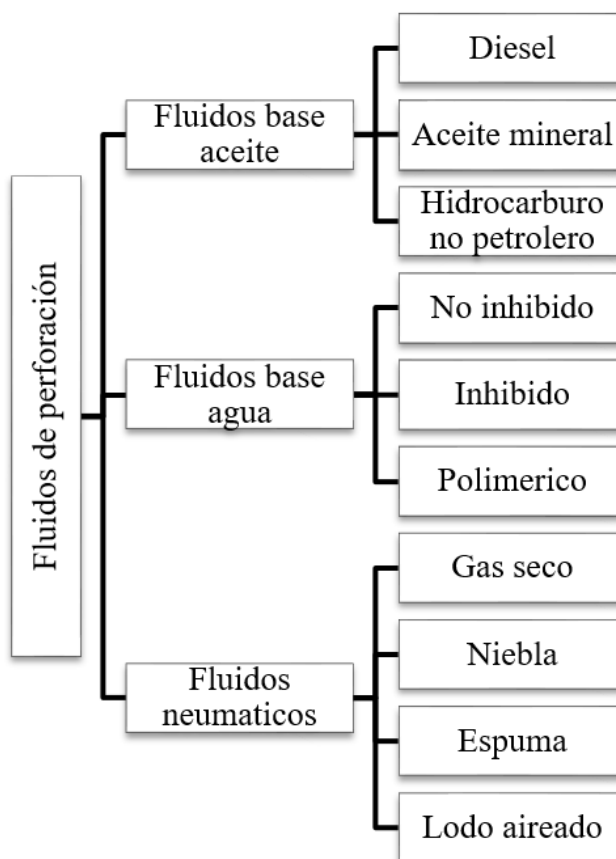
Gaseosos. El gaseoso es utilizado en las formaciones de rocas fracturadas debido ayuda con la remoción los cortes del pozo.

Acuosos. Los fluidos acuosos son los que más se utilizan en las actividades de perforación a nivel mundial, es el fluido producido a partir de aguas dulce y a veces salada, arcilla e inhibidores.

No acuosos. También llamados lodos a base sintético, se utilizan en condiciones de perforación difíciles (perforación en áreas salinas, lutita, condiciones muy calientes o frías), presentando una fase de aceite mineral, esteres biodegradable, olefinas, entre otros.

Cuando se diseña un fluido de perforación, en la primera etapa de planificación los especialistas consideran y analizan los tipos y métodos de fluidos para cada parte de los pozos, para así cumplir con los requisitos de densidad, estabilidad, temperatura, etc. Por lo general, el primer fluido utilizado para perforar es agua. Luego, el líquido cambia o desplaza por lodo inhibidor espesado a base de agua por reacción al aumento de temperatura, presión de formación y presencia de formaciones más difíciles a medida que se aumenta la profundidad. Para finalizar, se usa un fluido no acuoso.

**Ilustración 6.** Tipos de Fluidos de Perforación



*Nota.* Tomado de *manejo ambiental de la disposición final de los fluidos bases utilizados en la perforación de algunos pozos petroleros en Colombia*, de Marcela Ortiz Valbuena, 2016, <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/633/1/5131638-2016-2-GA.pdf>

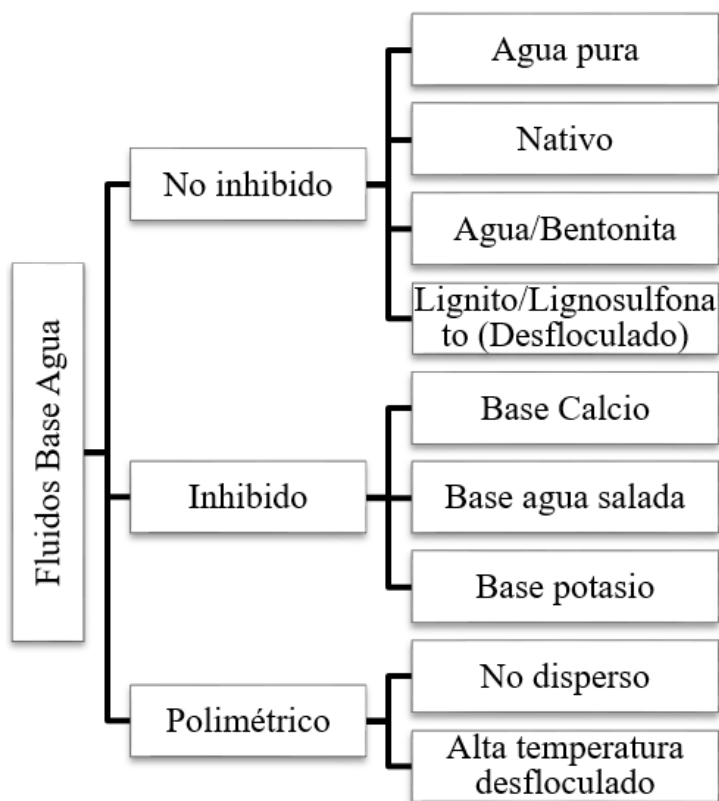
Una vez que el lodo regresa a la superficie, se realiza la medición de algunas propiedades de acuerdo al tipo de fluido utilizado, por lo general, incluyen densidad, tasa de filtración, contenido de fase continua y contenido sólido; posteriormente se hace el diseño de los programas de tratamiento de las próximas 12 a 24 horas y se realizan los ajustes apropiados según la condición del pozo. Este proceso ocurre porque las condiciones de la superficie afectan el fluido de perforación, las cuales varían a medida que continúa la perforación a causa del aumento en la temperatura y la presión. Además, el lodo tiene cambios químicos debido a los distintos fluidos de formación y tipos de roca. Por lo tanto, se ajustan los fluidos de perforación acorde con la

condición del pozo, se verifica el rendimiento y se realiza un ajuste en las características para lograr un ciclo continuo.

### ***Fluidos de Perforación Primera Sección***

Se puede calificar un fluido debido a elementos que lo conforman y el manejo que se le da a los lodos en la superficie. En la primera parte de la perforación se utilizan fluidos a base de agua, que es económico y fácil de preparación.

#### ***Ilustración 7. Tipos de Fluidos de Perforación Base Agua***



*Nota.* Tomado de manejo ambiental de la disposición final de los fluidos bases utilizados en la perforación de algunos pozos petroleros en Colombia, de Marcela Ortiz Valbuena, 2016.

**Fluidos Base Agua no Inhibidos.** Su principal uso se da en los lodos de inicio e incluyen arcilla natural o bentonita comercial adicionada. Puede contener defloculantes y/o dispersantes. Se dividen de la siguiente manera.

**Fluidos de Perforación de Agua Pura.** Son considerados como las mejores aguas para la perforación de formaciones rígidas y compactas, Para la producción se pueden utilizar dulce o salina, y se suele añadir soda cáustica o cal para moderar la corrosión.

**Fluidos de Perforación Nativos.** Se forman cuando el agua inyectada en el pozo se devuelve con los desechos naturales dispersos, lo que aumenta la viscosidad de los fluidos. Por eso es necesario realizarles una dilución para controlar el exceso de viscosidad.

**Fluidos de Perforación de Agua Bentonita.** Son fluidos de perforación con buen poder de corte y control de filtrado, esta es agua pura y su viscosidad se puede incrementar al agregar bentonita o polímero de relleno de bentonita, cal o carbonato de sodio.

**Fluidos de perforación de lignito/lignitosulfonatos.** Son estables a temperaturas de 325 °F (162.78 °C) y de acuerdo con el pH.

**Fluidos Base Agua Inhibidos.** Se utilizan para la perforación de arcillas hidratables o zonas contaminadas. Estos reducen la inflamación de la arcilla y proporcionan una barrera a los productos químicos como el sodio, el calcio y el potasio.

**Fluidos Inhibidos Base Calcio.** Se utilizan para operaciones de perforación con alta presencia de arcilla activa y son altamente resistentes a la contaminación.

**Fluidos Inhibidos Base Agua Salada.** Se utilizan para la perforación de áreas con contenido elevado de sal, ya sea para prevenir que las áreas sean arrastradas por el agua o porque el agua salda forma parte permanente del fluido.

**Fluidos Inhibidos Base Potasio.** Se utiliza en áreas que deben cerrarse para evitar cambios químicos en las arcillas a partir del intercambio de cationes de potasio con iones de sodio o calcio.

**Fluidos Base Agua Poliméricos.** Contiene polímeros más viscosos, que ayudan a controlar la filtración y proporcionar un control superior de la temperatura.

**Fluidos Poliméricos no Dispersos.** Se utiliza en zonas con condiciones difíciles y bajas tasas de penetración, aunque no funcionan bien en zonas con un largo intervalos de arcilla reactiva.

**Fluidos Poliméricos Alta Temperatura Desflocados.** Están diseñados para aumentar la estabilidad de los polímeros y mejorar su resistencia a la contaminación.

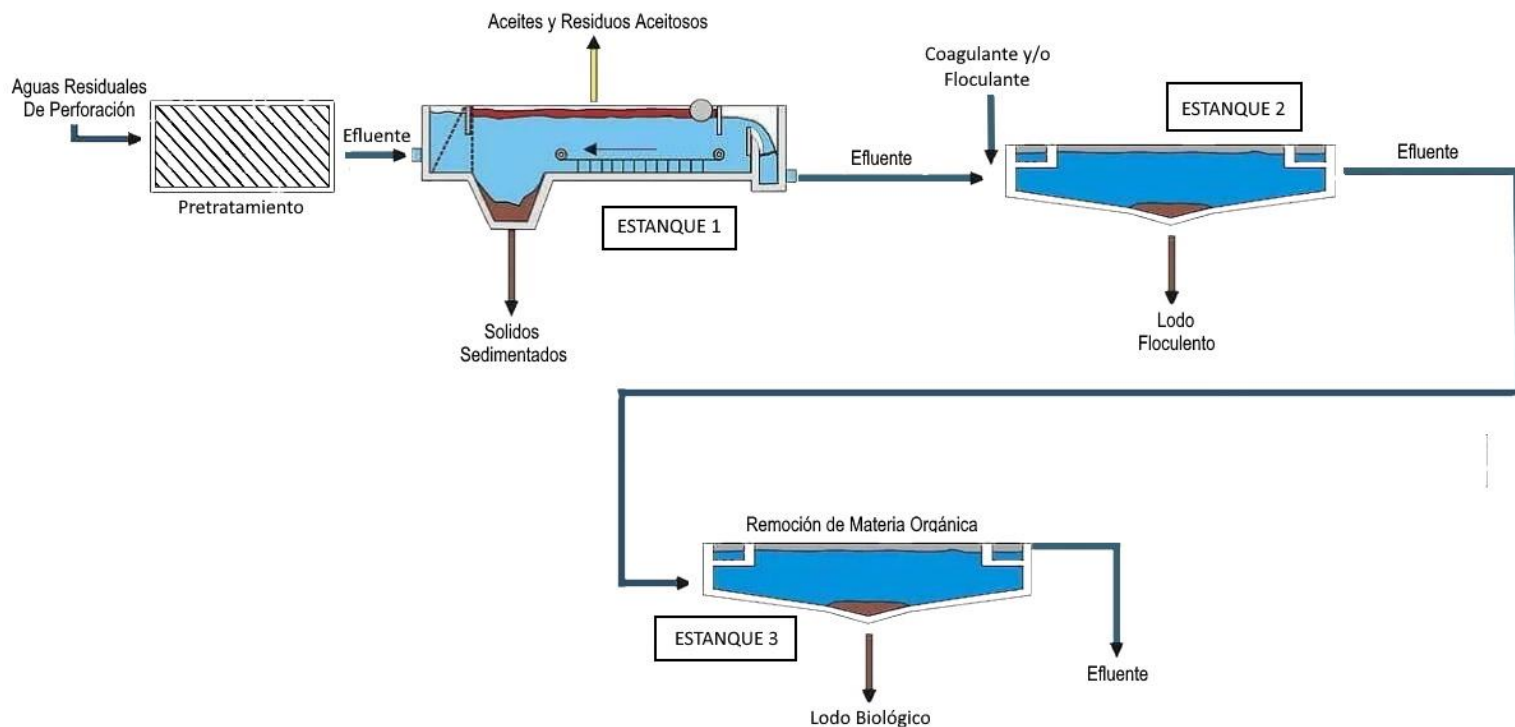
### **Etapas de Tratamiento de las Aguas de Perforación**

Para el tratamiento de las aguas residuales de la industria petrolera se utilizan lagunas o estanques y como el principal método a seguir para lograr la estabilización natural es mediante procesos físicos como la flotación y la sedimentación, además de procesos químicos como la coagulación y floculación. Adicionalmente existe la posibilidad de tratar dichas aguas por medio de la biorremediación (o biotratamiento), en caso tal que presente contenido de materia orgánica.

La cantidad de lagunas necesarias para la aplicación de este método se establece en tres. La primera lleva a cabo los procesos de flotación y sedimentación, en la cual se retiran los aceites, grasas, flotantes y sólidos. En la segunda se aplican coagulantes con el fin de eliminar el

material particulado no sedimentado por medio de la sedimentación floculenta. La tercera laguna realizará tratamiento biológico para el tratamiento de residuos orgánicos disueltos. Cabe resaltar que las lagunas deben presentar una configuración en serie, como se muestra en la ilustración 8.

**Ilustración 8. Esquema de Tratamiento**



*Nota. Fuente propia.*

Para el tratamiento por estabilización, se puede hacer uso de depósitos contruidos en excavaciones no profundas en el suelo, almacenando agua residual durante un periodo de tiempo establecido. Cuando se descarga agua residual en estanque de estabilización se realizan de forma automática los procesos de autopurificación o estabilización natural, en los cuales se da lugar a fenómenos físicos, químicos y biológicos. (Martínez, 2003).

Por lo general este método es utilizado para tratar aguas residuales con gran cantidad de carga orgánica mediante la aplicación de biorremediación, la cual hace referencia al tratamiento



biológico de productos químicos peligrosos y se logra gracias a la manipulación de los procesos microbiológicos. (Garza, 1998)

La lagunas para el tratar agua residual se pueden clasificar como: lagunas aeróbicas, en las cuales la degradación de materia orgánica se produce en un entorno con gran cantidad de oxígeno disuelto debido a la acción fotosintética de las algas; lagunas anaeróbicas, en las cuales la estabilización es realizada por bacterias anaerobias en altas concentraciones de materia orgánica; lagunas facultativas, presentan una concentración intermedia de materia orgánica, en las cuales por lo general se distinguen tres capas, una primera capa en la parte superior de la laguna con oxígeno disuelto en la que se encuentran bacterias aeróbicas, una segunda capa en la zona intermedia de la laguna donde el contenido de oxígeno disuelto es variable y una tercera capa en el fondo de la laguna donde no hay presencia de oxígeno disuelto, en esta se sedimentan gran parte de los sólidos suspendidos en el líquido. (Vásquez, 2016)

### ***Tratamiento Preliminar***

El tratamiento preliminar o pretratamiento se realiza dependiendo de las características de las aguas a tratar, en este se toman medidas de preparación de las aguas residuales para luego ser dirigidas al respectivo tratamiento, por lo general en este procedimiento se realiza la retención física de sólidos de gran tamaño que se retiran, haciendo pasar el fluido a tratar a través de rejillas que realizan el cribado, rejillas que pueden ser gruesas, medianas y finas, que se disponen en serie y desde donde se retiran los sobre tamaños que se manejan y disponen como residuos sólidos.

Posteriormente se remueven los sólidos más pesados, que por su tamaño se precipitan con mayor facilidad, decantación simple que permite en tanque de muy bajos tiempos de retención

hidráulica retirar o descargar desde el fondo el exceso de estos sólidos, material inerte que se disponen también como residuos sólidos no reutilizables.

Este proceso de pretratamiento que realiza el tamizaje del agua residual a tratar por medio de rejillas y la remoción de sólidos más pesados ayudan a reducir, aunque en bajo porcentaje los contaminantes orgánicos en el agua problema, que será llevada a la etapa de flotación y sedimentación. (Arcila & Pico, 2012)

### ***Flotación y Sedimentación Simple***

Esta etapa comprende los procedimientos realizados en el estanque 1 mostrado en la ilustración 8, a continuación, se describen las actividades realizadas.

**Flotación.** La flotación es un fenómeno físico en el que se da la separación de sustancias por la influencia de la fuerza de flotación y gravitacional sobre sus densidades. La flotabilidad es la fuerza ascendente producto de la densidad de una sustancia o partícula. Para que esto ocurra la fuerza de la gravedad debe ser sobrepasada por la flotabilidad que experimenta dicha partícula cuando está en un medio con una densidad mayor. Las partículas suspendidas en las aguas residuales como los aceites y grasas presentan densidades menores a la del agua, por lo que se elevan hasta la superficie debido a la flotación. La capa que se genera por la acumulación de estos residuos se conoce como nata, la cual debe tenerse en cuenta en el diseño ya que esta también reduce el volumen efectivo de la laguna o tanque (Strande, 2014).

A menudo se intenta acelerar los procesos de flotación con el uso de tecnologías de depuración mediante sopladores o difusores, las cuales tienen como objetivo la transferencia de oxígeno y el mezclado de las aguas, lo cual no tiene mucho sentido debido a que este efecto entorpece la separación en fases de los minerales suspendidos. La separación de sustancias por

medio de la flotación se da en un estado de aparente reposo, con el paso del tiempo las grasas terminarán en la superficie. (Teqma, 2018)

De acuerdo con lo anterior se puede establecer que para que se produzca un proceso de flotación adecuado, las aguas residuales a tratar deben estar en un estado de reposo durante un periodo de tiempo que en algunos casos puede ser elevado.

Una solución a este problema es la implementación de la tecnología Aeroflo, la cual produce una aireación sin turbulencias, ya que, inyecta en el agua burbujas con diámetros que garantizan una velocidad de elevación baja y una trayectoria recta. (Teqma, 2018)

En la primera laguna, mediante la flotación se busca la remoción de las grasas y aceites, este proceso que se lleva a cabo en conjunto con el de sedimentación simple que se describe a continuación.

**Sedimentación Simple.** La sedimentación o decantación simple, es un proceso de tratamiento físico utilizado para eliminar las partículas suspendidas tamaños medios en las aguas residuales. Se produce por la acción gravitatoria y las diferencias de densidad que presentan dichas partículas, estas descienden al fondo del recipiente o estanque y su volumen crece de manera proporcional al tiempo de almacenamiento. Estos lodos sedimentados una vez extraídos pueden ser reutilizados posteriormente en el proceso de perforación, previo reacondicionamiento de los mismos. El tiempo de sedimentación simple se puede establecer en base a los requisitos de la calidad de agua, necesarias para los tratamientos posteriores. (Bruni, Shrestha & Spuhler, 2018)

El proceso de sedimentación al igual que el de flotación anteriormente mencionado se lleva a cabo en un estado de relativo reposo, además de que sus tiempos pueden variar de acuerdo a las características propias de las partículas en suspensión.

La velocidad de sedimentación hace referencia a la velocidad con la que desciende una partícula dentro de una mezcla heterogénea, puede ser estimada haciendo uso de la ley de Stokes con el supuesto de un flujo laminar, basado en el equilibrio de fuerzas (Flottweg, 2022), ecuación que se presenta a continuación:

$$V_g = \frac{d^2 * (\Delta\rho) * g}{18 * \eta}$$

Donde:

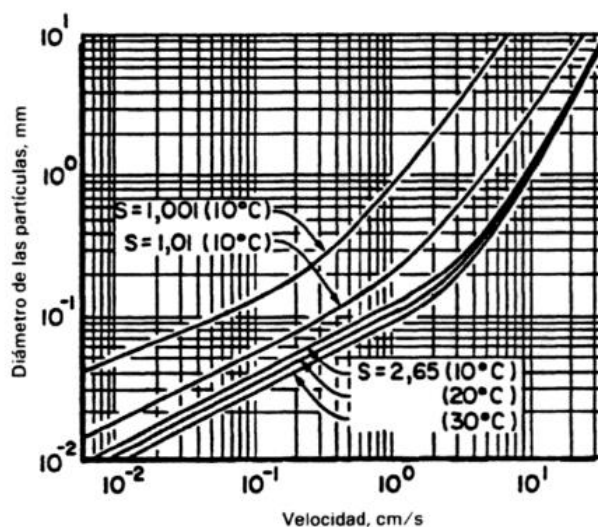
Diámetro (d) de la partícula.

Diferencia de densidad ( $\Delta\rho$ ) entre la partícula y el líquido.

Viscosidad dinámica ( $\eta$ ) de la mezcla.

Es necesario hacer un análisis de las partículas a tratar con el fin de conocer su velocidad, ya que este parámetro puede ser usado para el dimensionamiento de las lagunas que lleven a cabo procesos de sedimentación. Analizando la formula anteriormente mostrada se puede establecer que a entre más pequeña sea la partícula que se desea sedimentar menor es la velocidad de sedimentación de esta y por consiguiente mayor el tiempo necesario para que el proceso se realice en su totalidad.

**Ilustración 9.** Relación entre el Diámetro y Velocidad de Sedimentación de la Partícula



*Nota.* Tomada de *Biorremediación de Aguas Contaminadas con Hidrocarburos*, por Ramalho, 1993. [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/OPS%202005b.%20Gu%C3%A](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005b.%20Gu%C3%A1da%20desarenadores%20y%20sedimentadores.pdf)

Luego de realizados los procesos de flotación y sedimentación para la remoción de grasas, aceites y sólidos sedimentables, el agua se lleva al siguiente estanque para el tratamiento químico por medio de la adición de coagulantes. Este tratamiento es necesario debido a que muchas partículas suspendidas con dimensiones muy pequeñas no pueden ser eliminadas por medio de la sedimentación simple, esto hace imprescindible la aplicación de otros métodos de tratamiento más complejos.

**Coagulación, Floculación y Sedimentación Floculenta**

Esta etapa comprende los procedimientos realizados en el estanque 2 mostrado en la ilustración 8. La coagulación-floculación es conocida como uno de los procesos de tratamiento químico de aguas residuales aceitosas más efectivos para la eliminación de coloides por medio de la formación de flóculos. (Zhao, 2020)

La coagulación y floculación hacen parte de los tratamientos fisicoquímicos realizados a las aguas residuales, estos se realizan con el objetivo de alterar las características físicas de las sustancias suspendidas por medio de la adición de químicos para posibilitar su separación por procesos de flotación y sedimentación. Este proceso permite la producción de partículas de mayor tamaño y finalmente la en floculación se generan coágulos de volúmenes mayores más fácilmente sedimentables. (CEUPE, 2019)

Yang (2016). Establece que los mecanismos para el tratamiento de aguas residuales aceitosas por coagulación-floculación pueden clasificarse de la siguiente manera:

**Neutralización de carga simple.** En este las superficies de los coloides se encuentran cubiertas de manera uniforme con cargas negativas. Esta carga puede ser neutralizada mediante la aplicación de una dosis específica de coagulante y el aumento en la cantidad aplicada aumenta de acuerdo con la concentración de aceites. Las cargas alteradas por la aplicación de coagulantes, producen la atracción electrostática de los coloides.

**Puenteo.** Los floculantes que presentan un alto peso molecular generan uniones o “puentes” con los demás flóculos más finos. A mayor peso molecular mayor tamaño de los flóculos unidos. El proceso de coagulación y floculación permite eliminar de manera eficaz la gran mayoría de aceites en suspensión y aceites emulsionados en las aguas residuales. En este proceso se suelen usar sobre los aceites con carga negativa coagulantes como los sulfatos de hierro y aluminio. (Zhaoa, 2020)

La etapa de tratamiento aquí propuesto para la coagulación-floculación se divide en las siguientes fases:

**Coagulación.** En esta fase tiene como objetivo la desestabilización de los coloides suspendidos por medio de la ruptura de las fuerzas de repulsión producidas por las cargas de mismo signo presenten en la superficie de las partículas. Esta fase recibe su nombre por el uso de sustancias coagulantes que dan lugar al proceso anteriormente mencionado. Durante ese proceso las partículas interactúan entre sí, primeramente, aglomerándose en microflocs y luego en flocs de mayor tamaño que crecen durante el transcurso del tiempo. Para que la coagulación se produzca de manera correcta es necesario realizar un mezclado enérgico dentro del depósito de las aguas a tratar, esto por lo general se realiza por medio de agitadores a gran velocidad. (Bruno, 2020).

Para optimizar los procesos de coagulación necesario tener en cuenta factores como el pH, la agitación (gradiente) y el tipo de coagulante. El pH marca el margen para que los procesos de coagulación se realicen de manera eficiente, fuera de estos rangos se producen pérdidas en el redimiendo. Para conseguir el nivel de pH adecuado se suele adicionar carbonato sódico, sosa acuosa o ácidos minerales. (CEUPE, 2019)

Por lo general se suele utilizar como coagulante el sulfato de aluminio hidratado, debido a que este tiende a presentar un mayor rendimiento respecto de otros compuestos químicos, esto ha sido evidenciado por medio de la aplicación de la prueba de jarras, por medio de la cual también se ha establecido que a medida que aumentan las concentraciones de coagulante aumenta la eficiencia de la eliminación de partículas suspendidas. (Bruno, 2020)

**Floculación.** Consiste en la desestabilización sustancias coloidales y la aglomeración de partículas previamente desestabilizadas, que permiten la formación de escamas que se sedimentan con más facilidad. Durante esta fase la velocidad (gradiente) de agitación no debe ser

tan alta como la aplicada en el proceso de coagulación ya que esta puede romper las uniones entre las escamas. (Bruno, 2020)

Las sustancias de floculación pueden ser minerales como la sílice activa, u orgánicos, que se caracterizan por presentar macromoléculas de cadena larga con pesos moleculares altos. Los floculantes sintéticos son obtenidos a base de monómeros simples sintéticos y los naturales a partir de algas, almidones y derivados de celulosa. (CEUPE, 2019)

El floculante anicónico A57, es uno de los floculantes más utilizados en conjunto con el coagulante de sulfato de aluminio, ya que, estos tienden a presentar un alto rendimiento a la hora de remover partículas presenten en el agua residual. (Bruno, 2020)

Una vez que los flóculos alcanzan una cierta dimensión, se inicia el proceso de precipitación. La sedimentación de estos el similar a la descrita anteriormente para la primera laguna de sedimentación simple, pero aquí lo que se decanta son los flóculos formados químicamente. Recordando que esto se produce en un ambiente de relativo reposo y posteriormente los lodos generados son retirados del agua.

**Dosificación de coagulantes y floculantes.** La dosificación influye de manera significativa en el tratamiento del agua residual aceitosa mediante el método de coagulación y floculación. En el caso de aplicar una dosis insuficiente de coagulante o floculante, no se podrá alcanzar la desestabilización del total de partículas en suspensión, en caso contrario, si se sobre pasa la dosis optima pueden generarse una reestabilización de las partículas y por tanto la carga de estas evitará la correcta aplicación del método. (Zhaoa, 2020)

Como se mencionó anteriormente, el aumento en la cantidad de coagulante aplicado en las aguas aceitosas produce una mejora en el rendimiento del proceso, cosa que no sucede con



una mayor dosificación de floculante, de hecho, se conoce que aplicar una mayor cantidad de este no genera mejoras significativas en el proceso. (Bruno, 2020)

La siguiente tabla muestra las dosificaciones de coagulante y floculante utilizadas en una Prueba de Jarra, usadas para establecer las dosis adecuadas para el tratamiento de las aguas.

**Tabla 3.** Dosificación de Coagulante y Floculante. Por Bruno 2020.

| Dosis de Coagulante ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) | Dosis de Floculante (A57) |
|------------------------------------------------------|---------------------------|
| 70 mg/l                                              | 1 mg/l                    |
| 70 mg/l                                              | 5 mg/l                    |
| 70 mg/l                                              | 10 mg/l                   |
| 90 mg/l                                              | 1 mg/l                    |
| 90 mg/l                                              | 5 mg/l                    |
| 90 mg/l                                              | 10 mg/l                   |

*Nota.* Tomado de *Bench scale continuous coagulation-flocculation of saline industrial wastewater contaminated by hydrocarbons*, Bruno, P., Campo, R., Giustra, M., De Marchis, M., Di Bella, G. 2020.

Para el dimensionamiento de las secciones de los depósitos de aguas residuales, la tabla 4 presenta algunos de los parámetros hidráulicos necesarios:

**Tabla 4.** Parámetros Hidráulicos del Sistema

| Comportamiento          | Tasa de flujo | Tiempo de retención hidráulica | Volumen | Gradiente de velocidad |
|-------------------------|---------------|--------------------------------|---------|------------------------|
| Coagulación             | 3 l/h         | 2 min                          | 100 ml  | $500 \text{ s}^{-1}$   |
| Floculación             | 3 l/h         | 30 min                         | 1.5 l   | $50 \text{ s}^{-1}$    |
| Sedimentación/Flotación | 3 l/h         | 120 min                        | 6 l     | -                      |

*Nota.* Tomado de *Bench scale continuous coagulation-flocculation of saline industrial wastewater contaminated by hydrocarbons*, Bruno, P., Campo, R., Giustra, M., De Marchis, M., Di Bella, G. 2020.

Por lo general la coagulación y floculación se realizan en zonas separas, para el caso presentado el tratamiento de las aguas residuales producidas, estos se dispondrían en una misma

laguna donde la dispersión del coagulante se realiza por difusión, y la floculación mediante movimiento del flujo y de los flocs inducido por el corriente de agua, los deltas de temperatura en el estanque y la acción del viento en la superficie, velocidad de agitación que requiere el proceso.

**Sedimentación Floculenta.** El proceso de sedimentación floculenta es similar a la sedimentación simple, su diferencia radica en que la floculenta se produce por la aglomeración de partículas desestabilizadas por la acción de componentes químicos, mientras que la simple es provocada por la meteorización de partículas sin ningún tipo de modificación previa. También cabe mencionar que las características de las partículas a flocular experimentan cambios en su forma y densidad a medida que descienden. (Olivia, 2008)

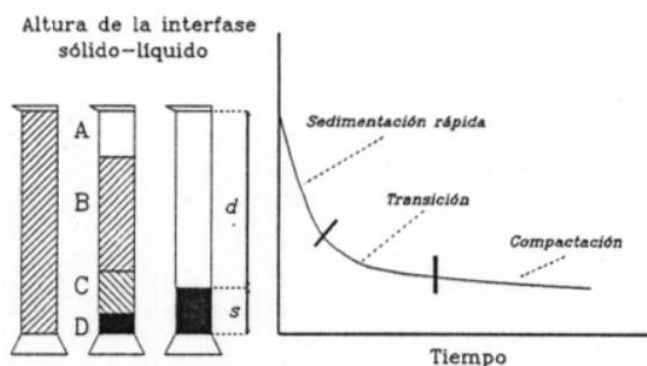
Las partículas presentes en las aguas con previa aplicación de coagulante están formadas por óxidos metálicos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), porcentajes de entre el 80% a 95% de agua y presentan turbiedades cercanas a 1,03. Los flóculos suelen presentar diámetros entre los 0,001 mm a 5 mm con densidades de 1,20 aproximadamente. La rapidez de sedimentación depende de las características hidráulicas de la unidad de sedimentación y de las suspensiones de las partículas, así como la turbulencia, la variación de los gradientes de velocidad y la floculación por diferencia de velocidades de los flóculos. Cuando se presenta bajas concentraciones de partículas, estas presentan una sedimentación libre, a diferencia de cuando las concentraciones son superiores a los 500 mg/L, donde la poca distancia entre partículas genera una adherencia entre ellas produciéndose una sedimentación masiva. (De Vargas, 2004)

La sedimentación zonal es una variante de la sedimentación floculante, esta se da cuando hay bajas concentraciones de partículas que se sedimentan de manera natural, además que existen altas concentraciones de lodo. (Olivia, 2008)

Con el transcurso del tiempo la cantidad de material sedimentado aumenta. Si en una probeta es colocada una muestra del agua a tratar la rapidez de sedimentación de las partículas estará dada por la distancia desde la superficie hasta la fase solida-liquida generada por unidad de tiempo. (Perez & Espirages, 1995)

La ilustración 10 ejemplifica lo mencionado anteriormente.

**Ilustración 10.** *Sedimentación en Función del Tiempo*



*Nota.* Tomada de, *Separación por gravedad. Sedimentación-Flotación* por Perez, J., Espirages, M., 1995. <http://www.elaguapotable.com/Separacion%20por%20gravedad.pdf>

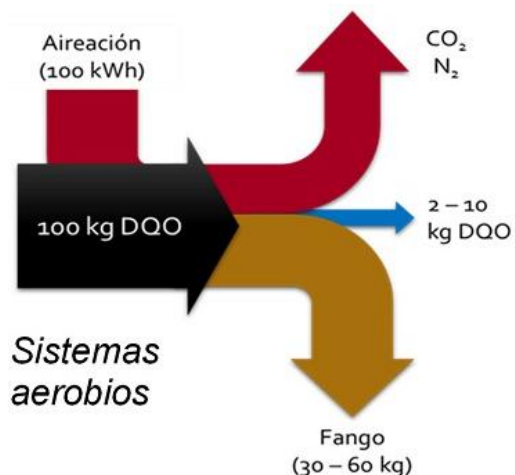
Al salir del segundo estanque de tratamiento, las aguas ya deberían estar libres de contaminantes aceitosos e hidrocarburos, sólidos sedimentables y suspendidos, lo que ya permitiría su disposición en refuentes hídricas o la reutilización en actividades de la misma industria o en ajenas al manejo de hidrocarburos, como se establece más adelante en el presente documento. Aun así, a continuación, se presenta un tercer proceso de tratamiento para las aguas previamente sometidas al tratamiento físico y químico, es básicamente la realización del tratamiento biológico para la remoción de materia orgánica remanente.

### ***Estabilización de Materia Orgánica***

Es un tratamiento que se puede venir realizando microbiológicamente en los estanques anteriores y cuyo tratamiento complementario puede darse el estanque 3 (ilustración 8), que se fundamenta en el tratamiento de biológico y tiene como finalidad eliminar de los posibles contaminantes orgánicos remanente y presentes aún en el agua. Este método suele ser utilizado para estabilizar la materia orgánica disuelta proveniente de los lodos residuales de la extracción de petróleo, del cual se obtiene humus como producto. (Molina, 2014)

La biorremediación de hidrocarburos es un proceso mediante el cual microorganismos transforman o mineralizan contaminantes orgánicos a compuestos menos dañinos y no peligrosos, que posteriormente son integrados en ciclos naturales. La intensidad de biodegradación está influida por factores como el oxígeno, el nivel de pH, la composición y concentración de los contaminantes, así como sus características químicas y físicas. (Margesin & Scinner, 2001)

### ***Ilustración 11. Sistemas Aerobios***

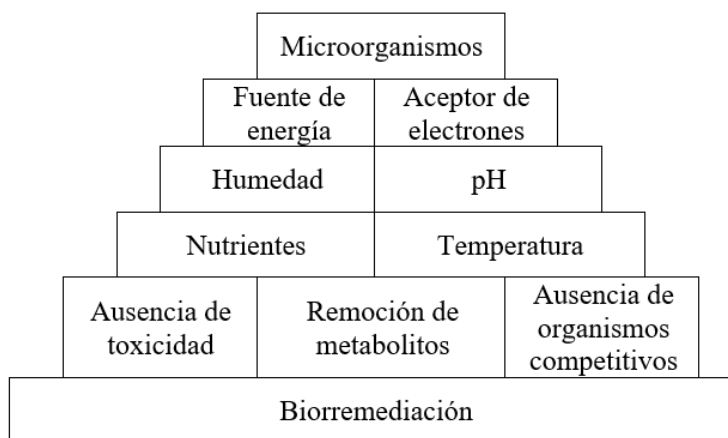


*Nota.* Tomada de **VALORIZACIÓN ANAEROBIA DE LA MATERIA ORGÁNICA**, <https://aguas-residuales.es/es/investigacion/lineas-de-investigacion/valoracion-anaerobia-de-la-materia-organica.html>

El tratamiento biológico de aguas producidas contempla una interacción entre distintas especies de organismos microbianos. La biorremediación de hidrocarburos asfálticos se realiza en un proceso aeróbico, en la mayoría de casos el oxígeno es el limitante en el tratamiento del suelo y agua subterránea contaminada. La fase inicial para la degradación de hidrocarburos consiste en la adición de oxígeno molecular a los medios contaminados por medio de enzimas oxigenadas como las monoxigenadas o las dioxigenadas. (Garza, 1998)

El principal desafío que presenta la biorremediación de aguas se presenta en la composición del agua y la variación en los niveles de contaminación que pueden generar alteraciones en el tratamiento biológico, ya los tratamientos mediante el uso de poblaciones microbianas pueden presentar alteraciones súbitas por cambios repentinos en las condiciones del medio. (Digitalstorm, 2010)

**Ilustración 12.** *Requerimientos para la Biorremediación Aerobia*



*Nota.* Tomada de *Biorremediación de Aguas Contaminadas con Hidrocarburos*, por Ramiro Garza Molina, 1991, <http://eprints.uanl.mx/7160/1/1080080868.PDF>

### ***Disposición Final del Líquido Tratado***

Se define disposición final la descarga de agua residual tratada en un cuerpo de agua, alcantarillado, suelo o para reúso. Para el año 2016 se vertieron 86,17 millones de metros cúbicos de agua a cuerpos hídricos superficiales, suelo y alcantarillados. La industria del petróleo ha buscado disminuir los volúmenes de vertimiento mediante los sistemas de mínima descarga que plantean la recirculación de fluidos de perforación y aguas residuales de carácter industrial. (Mesa. Ortega & Sandoval, 2018)

Según la CAR Cundinamarca, el vertimiento de aguas residuales está prohibido en:

1. Cabeceras de fuentes hídricas
2. Acuíferos
3. Cuerpos de agua o aguas costeras de recreación y usos que impliquen contacto primario.
4. Aguas arriba de bocatomas para agua potable, en extensión que determinará la autoridad competente.
5. Cuerpos de agua que sean declarados total o parcialmente protegidos por la autoridad competente.
6. Calles, calzadas y canales o sistemas de alcantarillado pluvial.
7. Aguas dulces o marinas superficiales que provengan del transporte marítimo, fluvial o lacustre.
8. Aguas no tratadas que procedentes del lavado de vehículos aéreos o terrestres y recipientes que puedan contener agroquímicos o sustancias nocivas.
9. Que altere las características que permiten a una fuente hídrica ser usada en otras actividades.

10. Que represente un alto riesgos para la salud y los ecosistemas.

El vertimiento en fuentes hídricas es una las alternativas de disposición más utilizadas en Colombia, aun así, existen opciones que permiten darle un nuevo uso a la gran cantidad de agua que genera la industria petrolera reduciendo el rápido consumo de esta sustancia tan esencial para la vida. (Mesa. Ortega & Sandoval, 2018)

### ***Aprovechamiento de las Aguas Tratadas***

**Disposal y Reinyección.** El disposal se realiza en formaciones subterráneas aisladas de las formaciones de producción, su propósito es ser un conducto para el vertimiento de agua residual en un acuífero que garantice el aislamiento de las demás zonas de interés, como acuíferos someros o formaciones de producción. Para que sea realizado este método de inyección, se debe descartar la posibilidad de uso en la superficie, ya que estas presentan una mayor eficiencia respecto a la inyección disposal. También se debe garantizar la buena estabilidad de los pozos a fin de limitar la posibilidad de desvío del agua inyectada. Por otra parte, el agua de reinyección es un proceso que se ejecuta mediante formaciones hidráulicamente conectadas a la estación productora, la cual proporciona un soporte de presión que garantice la producción. El principal objetivo de la reinyección es conservar la presión en los yacimientos productores para facilitar la recolección de petróleo por medio de un barrido con inundación de agua presentando un impacto ambiental menor. Se puede garantizar la correcta aplicación de los anteriores sistemas de inyección realizando análisis sobre la naturaleza de los yacimientos encontrados, para esto se deben tener en cuenta los siguientes parámetros: (Mesa. Ortega & Sandoval, 2018)

**Tabla 5. Parámetros Básicos para la Inyección de Aguas Residuales en Yacimientos**

| Criterio        | Datos                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Roca            | Porosidad, permeabilidad, capilaridad, humectabilidad, heterogeneidad del yacimiento, saturaciones iniciales, efectos de permeabilidad direccional                                                                                 |
| Fluido          | Viscosidad, miscibilidad, movilidad, compatibilidad, saturaciones irreducibles                                                                                                                                                     |
| Consideraciones | Mecanismos de desplazamiento, movimiento frontal, movimiento contacto agua-petróleo, efectos de la gravedad, potencial de canalización, saturaciones detrás del frente de agua, rendimiento de barrido, efectos sobre capas de gas |
| Posibilidades   | Mantenimiento de presión versus inyección de agua, esquemas de inyección, distintas velocidades de inyección. Variaciones de inyectividad y conductividad                                                                          |

*Nota.* Tomada de *Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana*, por A. Mesa- J. Orjuela- A. Ortega, J. Sandoval, 2018.

### **Sistemas Agrícolas y Pecuarios.**

**Efectos Sobre la Producción de Cultivos.** Un estudio permitió establecer las propiedades que presentaban los cultivos de caña de azúcar y pasto elefante regados con aguas tratadas provenientes de la producción petrolera de la estación de Apiay frente a los mismos cultivos regados con aguas de pozo profundo de CI La libertad.

Los suelos que fueron regados con el agua producida tratada, presentaron niveles más altos de densidad y porosidad respecto de los suelos regados con agua de pozo, aun así, estos niveles se encontraban dentro del límite normal para la correcta aireación y movimiento del agua en el suelo. El suelo regado con aguas de producción tratadas también presentó una mayor cantidad de iones de calcio y potasio, con un pH mayormente neutro con respecto al suelo regado con agua de pozo, que carecía de estos y presentaba un pH ligeramente ácido.



Con este estudio se llegó a conclusión que al usar aguas de producción tratadas no genera afectaciones en las condiciones químicas, ni presentan riesgo o toxicidad, sino que al contrario mejoran las características del suelo. Los resultados también mostraron que no se presentó ninguna variación en el rendimiento de los cultivos estudiados, lo que permitió concluir que las aguas de producción tratadas tienen un impacto positivo en el crecimiento de las plantas estudiadas.

***Efectos Sobre la Producción en Sistemas Pecuarios.*** El estudio para determinar el efecto sobre la producción pecuaria se realizó en 48 vacas y 200 pollos de un día de nacidos, las cuales se les suministraba agua de producción tratada para su consumo.

En los bovinos no se observaron variaciones significativas en el crecimiento de las especies que solo consumían agua producida tratada respecto de los que consumían agua de pozo. Además, respecto de la producción de leche de las especies evaluadas no evidenció una tendencia clara en función la ingesta de aguas producidas tratadas respecto de aguas de pozo.

En el caso de las aves se presentaron leves variaciones en el crecimiento promedio y la ganancia de peso, pero estos fueron atribuidos a las variaciones del sistema productivo, además el porcentaje de huevo/ave-día no presentó variaciones considerables.

Mediante este estudio se pudo concluir que el uso de aguas producidas tratadas para el consumo de animales no tiene ningún efecto sobre el desarrollo y producción pecuaria.

(Almansa, 2020)

**Fabricación de Compuestos de Cemento.** Un estudio que buscaba establecer la posibilidad de utilizar aguas producidas tratadas provenientes de la industria petrolera mezcladas con cemento Portland, pudo evidenciar que mediante el uso de distintas diluciones de aguas producidas tratadas se puede aumentar la resistencia a la compresión del mortero, este aumento se daba respecto de la concentración de dichas aguas en la mezcla hasta el 80% y producía aumentos en la resistencia del 2% al 14%. El estudio demostró que el agua producida tratada puede reutilizarse para aumentar la hidratación, alterar la microestructura y la resistencia a la compresión aproximadamente 12 MPa. Una buena aplicación se podría dar en los sistemas de pavimentación con concreto simple usado para el soporte de sistemas de tráfico cercano a las instalaciones de producción de petróleo. El uso de agua producida tratada también puede minimizar el rápido consumo de agua dulce y posiblemente generar ahorros en de entre US \$1,00 y US \$2,50 por cada barril producido. (Nikookar, 2022)

El uso de agua producida tratada altera principalmente las características de hidratación de la mezcla en edades tempranas, pudiéndose notar una reducción en los tiempos de hidratación, así como un flujo de calor máximo mayor. El uso de esta agua también presenta mejores resultados respecto del agua de mar por su menor concentración de sulfatos.

**Otros Usos.** Mesa. Ortega & Sandoval, 2018, establecieron que un pequeño porcentaje de las aguas producidas tratadas son empeladas para diferentes actividades como son:

- Reutilización en procesos de refino y petroquímica
- Preparación de lodos de perforación
- Mantenimiento de pozos
- Sistemas contra incendios
- Riego de vías para reducir el levantamiento de polvo

### ***Recuperación de Residuos Aceitosos***

Los residuos aceitosos generados en la producción de petróleo, también denominados borras, son los desechos más importantes producidos dentro de la industria. Esta es una sustancia que contiene varios hidrocarburos, agua, metales pesados y partículas sólidas. Estos residuos son altamente peligrosos para el medio ambiente y presenta un creciente aumento en su volumen a nivel mundial, por esta razón en diferentes partes del mundo se ha hecho muy importante su manejo. En las unidades de flotación de las aguas residuales de perforación son retenidos estos residuos aceitosos, desde donde son succionados y llevados a un tratamiento específico de esta sustancia, que empieza con la extracción del agua presente en los residuos aceitosos. El agua es enviada a los sistemas de tratamiento y los residuos aceitosos son sometidos a temperaturas de hasta 120°C, para evaporar el agua emulsionada. Posteriormente se hace llegar la emulsión hasta una temperatura de 160°C, con el propósito de evaporar el agua restante, y luego extraer el crudo remanente. (Nikookar, 2022)

Los residuos pueden ser tratados por las mismas empresas de extracción como se vio anteriormente o en algunos casos almacenados para la posterior entrega a empresas que se encargan su transporte y disposición final. (Gómez & Gonzales, 2009)

### ***Disposición de Lodos***

La finalidad de este tratamiento es retirar los lodos decantados en las distintas unidades de tratamientos que los componen la planta de tratamiento y el tratamiento específico de los lodos es similar al tratamiento de aguas residuales de petróleo previamente descrito. Inicia con el tamizado fino y la aplicación sustancias como floculantes. Luego son separados los sólidos de mayor tamaño por medio de un decantador y después en tanques para la remoción de aceites.

Finalmente son llevados a un separador o clasificador que separa los finos presentes en el lodo. (SPENA, 2016)

En los dos casos donde la extracción de cada uno se realiza de manera eficiente, se puede optar por la reutilización de cada uno de los subproductos generados. El crudo extraído volvería a la fase de producción, el agua tratada a la reinyección en el sistema productivo o para su disposición en fuentes hídricas y los sedimentos pueden ser reutilizados según la composición, ya que su propagación en el medio natural puede ser nociva. (Peña, 2017)

### ***Biorremediación en Suelos***

La biorremediación es el tratamiento que se da a los de residuos aceitosos e hidrocarburos y suelos contaminados con hidrocarburos, que es empleada para sustraer los contaminantes presentes por medio de procesos de degradación y transformación. Su finalidad es convertir las sustancias peligrosas en otras con menor toxicidad o generar de materia orgánica en descomposición. El procedimiento se puede acelerar por medio de la adición de nitrógeno y fosforo, además de las modificaciones del pH, la humedad, el oxígeno, etc. Este método de tratamiento por lo general presenta mayor eficiencia económica y menor impacto ambiental respecto la incineración, proceso también utilizado para eliminar estos contaminantes. (Trujillo & Ramírez, 2012).

La biorremediación es llevada a cabo por la acción de poblaciones nativas de microorganismos debido a los procesos enzimáticos que llevan a cabo. Para conseguir una adecuada biorremediación es necesaria la asociación de microorganismos y análisis de dichas poblaciones presentes en el suelo, uno de los organismos más importantes en este proceso son los nematodos bacteriógrafos. (Plaza, 2001).

El principio de la biorremediación consiste en reducir el tiempo necesario para la degradación natural de los suelos con presencia de hidrocarburos, esto puede lograrse por medio de la adición de capas superficiales de suelo o abonos de origen natural, ya que estos ya contienen gran cantidad de microorganismos que por lo general pueden adaptarse a medio, consumir y biodegradar los hidrocarburos presentes. De este proceso se generan metales y compuestos inorgánicos que se ligan a las partículas del suelo. El material que permanece presente en el suelo es denominado total de hidrocarburos de petróleo, TPH. (Trujillo & Ramírez, 2012).

Una técnica de biorremediación muy aplicada es la que se denomina “landfarming”, la cual es una tecnología aplicada para la remediar de suelos con presencia de hidrocarburos de petróleo. Cuando la contaminación es superficial se realiza el arado de la tierra o en otros casos la remoción y disposición de los residuos en superficies de terreno para estimular la actividad microbiológica aeróbica. (Ariza & Carrillo, 2017).

La técnica de landfarming consiste en el tratar los suelos por medio de aireación mecánica con capas poco profundas que están alrededor de los 30 cm de grosor. Con esta técnica ha conseguido buenos resultados en periodos de tiempo de 12 meses o más, dependiendo del tipo.

## Conclusiones

La producción de petróleo es una actividad importante para la economía a nivel nacional, gracias a la comercialización de este recurso Ecopetrol se ha convertido en una de las empresas más influyentes a nivel internacional en esta industria. La explotación de petróleo ha sido un gran apoyo para el crecimiento del país, pero no se puede negar que los procesos necesarios para la explotación generan gran contaminación sobre los recursos los hídricos y el suelo.

La contaminación de los recursos hídricos se da principalmente en las etapas de perforación y explotación de los pozos, durante estas actividades se generan grandes cantidades de aguas residuales y lodos de perforación que son llevados a la superficie con el fin de ser tratados, tratamiento que en algunos casos puede llegar a ser muy poco eficiente. Muchas de las aguas y suelos contaminados presentan sustancias altamente nocivas para el medio ambiente, lo que evidencia aún más la importancia del tratamiento a estas aguas.

Los procesos para el tratamiento aguas residuales de la industria petrolera, por lo general presentan distintas actividades o fases, cada una con el fin de eliminar ciertos contaminantes específicos. El tratamiento de agua residual de perforaciones petroleras se puede realizar por medio tres estanques en serie, cada uno de estas realizando labores específicas, como son es la flotación y sedimentación simple, coagulación, floculación y sedimentación floculenta, y remoción de materia orgánica.

Mediante esta investigación se pudo conocer que las aguas generadas por la industria del petróleo pueden ser tratadas mediante la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos, que permiten la posterior reutilización. El método planteado muestra una posible vía para el manejo de estas aguas aplicando una metodología, la cual muestra una solución respecto del

tratamiento del agua y se esperaría que estos procesos puedan ser llevados a cabo por las mismas empresas encargadas de la extracción de los hidrocarburos.

La mayor parte de las aguas residuales generadas por la industria del petróleo una vez tratadas son vertidas en fuentes hídricas, o en otros casos reutilizadas en procesos para la extracción de más recurso, debido a que el volumen de estas es muy elevado y crece rápidamente con el transcurso de los años, en algunos estudios también se ha evaluado la posibilidad de aplicación de dichas aguas en industrias ajenas como la agricultura, siendo esta de especial interés por ser una de las que más recurso hídrico consume a nivel nacional, estos estudios han presentado resultados alentadores sobre el uso de estas aguas. También se ha evaluado en la fabricación de concretos, donde se han evidenciado buenos resultados en su aplicación.

A medida que aumente la cantidad de agua residual tratada, surgirá a nivel global la necesidad de su manejo, dando lugar a la realización de más estudios que demuestren la capacidad de reutilización de estas en otras industrias y por consiguiente una posible reducción en el impacto ambiental por la disposición en fuentes hídricas.

## Bibliografía

- Almansa Manrique, E.F., Velásquez Penagos, J.G., Gutiérrez Parrado, S.L., Rodríguez Yzquierdo, G.A., González Rodríguez, R.G., Peláez Montoya, J.A. (2020). *Uso de aguas de producción tratadas de la industria petrolera en sistemas agrícolas y pecuarios*, editado por Almansa Manrique, E.F., Velásquez Penagos, J.G.  
<https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/view/109/93/892-1>
- Arcila, H., Pico, J. (2012). *Planta de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos*.  
[https://issuu.com/jonathanbarrios/docs/planta\\_de\\_tratamiento\\_con\\_hidrocarb](https://issuu.com/jonathanbarrios/docs/planta_de_tratamiento_con_hidrocarb)
- Ariza, C., Carrillo, S. (2017). *Optimización del proceso de landfarming para mejorar la funcionalidad del tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante adición de materia orgánica*. Scientific International Journal. (14).  
<http://www.nperci.org/C.%20Ariza%20&%20S.%20Mej%C3%ADa-Optimizaci%C3%B3n%20del%20proceso%20de%20landfarming-V14N3.pdf>
- Asociación Colombiana del Petróleo ACP (2017, noviembre 1). *¿Realmente sabe qué es el Fracking?* <https://acp.com.co/web2017/es/todo-sobre-el-fracking/824-realmente-sabe-que-es-el-fracking>
- Asociación Colombiana del Petróleo y Gas. (8 de febrero de 2018). *¿Para qué Sirve el Petróleo? Los 6 Usos Más Comunes*. <https://acp.com.co/web2017/es/sala-de-prensa/en-los-medios/886-para-que-sirve-el-petroleo-los-6-usos-mas-comunes>
- Asociación Colombiana del Petróleo. (2019). *Memorias I Cumbre del Petróleo y Gas*. ACP *Hidrocarburos*, 6-7. <https://acp.com.co/web2017/es/archivo-revista-acp/632-revistas-acp-hidrocarburos-edicion-no-23/file>



Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y El Caribe.

(2010). Guía Ambiental de ARPEL. *Disposición y tratamiento del agua producida*. 1(1), 3-6. <http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf>

Banco Mundial. (2018, julio 17). *Nuevos datos satelitales muestran un avance: la quema de gas a nivel mundial disminuyó en 2017*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/07/17/new-satellite-data-reveals-progress-global-gas-flaring-declined-in-2017>

Berasategui Moreno, J.R., Malagón Picón, B. (2021). *Explotación del petróleo y el gas*. <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/3096/course/section/2863/Tema%205%20EXPLOTACION%20DEL%20PETROLEO%20Y%20EL%20GAS.pdf>

Biblioteca del Congresos Nacional de Chile / BCN (2018). *Técnicas y métodos de tratamiento para diferentes tipos de aguas residuales*. Asesoría Técnica Parlamentaria. [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25552/2/Informe\\_Tratamiento\\_Aguas\\_Residuales.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25552/2/Informe_Tratamiento_Aguas_Residuales.pdf)

Bravo (2007). *Los Impactos de la Explotación Petrolera en Ecosistemas Tropicales y La Biodiversidad* [Archivo PDF]. [https://www.inredh.org/archivos/documentos\\_ambiental/impactos\\_explotacion\\_petrolera\\_esp.pdf](https://www.inredh.org/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_esp.pdf)

Bruni, M., Shrestha, R., Spuhler, D. (2018). *Sedimentation (centralised)*. [https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-purification/hardwares/semi-centralised-drinking-water-treatments/sedimentation-\(centralised\)](https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-purification/hardwares/semi-centralised-drinking-water-treatments/sedimentation-(centralised))

Bruno, P., Campo, R., Giustra, M., De Marchis, M., Di Bella, G. (2020). *Bench scale continuous coagulation-flocculation of saline industrial wastewater contaminated by hydrocarbons*. Journal of Water Process Engineering. (34) 2-3.

Camacho Triana. (2020) *Evaluación del manejo del agua en la extracción y producción de hidrocarburos con miras a la definición de alternativas de tratamiento y reúso*. [Trabajo final de Magister, Universidad Nacional de Colombia].  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78636/1022369072.2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Centro Europeo de Postgrado CEUPE (2019). *Coagulación y floculación*.  
<https://www.ceupe.com/blog/coagulacion-y-floculacion.html>

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS (2005). *Guía para el Diseño de Desarenadores y Sedimentadores*.  
[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/OPS%202005b.%20Gu%C3%ADa%20desarenadores%20y%20sedimentadores.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005b.%20Gu%C3%ADa%20desarenadores%20y%20sedimentadores.pdf)

Céspedes Bernal (2019) *Tratamiento Terciario de Aguas Residuales no Domésticas Empleando a Chlorella Sp. y Conversión de la Biomasa Microbiana por Pirólisis Lenta*. [Tesis de Grado, Pontificia Universidad Javeriana Colombia].  
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/43200/Tesis%20repositorio.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Comisión Nacional del Agua. (2007). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO*.  
<http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf>

Comisión Nacional del Agua de México (2014). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro46.pdf>

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (s/f). *Permiso de Vertimientos*.

<https://www.car.gov.co/vercontenido/1168>

De la Vega Salazar (2012) *Eficiencia en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*.

SEDESOL.

<http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.%20Desarrollo%20Social/Agua%20y%20Saneamiento/Eficiencia%20en%20Plantas%20de%20Tratamiento%20de%20Aguas%20Residuales.pdf>

De Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*.

[http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1\\_tomo1\\_indice.pdf](http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf)

Digitalstorm\_awe\_. (2010, octubre 3). *Biological treatment of produced water*. AWE Magazine;

AWE International. <https://www.aweimagazine.com/article/biological-treatment-of-produced-water/>

Ecopetrol. (12 de Febrero de 2021). *Gestión integral del agua*.

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/ResponsabilidadEtiqueta/Medio%20ambiente/gestion-integral-del-agua>

Ecopetrol. (8 de Septiembre de 2014). *Nuestra historia*.

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/NuestraEmpresa/QuienesSomos/NuestraHistoria>

- Ecopetrol (2016). *Reporte integrado de gestión sostenible*. Unidad de comunicaciones corporativas de Ecopetrol. <https://www.ecopetrol.com.co/documentos/reporte-integrado-gestion-sostenible-2016.pdf>
- ECOPETROL S.A. (2014). *El petróleo y su mundo*. Bogotá: Unidad de comunicaciones corporativas de Ecopetrol.
- Espigares García, M., Y Pérez López, J. *AGUAS RESIDUALES COMPOSICIÓN*. Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua, p. 22, 29, 2003
- Ferrer Polo, José; Seco Torrecillas, Aurora; Robles Martínez, Angel (2018). *Tratamientos Biológicos de aguas residuales*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. [https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/935a8d7c-2081-4d74-9f7c-bf3ad9e69bb4/TOC\\_0358\\_03\\_03.pdf?guest=true](https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/935a8d7c-2081-4d74-9f7c-bf3ad9e69bb4/TOC_0358_03_03.pdf?guest=true)
- Flottweg (2022). *Velocidad de sedimentación*. <https://www.flottweg.com/es/wiki/tecnica-de-separacion/velocidad-de-sedimentacion/#:~:text=La%20velocidad%20de%20sedimentaci%C3%B3n%20se,dentro%20de%20una%20mezcla%20heterog%C3%A9nea>.
- Garza, R. (1998) *Biorremediación de Aguas Contaminadas con Hidrocarburos [Tesis de maestría en ciencias con especialidad en ingeniería ambiental, Universidad Autónoma de Nuevo León]*. <http://eprints.uanl.mx/7160/1/1080080868.PDF>
- Gómez Romo, J.A. Gonzales Rivera, J.W. (2009). *Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y explotación de hidrocarburos desarrollados por petróleos del norte s.a. (departamento del Cesar)* [Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana].

[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/471/digital\\_17592.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/471/digital_17592.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Haug, R. T. (1980). *Compost Engineering, Principles and Practice*. Estados Unidos: Ann Arbor Science.

*Lodos mediante un sistema óptico*. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46712202.pdf>.

Margesin, R., Schinner, .F. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. *Appl Microbiol Biotechnol* 56, 650–663 (2001)

Martínez, D. A. (2003). *Análisis comparativo de criterios de diseños de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas* [Tesis para obtener el título de ingeniero civil, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura].  
[https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/4707/1/260\\_ANALISIS%20COMPARATIVO%20DE%20CRITERIOS%20E%20DISENOS%20DE%20LAGUNAS%20DE%20ESTABILIZACION%20PARA%20CIUDADES%20PEQUENAS%20Y%20MEDIANAS.pdf](https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/4707/1/260_ANALISIS%20COMPARATIVO%20DE%20CRITERIOS%20E%20DISENOS%20DE%20LAGUNAS%20DE%20ESTABILIZACION%20PARA%20CIUDADES%20PEQUENAS%20Y%20MEDIANAS.pdf)

Mesa, S.; Orjuela, J.; Ortega, A.; Sandoval, J. (2018). *Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana*.

Molina, G. (2014). *Estudio de viabilidad del uso de residuos aceitosos como combustible alternativo de un horno cementero* [Trabajo de Maestría, Universidad ICESI].  
[https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/77232/1/estudio\\_residuos\\_aceitosos.pdf](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/77232/1/estudio_residuos_aceitosos.pdf)

Moret, I (2014) *Optimización de Lagunas de Estabilización Mediante el Uso de Macrofitas*

[Tesis de pregrado, Universidad de Piura Perú].

[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1753/ICI\\_196.pdf?sequence=3](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1753/ICI_196.pdf?sequence=3)

Murillo Aguirre, A.M. (2017) *Afectaciones económicas y ecológicas generadas por el vertimiento de aguas residuales en la perforación exploratoria de hidrocarburos en campos de Casanare durante el periodo 2010-2015* [Tesis de maestría, Universidad de Manizales].

[https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3513/Murillo%20Ana\\_Tesis%20Maestria.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3513/Murillo%20Ana_Tesis%20Maestria.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

Nikookar, M.; Brake, N.; Adesina, M.; Rahman, A.; Selvaratnam, T.; Snyder, H.; Günaydin-sen, O. (2022) *Reutilization of oil and gas produced water in cement composite manufacturing*. Journal of Cleaner Production.

[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262204687X?fr=RR-2&ref=pdf\\_download&rr=76d556e92cf73edc](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262204687X?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=76d556e92cf73edc)

Oliva, J., Giacomani, G., Perez, M. (2008). *Estudio de la dinámica de sedimentación de*

Peña, L., Heredia, J., Sanabria, M. (2017). *Tratamiento y disposición final de lodos aceitosos resultantes de los procesos de producción y extracción de crudo*.

[https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04\\_025/papers/07e/07e\\_1531\\_505.pdf](https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/07e/07e_1531_505.pdf)

Perez, J., Espigares, M. (1995). *Separación por gravedad. Sedimentación-Flotación*.

<http://www.elaguapotable.com/Separacion%20por%20gravedad.pdf>

Plaza, G., Otero, M., Torres, N., Velásquez, M., Corbalán, E., Rodríguez, T. (2001).

*Biorremediación en Suelos Contaminados con Hidrocarburos*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, (5).

Portal Ecopetrol. (18 de febrero de 2022). *Eficiencia operativa en el manejo del agua*.

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/gestion-integral-del-agua/manejo-agua>

Ramallo, R. (1993). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté, S.A.

Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 17 de marzo de 2015. D.O. 49486.

Resolución 181495 de 2009. Por la cual se establecen medidas en materia de Exploración y Explotación de Hidrocarburos. 4 de septiembre de 2009. D.O. 47462.

Romero, J., (2005). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Secretaría Técnica Nacional. (2017). *Informe Anual de Gestión y Progreso EITI 2016*

COLOMBIA. Obtenido de EITI Colombia: <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/perfiles-hidrocarburos/perfiles-crudo/>

Secretaría Técnica Nacional de Colombia. (2017). *Informe Anual de Gestión y Progreso EITI 2016 COLOMBIA*. Obtenido de EITI Colombia:

<https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/perfiles-hidrocarburos/perfiles-crudo/>

SPENA (2016). *Tratamiento de Aguas Residuales – Lodo de Perforación*.

<https://spenagroup.com/tratamiento-aguas-residuales-lodo-perforacion/>

Standard Oil Company Chile. (1987). *El petróleo. Breve reseña de su historia e industrialización*. Santiago.

Strande, L., Ronteltap, M., Brdjanovic, D. (2014). *Manejo de Lodos Fecales*.

[https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FS\\_M\\_Libro\\_high\\_res/manejo\\_fsm\\_cover\\_toc.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FS_M_Libro_high_res/manejo_fsm_cover_toc.pdf)

Teqma. (2018). *La importancia de la separación de aceites y grasas en el tratamiento del agua residual urbana*. <https://www.iagua.es/noticias/teqma/importancia-separacion-aceites-y-grasas-tratamiento-agua-residual-urbana>

Trujillo, M., Ramirez, J. (2012). *Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia*. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, (3) 2.

Uribe, E. (1996-04.). *Guía para el manejo y tratamiento de las aguas residuales* (Preliminar).

<https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/37069>

Valbuena, M. O. (2016). *Manejo Ambiental de la Disposición Final de los Fluidos Base*

*Utilizados en la Perforación de Algunos Pozos Petroleros en Colombia*. [Monografía de especialización en gestión ambiental, Fundación Universidad de América] <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/633/1/5131638-2016-2-GA.pdf>



- Vargas Guarín (2020). *Impactos Ambientales de la Producción Petrolera en Colombia y su Relación con la Innovación Tecnológica en los Últimos Quince Años* [Monografía de Especialización, Fundación Universidad de América Colombia].  
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7843/1/463974-2020-I-GA.pdf>
- Vasquez, H. (1994). La historia del petróleo en Colombia. *Revista Universidad Eafit*, 5-6.  
[http://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS\\_20/Ingenieria%20de%20Petroleo%20y%20Gas/1418-4692-1-PB.pdf](http://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Ingenieria%20de%20Petroleo%20y%20Gas/1418-4692-1-PB.pdf)
- Vázquez, F. (2016). *Lagunas de Estabilización. Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*. (3), 4-13.
- Velásquez, J. (2017). *Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación*.
- WWAP Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París, UNESCO.  
[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/\\$FILE/1\\_\\_15.247647s.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/$FILE/1__15.247647s.pdf)
- Yang, R., Li, H., Huang, M., Yang, H., Li, A., (2016). A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment. *Water Res.* (95) 59–89.
- Zhaao, C., Zhou, J., Yan, Y., Yang, L., Xing, G., Li, H., Whu, P., Wang, M., Zheng, H. (2020). *Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review*. *Science of the Total Environment*. (765) 2-3.