

**ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL
AGUA DE PRODUCCIÓN DE CAMPO ESCUELA COLORADO CONFORME A
LA NORMATIVIDAD VIGENTE PARA VERTIMIENTO EN COLOMBIA.**

**PAOLA ANDREA DUARTE PRADA
SANDRA MILENA PATIÑO GONZALEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2017

**ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL
AGUA DE PRODUCCIÓN DE CAMPO ESCUELA COLORADO CONFORME A
LA NORMATIVIDAD VIGENTE PARA VERTIMIENTO EN COLOMBIA.**

**PAOLA ANDREA DUARTE PRADA
SANDRA MILENA PATIÑO GONZALEZ**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

**DIRECTOR:
EDISON ODILIO GARCÍA NAVAS
M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios por darme sabiduría y fortaleza cada vez que la necesitaba.

A mi mamá Isabel González, por ser una mujer fuerte e inteligente y por inculcar todo eso en mí.

A mi papá Hernando Patiño, por ser el mejor papá del mundo, gracias a su amor infinito, su humildad y verriquera que contribuyeron a mi formación personal y profesional.

A mis hermanos Edward y Alexander por ser una fuente de inspiración para seguir creciendo profesionalmente.

A todos los profesores que estuvieron durante mi formación académica, porque gracias a su gran labor, fue posible materializar este sueño.

A mis madrinas Ludy Esperanza y Gladys Cecilia, por su apoyo y amor incondicional durante todas las etapas que he vivido a lo largo de mi vida.

A las Familias Patiño Orozco y González Hernández por el apoyo que me brindaron durante mis estudios, en especial a mi tía Alicia quien desde el cielo me está brindando buena energía para nunca desfallecer.

A Candy, Pitu y Milu, por acompañarme noche tras noche bajo mi mesa mientras me preparaba profesionalmente.

A Stanly, por ser mi compañero de vida, por su amor, apoyo y paciencia durante esta etapa de mi vida.

A la Universidad Industrial de Santander, y a mis compañeros: Cristián, Daniel, Yoryenis, Diego, Paola, Anyi, por formar parte de mi segundo hogar, por apoyarme en mis momentos de desesperación y por todas las sonrisas obtenidas con mis ocurrencias, las cuales quedarán en mi corazón por siempre

Al bebé que está en mi vientre, por darme la fortaleza para culminar este proceso y ser un ejemplo para él.

Sandra Milena Patiño González

DEDICATORIA.

A mi Padre Celestial, quien me ha dado las fuerzas necesarias para culminar esta etapa de mi vida. Gracias mi Dios por su infinito amor, por la sabiduría divina que me has regalado durante este camino. Porque tú eres mi guía celestial y quien me sustenta en la adversidad.

A mi mamá, Virginia Prada Pérez. Gracias por todo lo que me has regalado, por tus palabras de aliento, tus consejos, y por enseñarme a ser valiente en este camino. Gracias Señor, porque me has regalado la mejor mamá del mundo. Te amo mamá

A mi papá, Segundo Duarte Quiroga. Por ser un excelente padre. Gracias por darme la vida, por su protección, por su infinito amor hacia mí y por formar parte de sueño. Te amo papá

A mis hermanos Jaime y Julián, por acompañarme en este camino, por sus consejos y su perseverancia en cada momento.

A mi amor, Ludwing González Roa, gracias por estar ahí en cada etapa de mi vida, por tu perseverancia y tu amor incondicional, y sobre todo muchas gracias por amarme con todos mis defectos y cualidades.

A mis dos terremotos, Ana Sofía y Sheira Divana. Quienes hace muy poco tiempo llegaron a mi vida, y llegaron con un propósito: llenar mi vida con amor y alegría, Las amo con todo mi corazón.

A mis amigos: Laura, Yoryenis, Sami, Ivan S, Ivan A y Carlos, por convertirse en mi segunda familia y por estar ahí en los momentos más difíciles de mi vida, Gracias.

A Sami, mi compañera de tesis y de aventuras. Gracias por tu entrega incansable en este proyecto, por tus consejos en el momento oportuno y por formar parte de este camino.

A mi amiga del alma, Laura Hernández. Gracias por ser tan buena amiga, por estar ahí cuando más la necesite y por todas esas locuras e historias inventadas que me hacen reír. Dios tiene grandes cosas para ti y estaré orgullosa amiga.

Paola Andrea Duarte Prada

AGRADECIMIENTOS

Por el interés demostrado a lo largo de este proyecto, manifestamos nuestros agradecimientos a todas aquellas personas que nos acompañaron durante el camino y que han hecho parte de este proceso.

Se agradece a:

Al ingeniero M.Sc. Edison Odilio García Navas, Director del proyecto por su constante apoyo y paciencia en cada una de las etapas de este proyecto, y por compartir su experiencia y conocimiento, Muchas Gracias.

A cada uno de los profesionales del Campo Escuela Colorado que nos han asesorado y que con su conocimiento hicieron posible la realización de este proyecto.

A nuestros amigos por ser la compañía perfecta en los momentos más difícil y por sus palabras de aliento.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. GENERALIDADES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	21
1.1. DEFINICIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	21
1.2. COMPONENTES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	22
2. GENERALIDADES DEL CAMPO ESCUELA COLORADO	26
2.1. IMPACTOS QUE OCASIONA EL VERTIMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN, EN LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO, AL HOMBRE Y AL MEDIO AMBIENTE	27
2.2. ANTECEDENTES	28
2.3. GENERALIDADES	29
2.4. YACIMIENTO	29
2.5. PRODUCCIÓN	30
2.6. CURVA DE PRODUCCIÓN DE AGUA	31
3. EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA	33
3.1. NORMATIVIDAD COLOMBIANA VIGENTE PARA EL VERTIMIENTO DE AGUAS ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS	35
3.1.1. Decreto 1594 de 1984	35
3.1.2. Decreto 3930 de 2010	37
3.1.3. Resolución 0631 de 2015.	40
3.1.4 Impactos que genera la nueva Resolución 0631 de 2015, en la producción de hidrocarburos para el campo escuela colorado.	46
3.1.5. Referencia NACE para calidad del agua de re-inyección.	47
4. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS	49
4.1. ETAPAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS DE PRODUCCIÓN	50

4.2. TRATAMIENTOS PARA LA REMOCIÓN DE GRASAS Y ACEITES.....	52
4.2.1. Tanque desnatador.....	52
4.2.2. Separadores API.....	53
4.2.3. Intereceptor de Placas Corrugadas (CPI).	54
4.2.4. Celdas de flotación.	56
4.2.5. Filtros.	57
4.2.6. Ósmosis inversa.	58
4.3. TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE SALES EN AGUAS DE PRODUCCIÓN	60
4.3.1. Nanofiltración.	60
4.3.2. Electrodiálisis.	62
4.3.3. Destilación por membrana.	63
4.4. TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS	64
4.4.1. Filtros biológicos aireados.....	65
4.4.2. Adsorción con carbón activado.....	66
4.4.3. Precipitación química.....	67
4.5. TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE BARIO	68
4.5.1. Tratamiento biológico mediante Asociaciones Microbianas Estratificadas.	70
4.5.2. Intercambio iónico.....	70
4.6. TECNOLOGIAS LIMPIAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN	72
4.6.1. Técnica de fitorremediación utilizando sistema vetiver.	72
5. ALTERNATIVAS DE DISEÑO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS LIMPIAS	75
6. CONCLUSIONES	91
7. RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	98

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación geográfica campo escuela colorado.....	26
Figura 2. Línea de tiempo de producción de Campo Escuela Colorado.	29
Figura 3. Formaciones productoras, campo escuela colorado.....	30
Figura 4. Objetivos de un tratamiento del agua de producción.	50
Figura 5. Etapas del tratamiento para las aguas de producción.	51
Figura 6. Tanques desnatadores o Skim Tank vertical y horizontal.	53
Figura 7. Secciones de un separador API.	54
Figura 8. Pack de un CPI.	56
Figura 9. Osmosis inversa.	60
Figura 10. Alternativa 1, para el tratamiento de las aguas de producción en el Campo Escuela Colorado.	78
Figura 11. Alternativa 2, para el tratamiento de las aguas de producción en el Campo Escuela Colorado.	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Producción pozos campo escuela colorado.....	31
Tabla 2. Volúmenes consolidados del agua tratada en el Campo Escuela Colorado en el año 2012.....	32
Tabla 3. Normatividad ambiental colombiana legal vigente.....	33
Tabla 4. Análisis comparativo de las normas de vertimientos, Decreto 1594 de 1984 y Resolución 0631 de 2015.....	43
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos para la calidad del agua de acuerdo a la referencia de NACE para su re-inyeccion.....	47
Tabla 6. Resultados análisis fisicoquímicos, realizados a las aguas de producción en el Campo Escuela Colorado para el año 2013.....	75
Tabla 7. Parámetros operacionales para vertimiento de la alternativa 1.....	78
Tabla 8. Parámetros operacionales para vertimiento para la alternativa 2.....	81
Tabla 9. Comparacion de alternativas propuestas para vertimiento.....	82
Tabla 10. Comparación de los parámetros físico-químicos del agua de producción del campo escuela colorado con los requerimientos para su re-inyeccion.....	84
Tabla 11. Parámetros operacionales para re-inyeccion para la alternativa 3.....	84
Tabla 12. Costos tecnologías planteadas.....	86
Tabla 13. Presupuesto total de la alternativa 1 para vertimiento.....	88
Tabla 14. Presupuesto total de la alternativa 2 para vertimiento.....	89
Tabla 15. Presupuesto total de la alternativa 3 para reinyección.....	90

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Análisis fisicoquímico del agua de producción de campo escuela colorado	98

GLOSARIO

- **Aforo Volumétrico.** Este método se aplica cuando la corriente o vertimiento presenta una caída de agua en la cual se pueda interponer un recipiente; se requiere un cronómetro y un recipiente aforado.
- **Agua de producción.** Es la sustancia generada en el proceso de extracción del petróleo, mediante la inyección de agua. La cual contiene cantidades significativas de cationes inorgánicos tales como calcio, magnesio, bario y estroncio, y aniones tales como carbonato, bromuro y sulfato.
- **Agua subterránea.** Agua existente debajo de la superficie terrestre en una zona de saturación, donde los espacios vacíos del suelo están llenos de agua.
- **Biodiversidad.** Se entiende como la variabilidad de los organismos vivos de cualquier fuente, y la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y los complejos ecológicos que forman parte.
- **Calidad del agua.** Estado físico, químico y biológico en que se encuentra el agua, el cual está relacionado con la concentración de sustancias, bien sea naturales o artificiales, generadas principalmente tras procesos antrópicos.
- **Caudal.** Es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.
- **Ecosistema.** Es un sistema natural formado por un conjunto de organismos vivos (biocenosis) y el medio físico donde se relacionan (biotopo). Un ecosistema es una unidad compuesta de organismos interdependientes que comparten el mismo hábitat.
- **Hidrocarburos:** Son compuestos que contienen sólo carbono e hidrógeno. Se dividen en dos clases: hidrocarburos alifáticos y aromáticos.

- **Hiperacumuladora.** Es una planta capaz de crecer en suelos con grandes concentraciones de metales pesados, concentraciones que resultan tóxicas incluso para especies cercanamente emparentadas a la misma. Estas plantas extraen el metal del suelo a través de sus raíces y lo concentran hasta niveles extremadamente altos en sus tejidos.
- **Impacto Ambiental.** Cualquier alteración en el sistema ambiental fisicoquímico, biológico, cultural y socioeconómico que pueda ser atribuido a actividades humanas relacionadas con las necesidades de un proyecto.
- **Macrófita.** Especie vegetal capaz de adaptarse y desarrollarse en medios acuáticos. Estas pueden vivir en terrenos inundados de forma flotante, sumergida o emergente.
- **Retención de Nutrientes.** En determinadas condiciones, los nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, son retenidos por las plantas y los sedimentos de los humedales, mejorando la calidad del agua y evitando la eutrofización.
- **Sistema Hidropónico.** Sistema de siembra en las cuales las raíces de las plantas están en contacto directo con el agua y no en sustrato.
- **Sistema Vetiver (SV).** Sistema de tratamiento que emplea el pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para el tratamiento de suelos, aguas y terrenos inestables. SU aplicación en la depuración de aguas residuales e industriales ha dado excelentes resultados alrededor del mundo.
- **Tratamiento no Convencional.** Tecnologías de tratamiento diferentes a las comúnmente usadas en el tratamiento de las aguas de producción. Entre estas tecnologías sobresalen los humedales, procesos de oxidación avanzada, osmosis inversa, Etc.
- **Tratamiento de aguas Residuales.** Proceso de mejora de la calidad de las aguas residuales. Puede referirse a cualquier parte o todas las partes del proceso por el cual se transforma a través de las aguas residuales crudas biológicos, bioquímicos y medios físicos para reducir las concentraciones de contaminantes a los niveles prescritos antes de su liberación al medio

ambiente. Un proceso de tratamiento de aguas residuales consiste típicamente en tratamiento primario, secundario y terciario.

- **Tecnologías Limpias.** Término para designar las tecnologías que no contaminan y que utilizan los recursos naturales renovables y no renovables en forma racional.
- **Vertimiento.** El vertimiento consiste en realizar una descarga de agua de producción a cuerpos de aguas superficiales, preferiblemente esto se debe realizar bajo el criterio de normas y leyes que lo rigen. Con el objetivo de evitar alteraciones a los ecosistemas acuáticos y contaminación de las aguas.

RESUMEN

TÍTULO: ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE CAMPO ESCUELA COLORADO CONFORME A LA NORMATIVIDAD VIGENTE PARA VERTIMIENTO EN COLOMBIA.*

AUTORES: SANDRA MILENA PATIÑO GONZALEZ.
PAOLA ANDREA DUARTE PRADA.**

PALABRAS CLAVE: Carga contaminante, aguas de producción, tecnologías, tratamientos, regulaciones ambientales, resolución 0631, análisis presupuestal.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto de grado está enfocado al planteamiento de alternativas, para el tratamiento en la disminución de la carga contaminante de las aguas de producción, generadas en el Campo Escuela Colorado. Inicialmente se realizó un análisis normativo, en cumplimiento a las regulaciones ambientales legales vigentes, específicamente la resolución 0631 de 2015 en lo concerniente a los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a un cuerpo de agua. Así mismo se describieron diferentes tecnologías para la remoción de sales, grasas y aceites, sólidos sedimentables, metales pesados, DQO, DBO₅, y materia orgánica, entre otros. Identificados los tratamientos más eficientes para cada proceso de retención de contaminantes, se proponen 3 alternativas con la implementación de tecnologías limpias, para el tratamiento de las aguas de producción. Por último se realizó un análisis presupuestal de las alternativas seleccionadas.

Se concluyó que las aguas de producción poseen una elevada carga contaminante, que ocasiona enfermedades cancerígenas en el ser humano, y que altera el estado normal de los recursos naturales en un ecosistema específico. Por ello, el principal aporte de este estudio, es la implementación de tecnologías limpias, dentro del sistema de tratamiento planteado, lo cual ayudará a la disminución de las cargas contaminantes en las aguas de producción en el Campo Escuela Colorado, y proporcionará una adición valiosa siendo este un espacio verde.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Edison Odilio García Navas

ABSTRACT

TITLE: ALTERNATIVES FOR THE DESIGN OF THE SCHOOL COLORADO FIELD PRODUCTION WATER TREATMENT SYSTEM IN ACCORDANCE WITH THE CURRENT NORMATIVITY FOR VERTIMIENTO IN COLOMBIA.*

AUTHORS: SANDRA MILENA PATIÑO GONZALEZ.
PAOLA ANDREA DUARTE PRADA.**

KEYWORDS: Contaminant load, production waters, technologies, treatments, environmental regulations, budget analysis.

DESCRIPTION:

This degree project is focused on the proposal of alternatives, for the treatment in the reduction of the pollutant load of the productive waste water, generated in the Colorado School field. Initially, a normative analysis was carried out, in compliance with the current legal environmental regulations, specifically Resolution 0631 of 2015 regarding the maximum permissible parameters and values in the point of view, a body of water or the sewage system. Also described were different technologies for the removal of salts, greases and oils, sedimentable solids, heavy metals, COD, BOD5, and organic matter among others. Identifying the most efficient treatments for each pollutant retention process, two alternatives were designed with the implementation of clean technologies for the treatment of production waters. Finally, a budget analysis of the selected alternatives was carried out.

It was concluded that the production waters have a high pollutant load, which causes cancerous diseases in the human being, and which alters the normal state of the natural resources in a specific ecosystem. Therefore, the main contribution of this study is the implementation of clean technologies within the proposed treatment system, which will help to reduce pollutant loads in the production waters at Campo Escela Colorado and provide a valuable addition. This is a green space.

* Undergraduate Project

** Physiochemical Engineerings Faculty. Petroleum Engineering School. Director: M.Sc. Edison Odilio García Navas

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales más alarmantes en la actualidad es la contaminación de los ecosistemas acuáticos, ocasionada por actividades antrópicas, un ejemplo de esto es la explotación de hidrocarburos. Este proceso incluye la generación de residuos iniciando desde la exploración, extracción hasta la refinación del crudo.

La extracción de petróleo genera agua de producción, la cual representa más del 80% de los residuos líquidos contaminados,¹ que deben ser tratados en un campo petrolero antes de ser vertidos a una fuente hídrica. Según la Asociación Colombiana de Petróleo en el año 2014, se produjeron en los diferentes campos del país 12.45 barriles de agua por cada barril de crudo, lo cual representa una producción diaria de 11.5 millones de bbls de agua.² Esto hace notoria la problemática que genera la extracción del petróleo, sobre los recursos naturales y más específicamente sobre el agua, pues un alto porcentaje de estas aguas producidas una vez tratadas son descargadas sobre el medio ambiente.

Es importante reconocer que dependiendo de la composición química del agua de producción se generan diferentes impactos ambientales, como la contaminación del recurso hídrico, muerte de especies acuáticas, cambio en la textura y permeabilidad del suelo, eliminación de la cobertura vegetal, migración y muerte de especies faunísticas y por ende la alteración del paisaje. Esta problemática puede ser tratada mediante planes de gestión y manejo ambiental, donde se analicen las diferentes técnicas dentro de los sistemas de tratamientos de aguas

¹ KAUR, Guneet, et al. Contro of sulfidogenic bacteria in produced water from the Katholoni oilfield in northeast India. Elsevier [en línea] 2009, vol 63 no 2. Disponible en Science Direct.

² Asociación Colombiana de Petróleo (ACP) y ECOPEPETROL. Informe de Gestión Ambiental del Sector Hidrocarburos. Bogotá, 2014.

de producción y sean ejecutables, lo cual se constituye en un reto, que regidos por las normas ambientales vigentes se disminuya la carga contaminante, dispuesta sobre las fuentes hídricas y el medio ambiente allí presente.

El propósito de este trabajo de grado, es proponer alternativas con la implementación de tecnologías limpias, en el tratamiento de las aguas de producción generadas en el Campo Escuela Colorado, todo esto enfocado en el cumplimiento de los parámetros y valores máximos permisibles, para el vertimiento de aguas puntuales a un cuerpo de agua superficial.

1. GENERALIDADES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.

Hoy en día el agua de producción se ha convertido en un desafío por su tratamiento y disposición final, debido a que estas aguas presentan ciertos contaminantes que son tóxicos, y al momento de poner en contacto con el medio ambiente puede generar problemas irreparables.

Debido a la importancia que tiene el agua de producción, durante muchos años se ha realizado un número significativo de estudios de investigación que buscan mitigar el impacto negativo que tienen los contaminantes tales como: aceite disuelto y disperso, metales pesados, químicos de tratamiento, gases disueltos, materiales radiactivos, sólidos producidos y minerales disueltos³.

1.1. DEFINICIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

El agua de producción proviene de formaciones geológicas, en donde se hallan rocas que naturalmente están impregnadas de diferentes fluidos tales como: aceite, gas y agua. En el momento que se hace la extracción de los hidrocarburos, estos fluidos tienden a recolectarse en superficie y traen consigo cierta cantidad de agua que suele llamarse “agua de producción”.

El agua de producción es considerada como un producto no deseado al momento de extraer los fluidos aceite o gas desde el yacimiento hasta la superficie, lo cual conlleva a un aumento en los costos totales de producción de crudo o del gas, pero que igual se debe tratar, con el objetivo de cumplir las especificaciones de

³ HIRSCHFELDT, Marcelo. El manejo del agua producida en la industria petrolera Argentina, Journal of Oil Production Consulting, 2015

calidad dependiendo de la disposición final. Es frecuente encontrar contaminantes como los sólidos suspendidos y disueltos, crudo residual y otros, que son particulares de cada formación.

Por tal razón, el agua que se produce durante la explotación de un yacimiento es uno de los problemas más frecuente y representa un desafío permanente durante la explotación de la mayoría yacimientos convencionales, ya que en algunos casos impide mantener la rentabilidad de las operaciones y hacer sostenible la actividad de extracción de petróleo en un yacimiento.

La gestión del agua de producción (wáter management) es una de las actividades que mayores costos asociados tiene, por lo que su correcta aplicación no solo permite un desarrollo amigable con el medio ambiente, sino que también es clave para maximizar la vida útil de los yacimientos.⁴

1.2. COMPONENTES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

Para determinar los componentes que posee el agua, se realiza un análisis fisicoquímico. Además, es recomendable conocer e identificar cada constituyente presente en el agua asociada a la producción de hidrocarburos, con el objetivo de establecer el origen de los problemas más frecuentes en un sistema.

❖ Cationes.

Hace referencia a aquellos contaminantes sólidos que se encuentran disueltos cuyas cargas son positivas, y tienen tendencias a formar incrustaciones de escamas orgánicas.

⁴HIRSCHFELDT, Marcelo. El manejo del agua producida en la industria petrolera Argentina, Journal of Oil Production Consulting, 2015.

- **Calcio (Ca^{2+}).** El ion de calcio es uno de los principales componentes del agua de formación, el cual se libera del agua por medio de las rocas que contienen calcio, minerales de calcita y calizas. Este catión se une con los aniones sulfato, carbonato y bicarbonato para formar la precipitación de escamas inorgánicas.
- **Sodio (Na^+).** El ion sodio tiende a estar asociado al ion cloruro para formar sales, que son los componentes más abundantes del agua de formación, que a determinadas condiciones de presión y temperatura pueden precipitarse para generar Cloruro de sodio.
- **Bario (Ba^{2+}).** Es un metal pesado que en pequeñas cantidades tiende a ser tóxico para los seres humanos además de esto, si se combinan con los carbonatos o los sulfatos pueden precipitarse y formar escamas inorgánicas difícilmente solubles.
- **Magnesio (Mg^{2+}).** Este ion junto con el Calcio son los responsables de la dureza del agua, en presencia de sulfatos y carbonatos tiende a formar sales, pero estas son más solubles y difíciles de precipitar, por ello permanecen en suspensión.
- **Hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+}).** La concentración de iones Hierro es muy baja en el agua de formación a menos de que haya corrosión de la tubería, este ion puede estar en forma disuelta férrica (Fe^{3+}) o ferrosa (Fe^{2+}), y puede estar en suspensión como precipitado de hierro.
- **Estroncio (Sr^{2+}).** Es un metal pesado que, en combinación con sulfato, puede dar origen a escamas como sulfato de Estroncio el cual se encuentran precipitado junto con el sulfato de bario. Estas escamas son más solubles que las de Sulfato de Bario.

- **Cadmio (Cd^{2+}).** Suele ser encontrado en la naturaleza en presencia del cinc, es soluble en agua, y su ingesta puede producir daños en el organismo del ser humano.

❖ **Aniones.**

Son sustancias pertenecientes a la formación, que poseen cargas negativas y son los responsables de generar incrustaciones junto con los cationes.

- **Carbonato y Bicarbonato (CO_3^{2-} , CO_3H^-).** Estos aniones influyen en la alcalinidad del agua, como se había mencionado con anterioridad los carbonatos tienden a precipitarse en presencia de Calcio y Bario formando escamas. Si el pH del agua es inferior a 8,3 es un indicio de que en ella no hay bicarbonato.
- **Sulfato (SO_4^{2-}).** Este anión tiene tendencia a formar incrustaciones con el Bario altamente insolubles.
- **Cloruro (Cl^-).** Es el anión más común del agua de formación, se caracteriza por formar el cloruro de sodio, la concentración de cloruros es utilizada para determinar la salinidad del agua, y si las concentraciones son altas puede generar corrosión en la tubería.

❖ **Otros Componentes.**

- **PH.** Es la medida relativa de la alcalinidad o acidez de un agua, un pH alto (alcalino) permite determinar la tendencia incrustante del agua, y de lo contrario un pH bajo (ácido) puede ser un índice de que esta agua de formación es corrosiva.

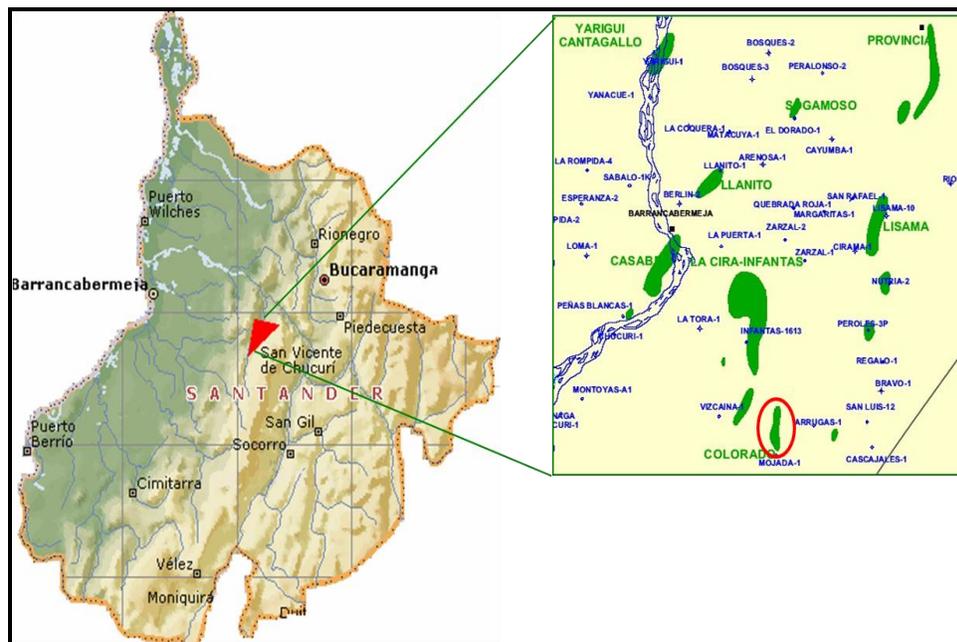
- **Demanda bioquímica de oxígeno.** Indica la presencia y biodegradabilidad del material orgánico, es una forma de estimar la cantidad de oxígeno que se requiere para estabilizar el carbono orgánico y de conocer la velocidad a la cual este material va a ser metabolizado por las bacterias que normalmente se encuentran presentes en las aguas de producción.
- **Demanda química de oxígeno.** Es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico independientemente de que este sea biodegradable o no biodegradable.
- **Sólidos suspendidos totales.** Son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0.01 mm) no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los más grandes (mayores de 0.01 mm) son generalmente sedimentables.
- **Fenoles.** Son compuestos que presentan uno o más grupos hidroxilos (OH) unidos directamente a un anillo aromático, el cual puede ser perjudicial para el ser humano, durante la inhalación, la ingestión y su contacto con la piel.
- **Amoníaco.** Es un gas altamente soluble en agua, se origina por la descomposición del nitrógeno orgánico en amoniacal, se caracteriza por presentar un pH alto lo cual lo hace responsable de la corrosión en las tuberías.
- **Sólidos disueltos totales.** Son materia orgánica e inorgánica, no se pueden ver con mucha facilidad, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos.

2. GENERALIDADES DEL CAMPO ESCUELA COLORADO

El Campo Escuela Colorado es un campo maduro que está localizado geográficamente en la Vereda Los Colorados en el en jurisdicción del Municipio de San Vicente de Chucurí, Santander. Ubicado al sudeste de la ciudad de Barrancabermeja y al sur del Campo La Cira-Infantas en el área de la antigua concesión de Mares. (Ver figura 3)

Población. En la vereda Los Colorados se encuentran asentadas 175 personas, quienes conforman las familias que habitan en 38 viviendas.⁵

Figura 1. Ubicación geográfica campo escuela colorado.



Fuente: Campo Escuela Colorado Convenio UIS – ECOPEPETROL S.A. [En línea]. 2007. p.5

⁵ Campo Escuela Colorado Convenio UIS – ECOPEPETROL S.A. [En línea]. 2007. [Recuperado en 12 marzo de 2017.] Disponible en <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/academia/facultades/fisicoQuimicas/campoEscuela/documentos/primerSimposio/campoEscuela.pdf>.

2.1. IMPACTOS QUE OCASIONA EL VERTIMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN, EN LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO, AL HOMBRE Y AL MEDIO AMBIENTE

Las aguas de producción que se generan en el proceso mismo de la extracción del crudo en un campo petrolero, contienen gran variedad de cationes, aniones y otros componentes químicos, que alteran la calidad del recurso agua. Estos contaminantes poseen ciertas características tóxicas y carcinogénicas, lo que permite el continuo seguimiento analítico a estos vertimientos.

Estos contaminantes poseen unos límites de toxicidad, establecidos por las diferentes autoridades ambientales y de salud, con el objetivo de mitigar las posibles afecciones que se puedan presentar en el ser humano, debido a la Biomagnificación en las cadenas tróficas; y a su vez las alteraciones de los recursos naturales dentro de los ecosistemas que circulan en estas zonas de extracción petrolera.

Dentro de los efectos en la salud del ser humano, por la ingesta de contaminantes presentes en las aguas de producción están las siguientes: Vómitos, mareos, irritación del estómago, aumento de la presión cardíaca, daño del tejido pulmonar, depresión del sistema nervioso central, dolores de cabeza, falta de coordinación muscular y otras enfermedades.

Los límites de toxicidad de algunos metales pesados y otros compuestos en el agua, han sido determinados por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA), y se enuncian a continuación: Benceno 0.01 mg/L, Cobre < de 1.3 mg/L, Tolueno 1 mg/L, Arsénico 0.005 a 0.001 mg/L, Fenoles 0.001 mg/L, Plomo 0.015 mg/L, Hidrocarburos aromáticos 0.0007 mg/L, Cadmio 0.0005 mg/L, Bario < de 2 mg/L, Vanadio < 0.009 mg de pentóxido de vanadio, Mercurio 0.002 mg/L en agua

potable y en aguas superficiales < de 0.000144 mg/L, Sulfatos < 400 mg/L, Cloruros 4 mg/L de cloro libre en el agua potable.⁶

Por otra parte, el contacto de las aguas de producción con los recursos naturales de un ecosistema en particular, presenta los siguientes impactos ambientales: contaminación del recurso agua superficial y subsuperficial, alteración y muerte de especies acuáticas, eliminación de cobertura vegetal, cambio en la textura y permeabilidad del suelo, cambio en el estado natural del paisaje, muerte de especies faunísticas y florísticas endémicas, y migración de especies.

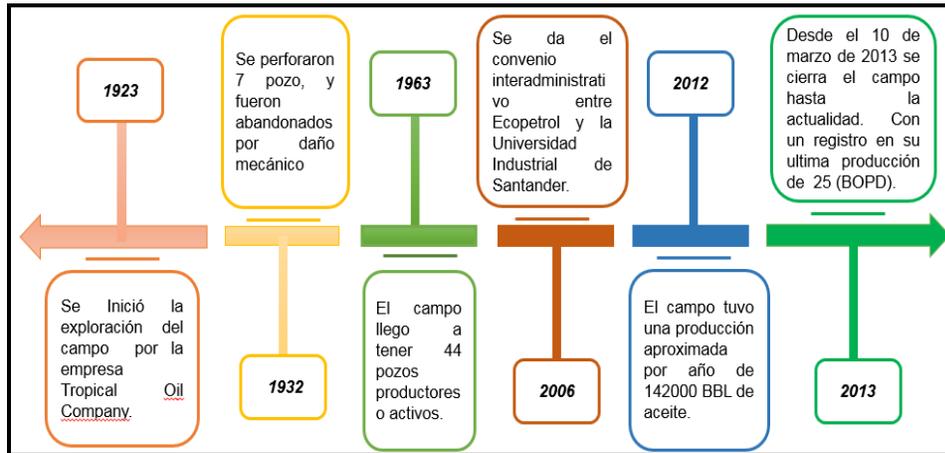
2.2. ANTECEDENTES

- Entre 1953 y 1964, ECOPETROL inició el desarrollo del Campo Colorado perforando un total de 75 pozos. En 1963 se alcanzó el máximo número de pozos activos, 44 pozos.
- En 2006, nace el Campo Escuela-Colorado bajo la firma del Convenio Interadministrativo de Colaboración Empresarial con fines Científicos y Tecnológicos, entre la UIS y ECOPETROL S.A.
- Fecha de entrega del campo –1 Junio de 2006. Entre 1953 y 1964, ECOPETROL inició el desarrollo del Campo Colorado perforando un total de 75 pozos.
- La vigencia del convenio es de 10 años, prorrogables.⁷

⁶ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Introduction to clean water act. U.S. 2012. p. 25

⁷ Campo Escuela Colorado Convenio UIS – ECOPETROL S.A. Op. cit. p.4.

Figura 2. Línea de tiempo de producción de Campo Escuela Colorado.



2.3. GENERALIDADES

El petróleo se extrae principalmente de las formaciones mugrosas (zonas B y E) y Esmeraldas (zona D).

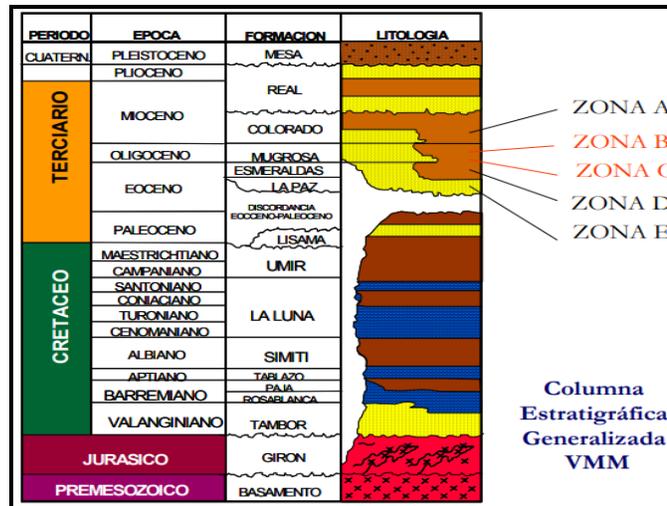
- Sistema fluvial meándrico.
- Acumulaciones de aceite liviano y gas con gravedad API 36 a 42° API.
- El yacimiento presenta poca continuidad lateral en los cuerpos arenosos, que unido a la baja energía del yacimiento y sus arenas delgadas (por debajo de 20 pies) hace que la producción acumulada de los pozos sea muy baja.
- La producción de crudo se ha visto afectada históricamente por problemas de parafinas a lo largo de su desarrollo, y malas propiedades petrofísicas del yacimiento.
- Levantamiento por bombeo mecánico.⁸

2.4. YACIMIENTO

⁸ Campo Escuela Colorado Convenio UIS – ECOPETROL S.A. Op. cit., p. 7.

El Campo Colorado produce principalmente de las formaciones Mugrosa y Esmeraldas. Y existe potencial para producir de una amplia secuencia de la columna estratigráfica.

Figura 3. Formaciones productoras, campo escuela colorado.



Fuente: Campo Escuela Colorado Convenio UIS – ECOPEPETROL S.A. [En línea]. 2007. p.9

2.5. PRODUCCIÓN

En la producción de los Pozos activos de Campo Escuela Colorado se proyecta:

- La Evaluación del potencial de los pozos activos e inactivos, para su reacondicionamiento con técnicas convencionales y no convencionales.
- Implementación de nuevos de sistemas de levantamiento artificial para campos de bajo potencial.
- Estrategias para la inhibición y remediación de la precipitación de parafinas.
- Mejores prácticas en trabajos de pozo.
- Redimensionamiento de las facilidades de superficie.

- Mantenimiento de instalaciones petroleras.⁹

Tabla 1. Producción pozos campo escuela colorado.

POZOS ACTIVOS			
Pozo	Bloque	Produccion Acumulada (KBIs)	Reservas Por Producir (KBIs)
COL-12	II	129.6	103.1
COL-36	V	282.2	245.0
COL-37	VI	277.2	251.7
COL-38	I	518.7	283.7
COL-69	III	72.9	178.2
COL-70	II	39.2	42.6
COL-75	V	96.9	77.6

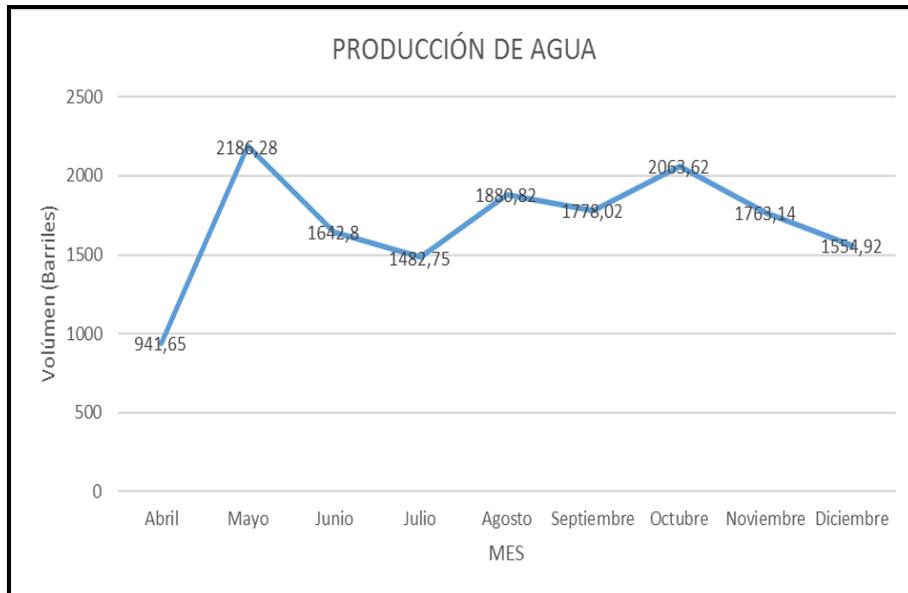
Fuente: Campo Escuela Colorado Convenio UIS – ECOPEPETROL S.A. [En línea]. 2007. p.16

2.6. CURVA DE PRODUCCIÓN DE AGUA

La curva de producción de agua se establece para el año 2012, puesto que en el año 2013 el Campo Escuela Colorado, detiene sus actividades de producción de hidrocarburos, debido a inconvenientes presentados.

⁹ Campo Escuela Colorado Convenio UIS – ECOPEPETROL S.A. Op. cit., p. 16.

Tabla 2. Volúmenes consolidados del agua tratada en el Campo Escuela Colorado en el año 2012.



Fuente: BENAVIDES, Jhon y JAIMES, Yureynis. Factibilidad técnico – Financiera de los usos alternativos del agua de producción en Campo Escuela Colorado. Tesis de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2014. p.135.

3. EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA

A continuación, se presenta la normatividad ambiental colombiana, enfocada a la protección y cuidado de los recursos naturales dentro del territorio nacional.

Tabla 3. Normatividad ambiental colombiana legal vigente.

NORMA	ALCANCE	DESCRIPCIÓN
Constitución Política de Colombia	Nacional	Establece que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente y conservar las áreas de importancia ecológica. Además, deberá planificar el manejo y el aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Artículo setenta y nueve y ochenta y nueve (Art. 79, 80 y 95).
Ley 23 de 1973.	Nacional	Principios fundamentales sobre prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo y otorgó facultades al Presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales. ¹⁰
Decreto ley 2811 de 1.974.	Nacional	Código nacional de los recursos naturales renovables RNR y no renovables y de protección al medio ambiente. El ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo. Regula el manejo de los RNR, la defensa del ambiente y sus elementos.

¹⁰ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 23 de 1973 (19, diciembre, 1973). Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 1973.

NORMA	ALCANCE	DESCRIPCIÓN
Decreto 1594 de 1984	Nacional	Este decreto reglamenta los usos del agua y residuos líquidos, donde se requiere que todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir unos parámetros establecidos en la norma ¹¹ .
Ley 99 de 1993.	Nacional	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y Organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Reforma el sector Público encargado de la gestión ambiental. Organiza el sistema Nacional Ambiental y exige la Planificación de la gestión ambiental de proyectos. Los principios que se destacan y que están relacionados con las actividades portuarias son: La definición de los fundamentos de la política ambiental, la estructura del SINA en cabeza del Ministerio del Medio Ambiente, los procedimientos de licenciamiento ambiental como requisito para la ejecución de proyectos o actividades que puedan causar daño al ambiente y los mecanismos de participación ciudadana en todas las etapas de desarrollo de este tipo de proyectos.
Decreto 2820 de 2010.	Nacional	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
Decreto 953 del 17 de mayo de 2013.	Nacional	El presente decreto tiene por objeto reglamentar el artículo 111 de la Ley 99 de 1.993 modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2.011, con el fin de promover la conservación y recuperación de las áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua a los acueductos municipales, distritales y regionales, mediante la adquisición y mantenimiento de dichas áreas y la financiación de los de esquemas de pago por servicios ambientales.

NORMA	ALCANCE	DESCRIPCIÓN
Decreto 3930 de 2010.	Nacional	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
Resolución 0631 de 2015.	Nacional	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

3.1. NORMATIVIDAD COLOMBIANA VIGENTE PARA EL VERTIMIENTO DE AGUAS ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS

Se realizó un análisis comparativo de las tres normatividades, que han aplicado y aplican en el contexto del tratamiento, cuidado y disposición final de las aguas de producción generadas por el desarrollo de diversas actividades.

3.1.1. Decreto 1594 de 1984¹². Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

Contenido.

- Definiciones.
- Ordenamiento del recurso.

¹² PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 1594 (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

- La destinación genérica de las aguas superficiales, subterránea, marítimas, estaurinas y servidas.
- Criterios de calidad para destinación del recurso.
- Las concesiones. -vertimiento de los residuos líquidos.
- Obtención de los permisos de vertimiento y los planes de cumplimiento para usuarios existentes.
- Los permisos de vertimiento y autorizaciones sanitarias para usuarios nuevos y usuarios existentes que realizan ampliaciones o modificaciones.
- Las autorizaciones sanitarias.
- Los procedimientos para la modificación de normas de vertimiento y criterios de calidad.
- Las tasas retributivas. -los estudios de efecto ambiental o impacto ambiental.
- Los métodos de análisis y de la toma de muestras.
- La vigilancia y el control.¹³

Resumen.

El Decreto 1594 de 1984 establece, en efecto, que se debe desarrollar un plan de ordenamiento del recurso para la destinación genérica del agua, y que se debe reconocer que el problema no sólo está centrado en la calidad de los vertimientos, sino también en la conservación de la calidad de los cuerpos de agua que cumplen una doble función: servir de sumideros de aguas residuales y de fuente de abastecimiento de agua.¹⁴

- Se delega al EMAR como la entidad encargada de manejo y administración de los recursos naturales.

¹³ Observatorio ambiental de Bogotá. Datos e indicadores para medir la calidad del ambiente en Bogotá. Documentos e Investigaciones. Decreto 1594 de 1984. [En línea]. 2012. [Citado el: 15 marzo de 2017] <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/decreto-1594-de-1984>. 2017

¹⁴ LONDOÑO, Rubén. Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Bogotá, 2007. P. 89-104.

- Se utiliza una cantidad menor de significados en comparación a las otras normas.
- El alcance de este decreto fue muy limitado, comparado con las implicaciones de la normatividad vigente.
- Esta norma no garantizaba el control efectivo de la contaminación, sobre el recurso agua.
- Amplifica el concepto de Tasa Retributiva y reglamenta los permisos de vertimientos.
- Distinguía usuarios nuevos, existentes.
- El valor de pH lo consideraba óptimo en un rango de 5 a 9 unidades.
- La remoción en carga se determinaba en porcentajes de eficiencia (Kg/día) para DBO₅, SST, Grasas y Aceites.
- Hacía referencia a seis parámetros para cuerpos de agua; siete parámetros para el alcantarillado, 22 sustancias de interés sanitario.
- Sus artículos tenía gran relación a lo estipulado en el Decreto 2811 del 1974, conocido como el código nacional de los recursos naturales.
- El cumplimiento, modificación o complementación de este decreto era aplicado a las autoridades como el INDERENA y el Ministerio de Salud, las Corporaciones Autónomas Regionales y la Dirección Marítima Y Portuaria.
- Los criterios de calidad del agua se referenciaban al uso destinado para la misma, como los siguientes: consumo humano, uso agrícola, uso pecuario, uso recreativo, uso estético.¹⁵

3.1.2. Decreto 3930 de 2010.¹⁶ Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

¹⁵ PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 1594., Op. Cit.

¹⁶ PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 3930 de 2010 (25, octubre, 2010). Gestión integral del recurso hídrico.

Contenido.

- Disposiciones Generales.
- Definiciones.
- Del Ordenamiento del Recurso Hídrico.
- De la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas y marinas.
- De los criterios de calidad para destinación del recurso.
- De los vertimientos.
- De la obtención de los permisos de vertimiento y planes de cumplimiento.
- Del Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos.
- Reglamentación de vertimientos.
- Registro de los permisos de vertimientos.
- Disposiciones finales.

Resumen.

- Tiene como objeto la reglamentación de los usos y ordenamiento del recurso hídrico y de los vertimientos (a cuerpos de agua, al mar, al suelo -asociado a acuíferos- y al alcantarillado público).
- En este decreto se delega al estado como encargado del manejo y administración de los recursos.
- Aplica a las Autoridades Ambientales Competentes (AAC), a los generadores de vertimientos y a las personas prestadoras del servicio público domiciliario de alcantarillado.
- Este decreto entro a complementar el decreto 1594 de 1984, dando claridad y veracidad a la aplicación del decreto.
- No distingue entre usuarios.

- El valor de pH lo considera óptimo en un rango de 6 a 9 unidades, para cuerpos de agua. Y 5 a 9 unidades para el alcantarillado.
- La remoción se determinaba en concentraciones finales expresadas en (mg/L).
- Establece la obligación a cargo de las AAC de hacer un Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico, clasificando los usos del agua, fijando su destinación y uso, definiendo objetivos de calidad, programas de seguimiento, inclusión en el PGAR, criterios de priorización, siguiendo una guía de modelación (a promulgarse por el MAVDT y el IDEAM en 8 meses), entre otros aspectos.
- Determina la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas y marinas, de los usos del agua y de los criterios de calidad.
- Reglamenta los vertimientos líquidos estableciendo prohibiciones, actividades no permitidas, modos de actuación ante derrames, actividades de mantenimiento, y control de contaminación por aplicación de agroquímicos, entre otros.
- Determina la obligatoriedad de obtener Permiso de Vertimientos cuando estos se hacen a aguas superficiales, marinas o al suelo.
- Exceptúa expresamente del Permiso de Vertimientos a todos los usuarios y/o suscriptores conectados a un sistema de alcantarillado público.
- Establece los requisitos para obtener el permiso de vertimientos (más requisitos y documentos).
- Establece nuevas obligaciones como la Evaluación Ambiental del Vertimiento para vertimientos a cuerpos de agua o suelo, por actividades industriales, comerciales o de servicio y conjuntos residenciales. Consagra el Plan de Gestión del Riesgo para el Manejo de Vertimientos.
- Fija un procedimiento más ágil y expedito para la obtención del permiso y nuevos términos para su renovación (solicitud entre 12 y 9 meses antes de su vencimiento).

- Nuevos criterios para los Planes de Cumplimiento, manteniendo los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) para prestadores del servicio de alcantarillado.
- Consagra la alternativa del Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en la gestión de vertimientos.
- Determina la reglamentación de vertimientos asociada a los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico y el Registro de Vertimientos a cargo de las AAC.
- El MAVDT deberá expedir una resolución para las normas o estándares de vertimientos y un Protocolo, a nivel nacional. 17) Mientras tanto siguen vigentes los artículos 37 a 48, 72 a 79, 155, 156, 158, 160 y 161 del Decreto 1594 de 1984.
- Consagra un régimen de transición para los generadores de vertimientos.
- Deroga los artículos 193, 213 a 217 y 231 del Decreto 1541 de 1978. 20) Deroga casi todo el Decreto 1594 de 1984, excepto los artículos 20 y 21 (sustancias de interés sanitario).

3.1.3. Resolución 0631 de 2015.¹⁷ Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Contenido.

- Disposiciones Generales.
- Disposiciones Aplicables a los vertimientos puntuales de Aguas Residuales.

¹⁷ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 (15, marzo, 2015). Por la cual se establece los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial y a los sistemas de alcantarillado público. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2015. p.1-62.

- Valores Límites Máximos Permisibles Microbiológicos en Vertimientos Puntuales de Aguas Residuales (ARD y ARnD) a Cuerpos de Aguas Superficiales.
- Parámetros de Ingredientes Activos de Plaguicidas de las Categorías Toxicológicas IA, IB y II y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no Domésticas – ARnD a Cuerpos de Aguas Superficiales y al Alcantarillado Público.
- Parámetros Físicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas – ARD y de las Aguas Residuales (ARD – ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales.
- Parámetros Físicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales.
- Actividades Industriales, Comerciales o de Servicios Diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales. Parámetros físicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD al Alcantarillado público.
- Disposiciones Finales.

Resumen.

- Límites Permisibles: Ocho Sectores que Representan 73 actividades.
- Anexos Descriptivos donde se especifican las actividades objeto de regulación en la Resolución.
- Límites Permisibles para Categorías de otros; para las actividades diferentes a las contempladas en la Resolución.

- Se definieron como límites permisibles 56 parámetros y valores según las actividades productivas.
- Se incorporó la diferenciación de las Aguas Residuales Domésticas (ARD) de las Aguas Residuales no Domésticas (ARnD).
- Cumplimiento de la norma de vertimientos cuando la captación y la descarga se realicen en el mismo cuerpo de agua.
- Se pasó de los valores límites máximos permisibles expresados en carga (kg/día) a los expresados en concentración (mg/l), lo cual cambia el concepto de remoción en el tratamiento por concentración final.
- Hace referencia a cincuenta y seis parámetros fisicoquímicos, metales, metaloides, iones, compuestos de nitrógeno y fósforo, e hidrocarburos, valores máximos permisibles referentes a la calidad del agua.
- El control y seguimiento lo debe realizar la autoridad nacional de licencias ambientales – ANLA, y las corporaciones autónomas regionales.
- Este decreto aplica a la ciudadanía, los sectores productivos y los prestadores de servicios públicos con énfasis en alcantarillado.
- La resolución 0631 reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010.
- Se especifican los valores permisibles para vertimientos asociados al proceso de producción de hidrocarburos.

Tabla 4. Análisis comparativo de las normas de vertimientos, Decreto 1594 de 1984 y Resolución 0631 de 2015.

PARÁMETRO	NORMATIVIDAD DE COLOMBIANA (DECRETO 1594/84)	NORMATIVIDAD DE COLOMBIANA (RESOLUCIÓN 0631/2015) (ÁREA DE PRODUCCIÓN)
GENERALES		
Ph	5-9 Unidades de pH	6-9 unidades de pH
Temperatura	< 40 °C	<40 °C
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Remoción > 80% en carga	180.0 mg/L O ₂
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Remoción > 80% en carga Kg/día	60.0 mg/L O ₂
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Remoción > 80% en carga Y Remoción > 80% en promedio hora Kg/día	50.0 mg/L
Sólidos sedimentables (SSED)	10 ml/L	1.0 ml/L
Grasas y aceites	Remoción > 80% en carga Kg/día	15.0 mg/L
Fenoles	0.002 - 0.2 mg/L	0.2 mg/L
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,5 mg/L	Análisis y reporte mg/L
HIDROCARBUROS		
Hidrocarburos totales (HTP)	NR	10.0 mg/L
Hidrocarburos aromáticos policíclico (HAP)	NR	Análisis y reporte en mg/L
BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno)	NR	Análisis y reporte en mg/L
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX)	NR	Análisis y reporte en mg/L
COMPUESTOS DE FÓSFORO		
Fósforo total (P)	NR	Análisis y reporte en mg/L
COMPUESTOS NITROGENADOS		
Nitratos (N-NO ₃)	10	Análisis y reporte en mg/L
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	NR	Análisis y reporte en mg/L
Nitrógeno total (N)	NR	10.0 mg/L

IONES		
Cianuro Total (CN⁻)	1.0 mg/L	1.0 mg/L
Cloruros (Cl⁻)	NR	1200 mg/L
Fluoruros (F⁻)	5.0	Análisis y reporte en mg/L
Sulfatos(SO₄²⁻)	400	300.0 mg/L
Sulfuros (S²⁻)	NR	1.0 mg/L
METALES Y METALOIDES		
Arsénico (As)	0,5 mg/L	0.1 mg/L
Bario (Ba)	5.0 mg/L	Análisis y reporte en mg/L
Cadmio (Cd)	0.1 mg/L	0.1 mg/L
Cinc (Zn)	2.0 mg/L	3.0 mg/L
Cobre (Cu)	3.0 mg/L	1.0 mg/L
Cromo (Cr)	0,5 mg/L	0.5 mg/L
Hierro (Fe)	NR	3.0 mg/L
Mercurio (Hg)	0,02 mg/L	0.01 mg/L
Níquel (NI)	2.0 mg/L	0.5 mg/L
Plata (Ag)	0.5 mg/L	Análisis y reporte en mg/L
Plomo (Pb)	0.5 mg/L	0.2 mg/L
Selenio (Se)	0.5 mg/L	0.2 mg/L
Vanadio (V)	0.1 mg/L	1.0 mg/L
OTROS PARÁMETROS PARA ANÁLISIS Y REPORTE		
Acidez Total	NR	Análisis y reporte en mg/L CaCO ₃
Alcalinidad Total	NR	Análisis y reporte en mg/L CaCO ₃
Dureza Cálctica	NR	Análisis y reporte en mg/L CaCO ₃
Dureza Total	NR	Análisis y reporte mg/L CaCO ₃
Color Real (medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	NR	Análisis y reporte en m ⁻¹

NR* No Reporta

Fuente: Modificado de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Decreto 1594 de 1984 y Resolución 0631 de 2015.

Realizada la comparación de la normatividad en relación a los tres decretos nombrados anteriormente, y en referencia particular al Decreto 1594 de 1984, se puede concluir que este divide los criterios de calidad del agua de acuerdo a la

destinación o uso del recurso, como los siguientes: uso doméstico, uso agrícola, uso pecuario, uso recreativo, uso estético. Pero a su vez no reporta algunos parámetros nombrados en los otros decretos, o si los nombra es haciendo referencia a otros usos totalmente diferentes, los cuales no tienen referencia al objeto de estudio de este proyecto que son las aguas de producción.

Este decreto 1594 de 1984, identificó los límites máximos permisibles para las sustancias de interés sanitario, y los criterios de la calidad del agua de acuerdo a su uso; teniendo en cuenta la toxicidad de las sustancias para evitar afecciones en la salud humana y/o muerte de organismos. Dentro del análisis realizado se deduce que esta normatividad, presenta ciertas falencias en solo centrarse en los vertimientos puntuales dejando por olvido los vertimientos no puntuales; también solo se interesó por la calidad en las concentraciones físicoquímicas de los vertimientos y dejó a un lado el cuidado y protección de las fuentes hídricas.

En el Decreto 3930 de 2010 no se consagran los valores límites máximos permisibles, para vertimientos a cuerpos de agua o al alcantarillado pues, aunque esta norma derogó el Decreto 1594 de 1984, le dio la facultad de vigencia a los artículos que establecen los valores límites de contaminación en aguas. Al igual le dispone ciertos deberes al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, como los usos del agua y criterios de calidad para cada uso, los límites de vertimiento a cuerpos de agua, aguas marinas, alcantarillados públicos y al suelo, a su vez la metodología para la toma de muestras de los vertimientos de aguas superficiales y subterráneas.

La Resolución 0631 de 2015 empezó a regir a partir del mes de enero de 2016 en todo el territorio nacional, siendo más específica que las anteriores normas y enfocada al cuidado y protección del recurso agua, al estructurarse en 8 sectores y 73 actividades dentro de las cuales se encuentra la producción de hidrocarburos,

estableciendo los valores máximos permisibles referentes a la calidad del agua para esta actividad.

La Resolución 0631 de 2015 es más estricta y permite un mayor control en los valores máximos permisibles para el vertimiento a un cuerpo de agua o al alcantarillado, pues establece los límites en mg/L y no en Kg/L, en comparación a la norma 1594 de 1984 y 0631 de 2015. Esto alude que para su estructuración necesito de referenciación internacional y de la recopilación de información de cada sector allí nombrado, como de las autoridades ambientales competentes que controlan la conservación del recurso agua.

Dentro de las falencias que presenta esta norma 0631, se evidenció que algunos parámetros establecidos como tóxicos que afectan la salud humana y alteran a su vez el estado normal de los recursos naturales, carecen de un valor límite y en su lugar se enuncia una frase “análisis y reporte”, que, para el ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, tiene como fin crear una línea base para instaurar un límite máximo permisible.

3.1.4 Impactos que genera la nueva Resolución 0631 de 2015, en la producción de hidrocarburos para el campo escuela colorado. El impacto que genera esta Resolución 0631 de 2015, en la producción de hidrocarburos para el Campo Escuela Colorado, en comparación a los anteriores decretos de vertimientos (1594 de 1984 y 3930 de 2010) es positivo. Al ser más explícita y rigurosa, pues se estructura en 8 sectores y 73 actividades dentro de las cuales se encuentra la producción de hidrocarburos. De igual manera en el artículo 11 de esta Resolución, se nombran los valores límites máximos permisibles de los parámetros de dichas aguas antes de ser vertidas, todo esto con el objetivo de promover el establecimiento de propuestas de tratamiento que mitiguen el impacto sobre el recurso agua, y a su vez la alteración del medio ambiente.

3.1.5. Referencia NACE para calidad del agua de re-inyección. En la norma se encuentran las características que deben tener las aguas que son destinadas a la inyección, según la norma NACE, no se establece estándares de calidad medio-ambientales, pero si considera los problemas de corrosión y taponamiento de los pozos destinados a la inyección.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos para la calidad del agua de acuerdo a la referencia de NACE para su re-inyeccion.

NORMA	TIPO DE ANÁLISIS	PARÁMETRO	LÍMITE DE REFERENCIA	OBJETIVO / OBSERVACIONES *
Referencia NACE	Análisis Fisicoquímicos "in situ"	Conductividad		Debe tener una conductividad similar de las aguas de formación.
		pH	6.5-8.5	Preferiblemente un pH por debajo de 8 lo cual evita la tendencia a incrustaciones.
		Fe^{2+}	<1.0 mg/L	Prevención de la corrosión de la tubería y evita la formación de precipitados.
		H_2S	0.0 mg/L	Prevención corrosión. Prevención "agriamiento" de la formación
		CO_2	<10 ppm	Prevención corrosión
		O_2	<1 ppb	Prevención corrosión
		Turbidez	< 2 NTU	Indica la presencia de solidos suspendidos
	Análisis Fisicoquímicos en el laboratorio	Cationes, Aniones	-	Previene la formación de sales y compuestos insolubles que forman incrustaciones y obstrucciones en el sistema de inyección.
		Densidad	-	Preferible que la densidad del fluido a inyectar sea superior que la densidad del líquido de la formación, para que haya mayor dispersión.
Referencia NACE		Grasas y Aceites	<5 mg/L	Previene la obstrucción de los filtros en la Superficie Evita reducir la permeabilidad de la formación
NACE		Sólidos	<5 mg/L	Evita el taponamiento de la

NORMA	TIPO DE ANÁLISIS	PARÁMETRO	LÍMITE DE REFERENCIA	OBJETIVO / OBSERVACIONES *
TMO 273-05	Calidad del Agua	suspendidos		formación receptora.
		Pendiente (caudal vs. volumen)	<0.99	Garantiza que no se excede la capacidad del acuífero.
ATSM 4412-02	Bacteriológico	BSR	$< 10^4 \text{ ufc/mL}$	Evita la producción de H ₂ S

Fuente: Guía para la disposición y tratamiento de agua producida, ARPEL.

En la tabla anterior se realiza una caracterización básica la cual incluye pH, conductividad, alcalinidad, turbidez, hierro disuelto, H_2S , grasas y aceites, sólidos suspendidos y análisis microbiológico¹⁸. La cual tiene la finalidad de dar los valores límites para su uso de re-inyección. Dentro de los plantamientos de las alternativas de tratamiento para vertimiento, se da posibilidad de una alternativa con enfoque a la re-inyección en pozos disposal.

¹⁸ PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Resolución 0135 (12, febrero, 2015.). Características del agua de inyección que debe cumplir con la normativa NACE, p.23.

4. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS.

El tratamiento del agua es una manera segura y efectiva para disminuir impacto ambiental que se obtiene cuando se realiza una descarga a un cuerpo de agua superficial. Las tecnologías para el tratamiento del agua de producción están orientadas a remover metales pesados, sólidos suspendidos, aceite, grasas, compuestos orgánicos y sales. (Ver figura 1).

Cada tecnología tiene sus ventajas y desventajas con respecto a la eficiencia del tratamiento, las cuales permiten realizar una evaluación y selección viable de las mejores tecnologías disponible en el tratamiento del agua de producción, ya que están en función de los tipos de contaminantes, los niveles de sólidos totales disueltos (TDS) Y el objetivo del tratamiento para su uso final.¹⁹

¹⁹ DASTGHEIB, Seyed. Treatment of produced water from an oilfield and selected coal mines in the Illinois Basin. Elsevier. Recuperado de: Science Direct. [En línea], 2016, vol.54, no.2.

Figura 4. Objetivos de un tratamiento del agua de producción.

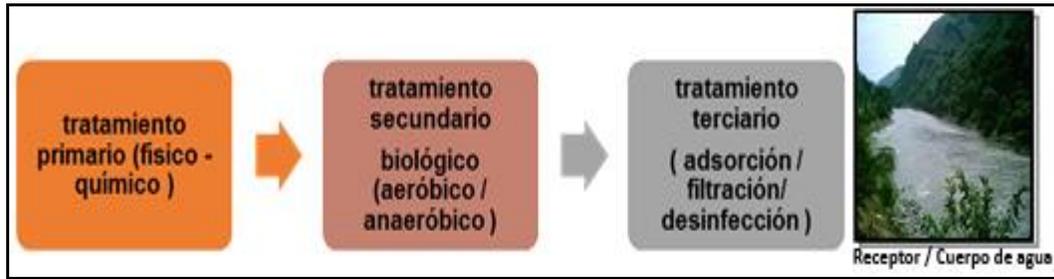


Fuente: J, Daniel y Bruce, Langhus. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. ALL CONSULTING, LLC. Tulsa, 2005.

4.1. ETAPAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS DE PRODUCCIÓN

Las etapas del tratamiento del agua de producción siguen siendo básicamente tres etapas principales. Que tienen como objetivo lograr las especificaciones requeridas para realizar un vertimiento o reutilización del agua de producción. Para ello, se incluye la utilización de varias tecnologías con el objetivo de remover el aceite y las grasas y los sólidos totales disueltos en estas aguas. (Ver figura 2)

Figura 5. Etapas del tratamiento para las aguas de producción.



Fuente: Modificado de: PEÑUELA, Gustavo y MORATÓ, Jordi. Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas, 2017.

- **Tratamiento primario.** Son procesos físicos con el objetivo de reducir las grasas y aceite libre (es decir, aceite que no está en emulsión con el agua). En general, las tecnologías empleadas para etapa primaria de tratamiento del agua de producción emplean la fuerza de gravedad que permite remover los sólidos totales en suspensión (TSS), permitiendo de forma segura la protección del medio ambiente ya que un alto contenido de aceite disperso y disuelto puede ser perjudicial cuando se realiza un vertimiento.²⁰
- **Tratamiento secundario.** En esta etapa se involucra los procesos biológicos, cuyo objetivo es remueve principalmente los compuestos orgánicos presentes en las aguas de producción. Por medio del cual, logra la eliminación de compuestos orgánicos a través de oxidación bacteriana. También este tratamiento se emplea para remover el aceite emulsionado y solidos suspendidos en forma coloidal, ya que los equipos utilizados en la etapa primaria no fueron eficientes. Por lo cual requiere de unos sistemas más especializados.
- **Tratamiento terciario.** En esta etapa, se proporciona un agua con una alta calidad. El objetivo del tratamiento terciario es eliminar cualquier contaminante

²⁰ IGUNNU, Ebenezer T. y Chen, George Z. Produced water treatment technologies, International Journal of Low-Carbon Technologies. 2012.

disperso en las aguas de producción como son: los sólidos suspendidos, los cationes y los aniones presentes en el agua, sales y metales pesados, y demás partículas en general. Para ello necesita tecnologías especializada como las membranas, osmosis inversa, desalinización, intercambio iónico y entre otras. Permitiendo de este modo comparar el tratamiento primario y secundario con el tratamiento terciario, y se puede concluir que después de pasar por un tratamiento terciario se obtiene un agua más pulida y apta para realizar un vertimiento o disposición final.²¹

4.2. TRATAMIENTOS PARA LA REMOCIÓN DE GRASAS Y ACEITES

Cuando los fluidos aceite y gas llegan a superficie a través de sus sistemas de recolección, traen consigo cierta cantidad de agua producida que requiere un tratamiento primario, basado en la remoción de sólidos suspendidos y grasas y aceites. Que para lograr esto requiere de las siguientes tecnologías descritas a continuación:

4.2.1. Tanque desnatador. Para el proceso de remoción de grasas y aceites en las aguas de producción, los tanques desnatadores a presión o atmosféricos brindan las condiciones óptimas, al permitir largos tiempos de retención, donde las pequeñas gotas se aglutinan y forman gotas de mayor tamaño, generando mayor coalescencia lo cual es muy favorable para la eficiencia de este tratamiento.²²

Los tanques desnatadores pueden tener un flujo vertical y se caracterizan por que las gotas de aceite deben ascender en contracorriente al flujo descendiente de

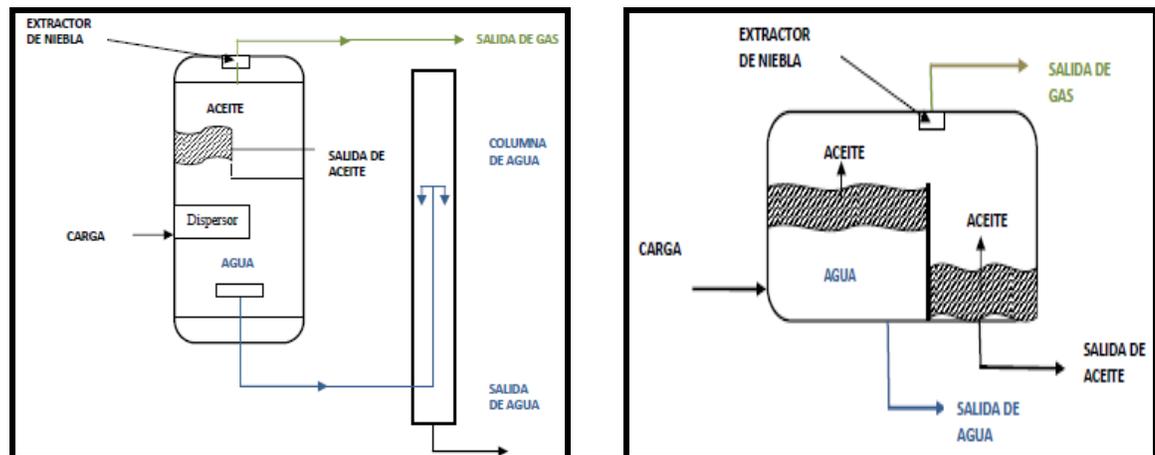
²¹ RUIZ, Luis Alfonso. Propuesta de mejoramiento para las facilidades de tratamiento del agua de producción y disposición por sistema de inyección para el campo Cabiona. Universidad Industrial de Santander. 2015. p. 43.

²² ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Surface Production Operations, Desings of Oil- Handling Systems and Facilities Vol. 1. 2 ed. Houston, 1989. ISBN: 978-0-88415-821-9

agua. También puede desarrollar un flujo horizontal, donde las gotas de aceite se elevan de manera perpendicular al flujo de agua. Este último es más eficiente, pues las gotas de agua fluyen en el mismo sentido de la corriente de agua. Estos dos flujos permiten la eliminación del desnatado de la superficie de agua. (Ver figura 6)

El grosor que adquiere la capa de grasas y aceites esta influenciado por la disimilitud gravitacional de los dos líquidos y a su vez por la altura del vertedero de aceite y de la de la lámina de agua.²³

Figura 6. Tanques desnatadores o Skim Tank vertical y horizontal.



Fuente: Kenn Arnold, Surface Production operations, Vol. 1. 2 ed. 1989

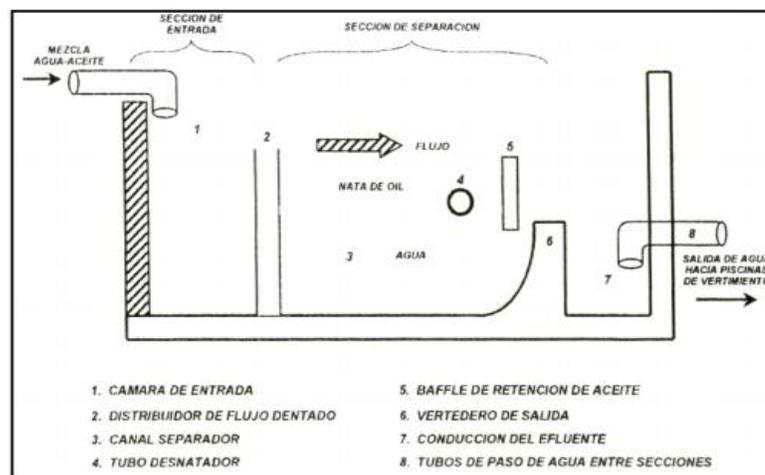
4.2.2. Separadores API. Estos sistemas de separación de aceites y sólidos aceitosos, poseen una estructura en forma de tanque de sedimentación, dividida en una secuencia de compartimientos, determinados así para el rápido ascenso de una partícula de aceite en base a su densidad y tamaño, el objetivo principal que busca este sistema, es extraer la mayor cantidad de aceite y sólidos en suspensión del agua de producción, todo esto dado por el tiempo de retención, la gravedad específica del aceite y el agua a disgregar. Entonces las partículas de

²³ Ibid. p. 56

aceite ascenderán por acción de fuertes magnitudes, y así formarán una capa de aceites y sólidos aceitosos la superficie del agua, los sólidos aceitosos se irán depositando en la parte inferior del separador, lo cual es fácil de eliminar.²⁴

Los sistemas de separación API, constan de dos secciones, en la primera sección de entrada, se encuentra una zona de disminución de la rapidez del flujo, otra de remoción de sólidos y disminución de la carga a las cámaras de compartimiento. En la segunda sección de separación, se encuentran los conductos de entrada a las cámaras, los sistemas de dirección de flujo, el tubo desnatador, y el baffle de recolección de grasas y el colector de aceite retenido.²⁵

Figura 7. Secciones de un separador API.



Fuente: PAEZ, Ruth. Operaciones de recolección y tratamiento.2000

4.2.3. Intereceptor de Placas Corrugadas (CPI). Este tratamiento para la remoción de grasas y sedimentos en las aguas de producción, se ha convertido en el medio más utilizado, por su alta eficiencia al no demandar la acción de la presión, por eventuales inconvenientes al arrastrar el gas.

²⁴ FULLER, Rick. API Separator [en línea]. [citado 28 de julio de 2017]. http://waterfacts.net/Unit_Processes/Gravity_Separators/API_Separator/api_separator.html

²⁵ PAEZ, Ruth. Operaciones de recolección y tratamiento.2000.

Su estructura física está determinada por unas láminas corrugadas, con pendientes de 45°. Mientras el agua desciende por las mismas, el aceite asciende en dirección contraria, y se ubica en el extremo superior de cada corrugación, y así formar una capa en la superficie.²⁶

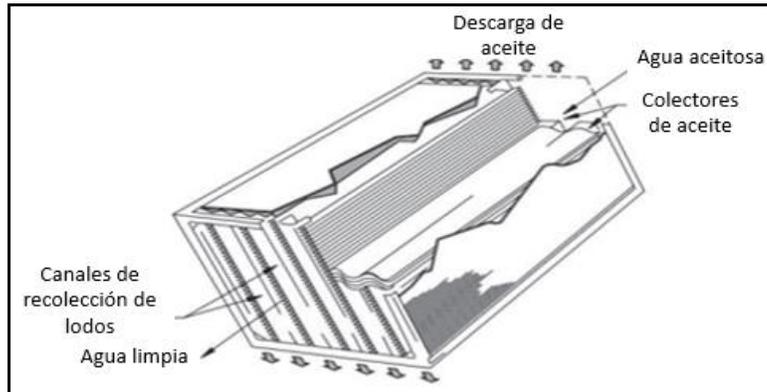
Esta técnica de tratamiento CPI, es la más usada en los tanques skimmer, pues requiere de espacios pequeños para el retiro del tamaño de las partículas aceitosas, también facilita la recolección de sedimentos y economicante es muy barato.

Las placas corrugadas de CPI, pueden ser elaboradas en base a diversos materiales como: cloruro de polivinilo (CPVC), policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), poliéster reforzado, fibra de vidrio, acero Inoxidable. Estas últimas poseen una ventaja al soportar temperaturas hasta de 350°F (125°C), entretanto las de polímero toleran hasta 140°F (55°C). Las placas de polipropileno favorecen el aglutinamiento de partículas de grasas pequeñas, en partículas más grandes, gracias a una propiedad oleofilica que atrapa las gotas de petróleo, favoreciendo el tratamiento primario del agua de producción.²⁷

²⁶ ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Op.Cit

²⁷ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Monographs on Refinery Environmental Control, Management of Water Discharges. API 421.

Figura 8. Pack de un CPI.



Fuente: ARNOLD, Ken y STEWART Maurice. 2010

4.2.4. Celdas de flotación. Este tratamiento de separación física, elimina de las aguas de producción, partículas de grasas y aceites al igual que de sólidos suspendidos con densidades iguales o menores al agua. Esta técnica de flotación proporciona a los sólidos una fuerza ascendente, mediante la formación de burbujas de gas, pues estas se adhieren a los sólidos, haciendo que sean atraídos hacia la superficie, por ello entre más grandes sean las burbujas, tanto mayor será su velocidad de ascensión.²⁸ Las principales características de los diferentes métodos de flotación, se nombran a continuación.

- **Sistema de flotación por aire disuelto (DAF):** Esta técnica genera dispersión de finas burbujas, de tamaños que oscilan entre 10 y 100 mm. También necesita la utilización de un compresor y una cámara presurizada, para saturar la etapa acuosa. Este proceso puede llegar a ser bastante costoso.
- **Sistema de flotación por aire inducido (IAF):** Esta técnica promueve la formación de burbujas con tamaños superiores a 1.000 mm. Ha sido implementada a gran escala en el tratamiento de aguas de producción. Utiliza equipos motorizados que incitan el gas a entrar a la fase acuosa, absorbiendo

²⁸ GOCHIN, J., *Flotation*, Royal School of Mines, Imperial College, London, chapter, 19: 503 - 524.

agua y a la vez succionando el aire del ambiente. Y necesita grandes cantidades de aire, para abarcar toda el agua a tratar.²⁹

- **Sistema de flotación (Diseño propuesto):** Este sistema de separación por flotación está basado en la introducción de aire atmosférico usando el agua como fluido motriz. Donde se imita el proceso DAF, pero con ventajas de un proceso IAF, en lo concerniente a la reducción en costos. Se considera un tratamiento muy efectivo. Al generar una alta cantidad de microburbujas, que oscilan entre 150 y 250 μ m de tamaño. Este sistema también permite ejecutar tratamientos de homogenización, neutralización, aireación, tratamiento químico/biológico, para la eliminación de la carga contaminante de las aguas a tratar.

4.2.5. Filtros. 30 Los filtros se ubican en etapa terciaria del tratamiento de agua de producción, debido a que las dos etapas anteriores no fueron eficientes en remoción de sólidos y grasas y aceite. Se caracterizan por permitir la remoción de hidrocarburos y sólidos en suspensión que no pudieron ser retenidos en los procesos anteriores. Basados en el principio de hidrodinámica, adhesión y atracción molecular para atrapar contaminantes. En esta fase los equipos, más utilizados son: filtros de lecho empacado (que puede ser grava, antracita, granate o cascarilla de nuez y avellana).

- **Filtros de tierra diatomea:** La tierra diatomea es una sílica extremadamente pura, formada por fósiles de plantas marinas unicelulares. Esta se deposita sobre un tamiz o lienzo. Siendo este lecho el que actúa como medio filtrante. Este filtro opera hasta que la caída de presión a través del mismo alcance un nivel pre establecido, entonces se retro lava desechándose el material

²⁹ SANDER, E. DE RIJK., Jaap, H. J. M., VAN D. G. and JAN G. D. B., 1994. *Bubble size in flotation thickening*, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Water Management, The Netherlands, p.: 465 - 473.

³⁰ ARPEL. Guía Disposición y tratamiento del agua producida.

filtrado. los filtros de TD son los más complicados que los otros filtros en cuanto a su operación y mantenimiento.³¹

- **Filtros de cartucho:** Son los que generalmente utilizan cilindros contruados de material poroso tal como papel, metal perforado o sintetizado, piedra o están formados por fibra tejidas de materiales sintéticos tales como: polipropileno, vidrio o celulosa. Su función consiste que el fluido atraviesa el cartucho filtrante dejando en éste retenidos todos los contaminantes seleccionados. La técnica de filtración por cartucho es la más aconsejada para aquellas aplicaciones cuyas exigencias en cuanto a calidad y seguridad sean elevadas.³²
- **Filtros de cáscara de nuez:** Son desarrollados como el método más conveniente de filtración de aceite libre y sólidos suspendidos, en aplicaciones donde los lechos de arena eran convencionalmente usados, el lecho es de 100% cáscaras de nuez, las cuales tienen excelentes características de superficie para la coalescencia y filtración. Remueve partículas de hasta 5 µm de diámetro con una eficiencia de 98% dentro del proceso³³.

4.2.6. Ósmosis inversa. Es una tecnología utilizada para la desmineralización de las aguas, mediante la utilización de membranas para la separación de sólidos disueltos, o iones presentes en una solución. Dichas membranas ejercen una acción filtrante de barreras semi-selectivas, debido al empuje aplicado por la presión osmótica de la solución más salada. La osmosis inversa ofrece la mejor

³¹ Ibid.p.51

³² SEFILTRA, purificación de fluidos. [En línea] [citado 19 de octubre de 2016] disponible en: <http://www.sefiltra.com/filtros-de-cartucho-cartuchos-filtrantes.php>.

³³ DUARTE, PAULA ALEJANDRA. Análisis técnico-económico de alternativas de tratamiento de agua de producción para el cumplimiento de la normatividad ambiental colombiana.2013.p.58.

filtración disponible actualmente, siendo el mejor rechazo de sólidos disueltos, y de sólidos en suspensión.³⁴

- **Membrana de ósmosis inversa.**

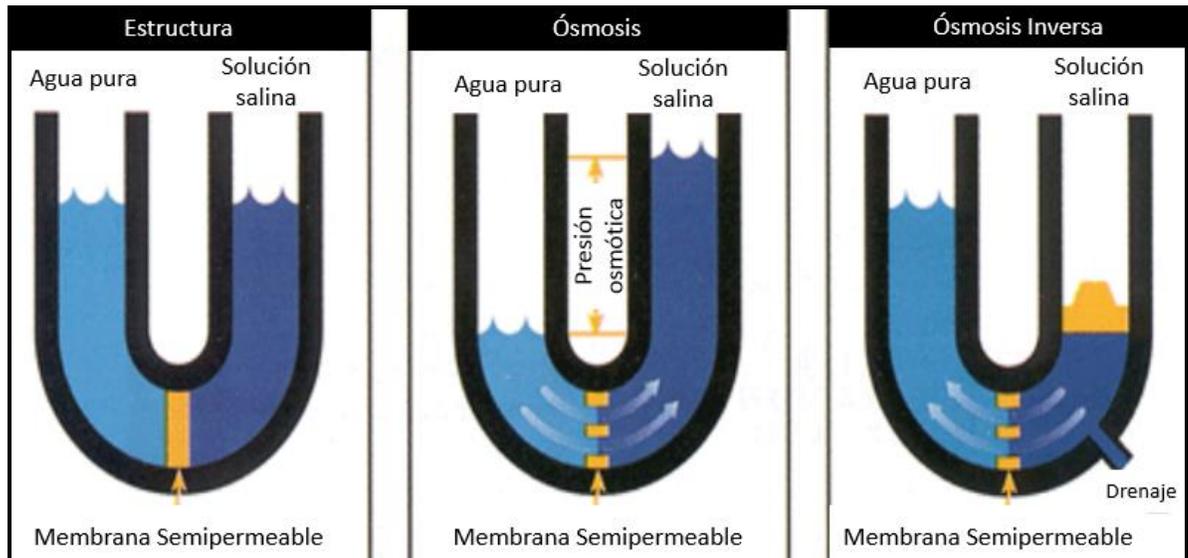
Esta membrana consta de un área "microporosa" que resiste las impurezas y permite el paso del agua. La membrana rechaza las bacterias, pirógenos, y 85%-95% de sólidos inorgánicos. Los iones "polivalentes" son rechazados más fácilmente que los iones "monovalentes". Los sólidos orgánicos con un peso molecular superior a 300 Kg/mol son rechazados por la membrana, pero los gases pasan a través. La ósmosis inversa es una tecnología de rechazo en porcentaje.

También retiene otras sustancias disueltas con altos contenidos de sales como sodio, calcio, boro, hierro, cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos; hasta alcanzar los límites considerados como agua aceptable.³⁵

³⁴ KUCERA J. Reverse Osmosis. Design, Processes, and applications for Engineers. Co-published by John Wiley& Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Salem, Massachusetts. 2010. USA. P. 151

³⁵ Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. Ósmosis inversa. [En línea]. Julio de 2012. [Citado el: 22 mayo de 2017] http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf

Figura 9. Osmosis inversa.



Fuente: Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. *Osmosis inversa*.2012

4.3. TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE SALES EN AGUAS DE PRODUCCIÓN

Las sales presentes en las aguas producidas se consideran un gran problema, debido: a su difícil remoción, que requiere tecnologías de mayor avance, y su alto costo de tratamiento. Pero cabe resaltar que remover las sales presentes en estas aguas es de gran importancia para el cumplimiento de la normatividad Colombiana. Lo cual a merita la implementación de estas tecnologías dentro de un sistema de tratamiento de agua de producción.

4.3.1. Nanofiltración. Es un metodo de separación por flujo cruzado a presión, caracterizado porque sus membranas poseen un tamaño de poro similar a un peso molecular de 200 dalton a 1.000 dalton. Por ello, son apropiadas para concentrar compuestos orgánicos y desmineralizar.

Su presión de trabajo oscila entre los 10 bar y los 34 bar y se caracterizan por separar moléculas orgánicas poco pesadas y sales multivalentes del agua. Los componentes de las membranas suelen ser de acetato de celulosa y de polisulfona. La superficie está cargada eléctricamente y juega un papel primordial en el proceso de transporte y separación.

La principal característica de las membranas de nanofiltración es su capacidad de retener iones monovalentes. En cambio, rechaza los iones divalentes (calcio, magnesio, sulfatos, bicarbonatos, etc.) permitiendo suavizar o ablandar el agua.³⁶

- **Remoción y eficiencia.**

Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables, Sales minerales, Nitrato, fosfato, Color verdadero, Materia Orgánica, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), índice de fenol, entre otros.

Logra remociones de sales, desmineralizado, remoción de color, material orgánico e iones sobre un 99%.³⁷

- **Ventajas.**

- ✓ Alta eficiencia.
- ✓ Sistema compacto y de fácil operación.
- ✓ Genera aguas de alta calidad y posee un menor rechazo que la osmosis por ser un proceso de baja presión.
- ✓ Generación de bajos volúmenes de rechazo.
- ✓ Puede tratar grandes volúmenes de agua.
- ✓ Bajos costos de operación.³⁸

³⁶ MORCILLO, Gabriel. Diseño y construcción de una planta piloto para la purificación de salmueras de desalación, 1985. p.27

³⁷ Fundación Chile. Tecnologías de nanofiltración. Tecnología convencional tipo físico. [En línea]. Noviembre de 2015. [Citado el 27 mayo de 2017] http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_23.pdf.

4.3.2. Electrodialisis. Es un proceso electroquímico en donde se separan los iones disueltos del agua, a través de membranas iónicas con permeabilidad selectiva (aniones y cationes), estas rechazan la carga opuesta, todo esto bajo la influencia de un gradiente de potencial eléctrico. Una pila de electrodialisis se compone de una serie de membranas de intercambio aniónico y membranas de intercambio catiónico, organizadas en forma alterna entre el ánodo y el cátodo. Los cationes cargados positivamente se trasladan hacia el cátodo, pasan la membrana de intercambio catiónico y son rechazadas por la membrana de intercambio aniónico. Lo opuesto acontece cuando los aniones cargados negativamente migran al ánodo.³⁹

- **Remoción y eficiencia.**

Sólo remueve especies cargadas eléctricamente como sales minerales, nitrato, fosfato, sulfato, entre otras. Dependiendo de la química del agua de alimentación, la remoción de iones cargados eléctricamente de agua mediante esta tecnología alcanza valores entre 70 y el 90%.⁴⁰

- **Ventajas.**

- ✓ Procedimiento de manejo simple.
- ✓ Funciona mediante el uso de sistemas pequeños, por lo cual funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento.
- ✓ Emplea diversas fuentes de energía eléctrica (no renovables o renovables como solar a eólica).

³⁸ Ibid.p.4

³⁹ COLORADO SCHOOL OF MINES. Earth Energy Environment. *Technical assessment of produced water treatment technologies*, November 2009. 1st EDITION. p. 35

⁴⁰ Ibid.p. 36

- **Desventajas.**

- ✓ Necesita gran cantidad de energía para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema.
- ✓ Requiere procesos de purificación previa del agua a tratar.
- ✓ Es recomendable no utilizar esta técnica para aguas de dureza superior a 1ppm.⁴¹

4.3.3. Destilación por membrana. La destilación por membranas se basa en un nuevo proceso ejecutado térmicamente donde exclusivamente las moléculas de vapor pasan a través de la membrana, pues esta es hidrofóbica. La solución que entrará al proceso está en contacto inmediato con una de las zonas de la membrana pero no ingresa por los poros de esta. La fuerza que permite la separación es la presión de vapor que se genera en la membrana. Al incrementarse la temperatura de la solución aumenta la presión de vapor y, por tanto, también aumenta el gradiente de la presión de vapor que es la fuerza impulsora.⁴²

- **Aplicaciones de la destilación por membranas en la Extracción de petróleo.**

Esta tecnología es altamente aplicada por la disminución en la cantidad de agua producida en la extracción de petróleo; también para el tratamiento del agua producida en sistemas de extracción convencionales y no convencionales (fracking, etc.); y por último en el tratamiento de aguas residuales de las refinerías.

⁴¹ Fundación Chile. *Tecnologías de membrana electrodiálisis*. [En línea]. Febrero de 2014. [Citado el 7 junio de 2017] http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_24.pdf

⁴² COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit., p. 40

- **Ventajas.**

- ✓ Regularmente no requiere un pretratamiento de la solución en el prolongamiento de la vida de la membrana.
- ✓ La eficiencia del proceso y la alta calidad del agua producida son independientes de la concentración de sal de la solución; y rechazo del 100% de solutos no volátiles.
- ✓ Probabilidad de tratar vertimientos corrosivos y ácidos, que en destilación convencional es complejo por los materiales que se requieren; y flexibilidad de operación al tratarse de módulos independientes.

- **Desventajas.**

Las pérdidas de calor que se generan por la conductividad de las membranas, disminuyen la eficiencia térmica de este tratamiento. También se disminuye el flujo permeado en la membrana, como consecuencia de procesos de polarización de concentración y temperatura. Por otra parte en ocasiones se presenta el efecto wetting que permite la penetración de impurezas presentes en el alimento a los poros de la membrana, disminuyendo así el flujo de permeado.⁴³

4.4. TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS

Los metales pesados en las aguas producidas se refieren a aquellos metales que causan un impacto ambiental debido a su toxicidad cuando se encuentra a niveles superiores a los límites máximos permisibles. Como control a esta situación se requiere tecnologías con mayor eficiencia y mas complejas en su proceso de remoción.

⁴³ Condorchem Envitech. *Destilación por membranas para tratar aguas residuales*. Artículo. Febrero de 2017.

Estas la tecnologías para el tratamiento de metales pesados depende de diferentes factores, en esta seccion seran descritas aquellas tecnologías convencionales que se concentran solamente en la remocion de metales pesados.

4.4.1. Filtros biológicos aireados. Los filtros biológicos aireados (FBA) son una tecnología que consta de medios permeables como rocas, grava o medios plásticos. Utiliza condiciones aeróbicas para facilitar la oxidación bioquímica y la separación de constituyentes orgánicos en el agua contaminada.

Esta tecnología emplea tres (3) fases en su tratamiento, la fase sólida donde se permite la retención de las materias sólidas mediante filtración, favoreciendo que las colonias bacterianas permanezcan en el interior. La fase líquida por donde el agua pasa y se depura y una fase gaseosa donde se da la degradación aeróbica de la materia orgánica carbonada y nitrogenada. ⁴⁴

- **Remoción y eficiencia.**

Puede remover el aceite, el amoníaco, los sólidos suspendidos, el nitrógeno, la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO), los metales pesados, el hierro, los componentes orgánicos solubles y sulfuro de hidrógeno producidos en el agua.

- **Ventajas.**

- ✓ Es muy versátil para adaptarse a efluentes de diferentes características.
- ✓ Disminuye la contaminación biológica, los olores y clarifica el agua tratada, mediante el proceso de filtración que ejecuta.

⁴⁴ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

- ✓ No requiere grandes extensiones de espacio para su implantación. ⁴⁵

4.4.2. Adsorción con carbón activado. La adsorción con carbón activado se utiliza generalmente como un paso de pulido en un tratamiento en lugar de ser una tecnología independiente, ya que adsorbentes pueden ser fácilmente sobrecargados con compuestos orgánicos. Ha sido utilizado para eliminar manganeso, hierro, carbono orgánico total (TOC), BTEX, petróleo y más del 80% de los metales pesados presentes en los agua. ⁴⁶ El proceso de adsorción es aplicable al tratamiento del agua independientemente de su salinidad.

- **Remoción y eficiencia.** Esta tecnología es altamente eficiente, alcanza remociones entre el 95 – 99 %. Remueve materia orgánica la DBO₅, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables, compuestos orgánicos como: hidrocarburos, Índice de Fenol, pesticidas, Trihalometanos, Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX), color, sabor, olor, grasas y aceites, compuestos inorgánicos como: cloro libre y bromo, en Metales pesados como el Mercurio. ⁴⁷
- **Ventajas.**
 - ✓ Altamente efectivo a muy bajas concentraciones de metal.
 - ✓ Especial para remoción de mal olor, sabor o color desagradable.
 - ✓ Remueve plaguicidas y compuestos orgánicos volátiles.
 - ✓ Permite la fijación de metales en presencia de otros cationes.
 - ✓ Es fácil de operar y mantener. Además, el adsorbente puede ser regenerado.

⁴⁵ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas Residuales, teoría y principios de diseño*. Escuela colombiana de ingeniería. 2014, p. 551

⁴⁶ COLORADO SCHOOL OF MINES. *Technical Assessment of produced water treatment technologies. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water*. RPSEA Project 07122-12, Colorado, 2009 p.128.

⁴⁷ SPELLMAN FR. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. CRC Press, 2003.p.630.

- **Desventajas.**

- ✓ El costo del adsorbente y su regeneración es alto.
- ✓ Esta tecnología no destruye los contaminantes y eventualmente se requiere de otra tecnología que si lo haga.
- ✓ Generan residuos que deben ser dispuestos en vertederos controlados.
- ✓ La capacidad de adsorción es altamente dependiente del pH.
- ✓ Es necesario eliminar los materiales en suspensión antes de que el efluente sea tratado.⁴⁸

4.4.3. Precipitación química. Esta tecnología implica la adición de reactivos al agua de producción, para transformar los contaminantes con una alta solubilidad en insolubles, y así promover su remoción. Este proceso se basa en tres pasos: coagulación, floculación y sedimentación, y a su vez es el más usado para disminuir la concentración en metales pesados, sólidos en suspensión, grasas y aceites y sustancias orgánicas. Este proceso se caracteriza por una eficiencia del 90 al 99,9 %, en la remoción de carga contaminante elevada en efluentes industriales, mejorando sus resultados si adhiere a su técnica métodos terciarios de tratamiento.⁴⁹

- **Remoción directa.** Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno, Fósforo (P), Turbidez, Sólidos Sedimentables, cationes y aniones en general.
- **Remoción indirecta.** Color, Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX), Aceites y Grasas y regular pH. Además es posible remover Mercurio.⁵⁰

⁴⁸ REYES, T. Erik, et al. *Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa*. Ingenierías, 9 (31). 2006. p. 59-64.

⁴⁹ CHEN, et al; Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Residual*.2009. p. 43.

⁵⁰ RUBIO, Diego, et al. Treatments for Removal of Heavy Metals Commonly Found in Industrial Wastewater. A Review. *Journal Engineering and Region*. January 2015.p. 80

- **Ventajas.**

- ✓ Su periodo de tratamiento es corto y permite una mayor carga de sólidos en el agua.
- ✓ Remueve diversos parámetros en forma simultánea.
- ✓ Procedimiento de manejo sencillo.
- ✓ Utiliza reactivos comunes para la coagulación y/o floculación.
- ✓ Es efectivo en la remoción de varios parámetros en forma aleatoria.
- ✓ Se adecua a cambios bruscos en las concentraciones de contaminantes de las aguas a tratar.

- **Desventajas.**

- ✓ Requiere uso de insumos constantes.
- ✓ Necesita áreas para el acopio de reactivos.
- ✓ Produce lodos peligrosos, en base a la composición de las aguas a tratar, los cuales necesitan tratamiento.⁵¹

4.5. TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE BARIO

El bario es otro problema que hay en las aguas producidas, porque este contaminante es tan tóxico para el ser humano, que en pequeñas cantidades ocasiona afecciones a las personas⁵². A continuación se comentan las técnicas generales para retirar el bario de las aguas asociadas a producción de hidrocarburo.

⁵¹HUISMAN, et al; 2006. p.55

⁵²ERNESTO SIMON. Grupo de Físicoquímica de Procesos Industriales y Medioambientales, FQPIMA.

Tratamiento químico.

Una de las formas de eliminar químicamente el bario es mediante precipitación química, donde se forma una solución insoluble, mediante la incorporación de una sal. Es importante nombrar que la dosis necesaria se calcula una vez se va a realizar el tratamiento teniendo en cuenta la carga de bario presente y el volumen del agua de producción a tratar. Mediante los procesos de coagulación y/o la floculación, se elimina soluto insoluble, presente en el agua.⁵³

- **Procedimiento realizado en el Campo Escuela Colorado.**

Inicialmente se debe calcular el volumen de agua a tratar. Posteriormente se recolecta una muestra del agua sin tratar, una vez determinado el volumen de agua y la concentración de bario se determina la cantidad de sal que se va a aplicar. Seguidamente se elabora y se conduce mediante bombeo del bulk drum hacia la caja API y a su vez, se inicia el drenaje del tanque, donde se encuentra la solución insoluble. Una vez homogenizado el producto con el efluente a tratar se realiza un monitoreo en la salida de la caja API.⁵⁴

Es importante recordar que para el análisis de los resultados se deben tener reportes de la entrada y la salida, esta última, debe arrojar valores superiores al de inicio del proceso.

Este procedimiento desarrollado para disminuir la concentración de Bario (ppm) diario y mensual, en las aguas de producción de Campo Escuela Colorado.

⁵³ CAMACHO, Alexander. Lipesa. Soluciones Químicas Productivas. *Informe Tratamiento Químico Remoción de Bario en las aguas de producción y asociadas a la producción del Campo Escuela Colorado*. 2013, p. 5

⁵⁴ Ibid.p. 15

4.5.1. Tratamiento biológico mediante Asociaciones Microbianas Estratificadas. ⁵⁵ Son agrupaciones microbianas que se caracterizan por su alta diversidad y resistencia, las cuales se disponen en sentido laminar, desarrollándose en aguas de producción para la disminución de la carga contaminante presente. Los microorganismos que componen esta asociación son las cianobacterias, bacterias sulfurosas coloreadas (BSC) y no coloreadas (BSNC) y algunas bacterias heterótrofas.

- **Eficiencia.**

Este tratamiento para la remoción del bario, oscila en un rango de 95-98%, para efluentes de concentración de 8 a 50 gm⁻³, esto influenciado por procesos de biosorción y por la creación de complejos de baja solubilidad como es el sulfato de bario, sulfuros, carbonatos y polifosfatos.

Las Asociaciones Microbianas Estratificadas, aumentan el bloqueo en el paso del Bario, cuando se agregan bacterias oxidadoras de azufre.

La alta disponibilidad del tiosulfato para las bacterias, permite la oxidación y producción de concentraciones elevadas de sulfatos, generando la reacción con el bario de la solución y su posterior precipitación.

4.5.2. Intercambio iónico. El intercambio iónico es una reacción química reversible, los cationes y aniones presentes en el agua son reemplazados por iones cargados de manera similar dentro de una resina. Las resinas pueden ser inorgánicas u orgánicas de acuerdo al origen que la producen en forma natural o sintético.⁵⁶

⁵⁵ MOGOLLON, L.I. *et al*; Remoción biológica de bario de aguas de producción utilizando Asociaciones Microbianas Estratificadas (AME). 2006

⁵⁶ ARTHUR, J. Daniel, et al. Op. Cit

- **Remoción y eficiencia.**

Esta tecnología mediante resinas de intercambio iónico posee una eficiencia de 99,9 %, ha sido utilizada con gran efectividad en las industrias en el área de extracción de metales como oro, uranio, cobre, bario, níquel, cobalto, mercurio, hierro y arsénico. También en la recuperación de aguas cianuradas, saladas y nitrificadas.⁵⁷

- **Ventajas.**

- ✓ Es posible la eliminación de metales a muy bajas concentraciones.
- ✓ Presenta alta selectividad.
- ✓ Es posible la recuperación de los metales por electrólisis.
- ✓ Es de operación simple necesita espacios pequeños para su funcionamiento.
- ✓ La posibilidad de regeneración del material de intercambio aumenta su vida útil.
- ✓ No genera lodos y produce bajos volúmenes de fluidos.
- ✓ Se adapta a fluctuaciones de concentraciones de elementos contenidos en las aguas a tratar.
- ✓ Tiene una gran flexibilidad en su aplicación y se complementa con otras tecnologías a bajos costos.⁵⁸

⁵⁷ DOMIC, Esteban. *Hidrometalurgia: fundamentos procesos y aplicaciones*. 1996. Vol 2

⁵⁸ REYES, T. Erik, et al. *Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa*. Ingenierías, 9 (31). 2006, pp. 59-64. ISSN 1405-0676

- **Desventajas.**

- ✓ La presencia de Calcio, sódio y Magnesio disminuye su rendimiento debido a que pueden saturar la resina.
- ✓ La posible competencia entre metales pesados y otros cationes.
- ✓ Las resinas no son muy tolerables al cambio del pH.
- ✓ Sus costos operacionales se generan por el consumo de reactivos químicos.
- ✓ La solución contaminada (fluidos) debe ser previamente tratada para eliminar los materiales en suspensión.⁵⁹

4.6. TECNOLOGIAS LIMPIAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN

La resolución 0631 de 2015 en este punto hace alusión a todas aquellas modificaciones en el proceso o en la implementación de tratamientos que permitan reducir la carga contaminante del vertimiento y por lo tanto a hacerlo mucho más limpio. Esto va desde las buenas prácticas de ingeniería, producción más limpia y sistemas de tratamiento secundarios y terciarios. El objetivo de la norma, es que las empresas al implementar estas tecnologías y demostrar que han disminuido su carga, puedan tener un periodo de transición mayor para dar cumplimiento a la nueva norma de vertimientos si cumple con una licencia de vertimiento.

4.6.1. Técnica de fitorremediación utilizando sistema vetiver. El pasto vetiver es una gramínea permanente, que posee un sistema radicular fibroso profundo (2 a 3 m de crecimiento en un año); fuerte. Su follaje es erecto, largo, abundante y resistente; pues cuando se establecen cercas vivas, este puede soportar láminas de agua de inundación de hasta 80 cm. Es una planta asexual, o sea sus semillas

⁵⁹ Fundación Chile. Tecnologías de intercambio iónico para acondicionamiento y tratamiento de aguas. Artículo. [En línea]. [Citado el 01 julio de 2017] http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_18.pdf.

no son fértiles, y por ello hay peligro que se convierta en maleza. Se adecua a suelos y aguas con existencia de aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, manganeso, mercurio, níquel, selenio y zinc; suelos sódicos, salinos, alcalinos.⁶⁰

- **Características generales del pasto vetiver.**

- ✓ Soporta temperaturas desde -9°C a más de 45° C.
- ✓ Tolera sequias extremas, pero crecer mejor bajo condiciones húmedas.
- ✓ Las altitudes propias para su desarrollo están desde el nivel del mar hasta más de 2.800 msnm, está limitado por las temperaturas bajas en altitudes más altas y con nubosidad.
- ✓ El vetiver resiste la mayor parte de las plagas y enfermedades, pero parece ser susceptible a enfermedades cuando es débil y no crece bien.
- ✓ Sus costos de establecimiento son muy económicos, y depende del cobro de mano de obra agrícola, para su cuidado y manejo.
- ✓ El vetiver vive por un largo tiempo.⁶¹
- ✓ Los limitantes que presenta esta técnica son: la profundidad de penetración de las raíces en aguas poco profundas, Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados, y la biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación.⁶²

- **Tipos de cargas contaminantes que se remueven con el sistema vetiver.**

El pasto vetiver por ser una planta hiperacumuladora, tiene la propiedad de almacenar y eliminar diversas sustancias contaminantes de las aguas, entre ellos algunos macro nutrientes tales como el nitrógeno, fósforo y algunos metales

⁶⁰ HENGCHAOVANICH, D. & NILAWEERA, N. An assessment of strength properties of vetiver grass todos. In relation to slope stabilization. Proceedings of the first international conference of vetiver. Office of the Royal Development projectes boar, bangkok. 2012.

⁶¹ Vetivercol. Servicios y consultorias. 2017

⁶²ORIHUELA, Julio. Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver (chrysopogon Zizanioides). Diciembre 2007.p 4 - 21

pesados: Níquel, Cadmio, Plomo, Mercurio, Cianuro y recientemente Flúor. También puede absorber algunos cationes.

Se ha demostrado que el pasto vetiver bajo condiciones hidropónicas es capaz de bajar el nitrógeno total de 100 mgL⁻¹ a 6 mgL⁻¹ (94 % de eficiencia); el fósforo total de 10 mgL⁻¹ a 1 mgL⁻¹ (90 %), Coliformes fecales ≥ 1.600 org /100 mL a 900 org /100 mL (44 %); E. Coli %, E. Coli de ≥ 1.600 org /100 mL a 140 org /100 mL (91 %); Oxígeno disuelto de < 1 mgL⁻¹ a 8 mgL⁻¹ (>800); conductividad eléctrica de 928 μScm^{-1} a 468 μScm^{-1} ; pH 7.3 a 6,0 y puede evapotranspirar 1,1 L/día/cuatro plantas/ tambor, todo esto con un tiempo de retención de cuatro días.⁶³

En el estudio realizado al sistema de tratamiento de aguas residuales con pasto vetiver, para la planta de producción de gaseosas ubicada en Villa de Cura, Estado Aragua". Se enuncian los siguientes porcentajes de remoción de esta tecnología para los parámetros de DQO (98.07%) y DBO₅ (96.86%)⁶⁴

⁶³DAZA, R. Tratamiento de aguas residuales mediante filtros e hidrosistemas naturales con Pasto vetiver. [En línea]. 2013. [Citado el 1 julio de 2017] http://www.vetiver.org/COL_TRATAMIENTO%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20MEDIANTE%20FILTROS.pdf. (2013)

⁶⁴ SCAVO, Monica. et al. Estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales complementario, con pasto vetiver (vetiveria zizanioides L.), provenientes de una planta de producción de gaseosas, en villa de cura, estado aragua", 2005. p .6-9.

5. ALTERNATIVAS DE DISEÑO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS LIMPIAS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el análisis de monitoreo, realizado a las aguas de producción en el Campo Escuela Colorado para el año 2013, en cumplimiento a los valores límites máximos permisibles establecidos por la Resolución 0631 de 2015, como base para la formulación de alternativas que promuevan la disminución de la carga contaminante en estas aguas. (Ver anexo A).

Tabla 6. Resultados análisis fisicoquímicos, realizados a las aguas de producción en el Campo Escuela Colorado para el año 2013.

PARÁMETRO	NORMATIVIDAD DE COLOMBIANA (RESOLUCIÓN 0631/2015) (ÁREA DE PRODUCCIÓN)	RESULTADO	CUMPLIMIENTO	
			SI	NO
GENERALES				
PH	6-9 unidades de pH	7,66	X	
Temperatura	<40 °C	24,0	X	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	180,0 mg/L O ₂	4.012		X
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	60,0 mg/L O ₂	440,0		X
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	50,0 mg/L	1.110		X
Sólidos sedimentables (SSED)	1,0 ml/L	-	-	-
Grasas y aceites	15,0 mg/L	362,3		X
Fenoles	0,2 mg/L	-	-	-
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	Análisis y reporte mg/L	0,283	-	-
HIDROCARBUROS				
Hidrocarburos totales (HTP)	10,0 mg/L	-	-	-
Hidrocarburos aromáticos policíclico (HAP)	Análisis y reporte en mg/L	-	-	-

BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno)	Análisis y reporte en mg/L	-	-	-
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX)	Análisis y reporte en mg/L	-	-	-
COMPUESTOS DE FÓSFORO				
Fósforo total (P)	Análisis y reporte en mg/L	-	-	-
COMPUESTOS NITROGENADOS				
Nitratos (N-NO₃)	Análisis y reporte en mg/L	0,41		
Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃)	Análisis y reporte en mg/L	4,63		
Nitrógeno total (N)	10,0 mg/L	-	-	-
IONES				
Cianuro Total (CN⁻)	1,0 mg/L	< L.D	X	
Cloruros (Cl⁻)	1.200 mg/L	17.867,6		X
Fluoruros (F⁻)	Análisis y reporte en mg/L	< L.D	X	
Sulfatos(SO₄²⁻)	300,0 mg/L	67,7	X	
Sulfuros (S²⁻)	1,0 mg/L	-	-	-
METALES Y METALOIDES				
Arsénico (As)	0,1 mg/L	0,14		X
Bario (Ba)	Análisis y reporte en mg/L	102,4		X
Cadmio (Cd)	0,1 mg/L	0,081	X	
Cinc (Zn)	3,0 mg/L	0,052	X	
Cobre (Cu)	1,0 mg/L	< L.D	X	
Cromo (Cr)	0,5 mg/L	< L.D	X	
Hierro (Fe)	3,0 mg/L	0,6	X	
Mercurio (Hg)	0,01 mg/L	< L.D	X	
Níquel (Ni)	0,5 mg/L	0,35	X	
Plata (Ag)	Análisis y reporte en mg/L	< L.D	X	
Plomo (Pb)	0,2 mg/L	0,64		X
Selenio (Se)	0,2 mg/L	0,36		X
Vanadio (V)	1,0 mg/L	< L.D	X	
OTROS PARÁMETROS PARA ANÁLISIS Y REPORTE				
Acidez Total	Análisis y reporte en mg/L CaCO ₃	-	-	-
Alcalinidad Total	Análisis y reporte en mg/L CaCO ₃	-	-	-
Dureza Cálctica	Análisis y reporte en mg/L CaCO ₃	-	-	-
Dureza Total	Análisis y reporte mg/L CaCO ₃	-	-	-

Color Real (medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	Análisis y reporte en m ⁻¹	-	-	-
---	---------------------------------------	---	---	---

- * LD de cianuro total 0,005 Mg/L.
- * LD fluoruros 0,5 Mg/L.
- * LD cobre 0,0038 Mg/L.
- * LD cromo 0,06 Mg/L.
- * LD mercurio 0,3 Mg/L.
- * LD plata 0,07 Mg/L
- * LD vanadio 0,4 Mg/L
- * El agua del campo escuela colorado tiene una cantidad de 3.728 Mg/L de contenido de sal.

Fuente: BENAVIDES, Jhon y JAIMES, Yureynis. Factibilidad técnico – Financiera de los usos alternativos del agua de producción en Campo Escuela Colorado. Tesis de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas.

Se plantearon dos alternativas con el fin de reducir los parámetros los cuales cuya concentración no cumplen con los establecidos en la resolución 0631, para ello se propusieron dos alternativas, teniendo en cuenta el porcentaje de remoción de cada tecnología y los barriles de agua a tratar, que para el Campo Escuela Colorado en su máximo potencial de producción alcanzó un promedio de 100 barriles de agua durante el año 2012.

Alternativa 1: a) tanque desnatador; b) Celdas de flotación; c) Humedal con pasto vetiver (tecnología limpia); d) Ósmosis inversa. (Ver anexo b)

El sistema de tratamiento de agua propuesto en la alternativa 1, consta de un tanque desnatador que reduce las grasas y aceites hasta un 95% de contenido en el agua producida del campo, seguido de una celda de flotación que disminuye en un 94% el contenido de sólidos suspendidos, grasas y aceites, posteriormente un

humedal con sistema vetiver cuyo propósito es minimizar en un 97% factores como DQO, DBO₅ y los sólidos suspendidos que aún permanecen en el agua; finalmente sistema de ósmosis inversa para eliminar en un 98% las concentraciones de metales pesados, contenido de sales y cloruros.

Figura 10. Alternativa 1, para el tratamiento de las aguas de producción en el Campo Escuela Colorado.

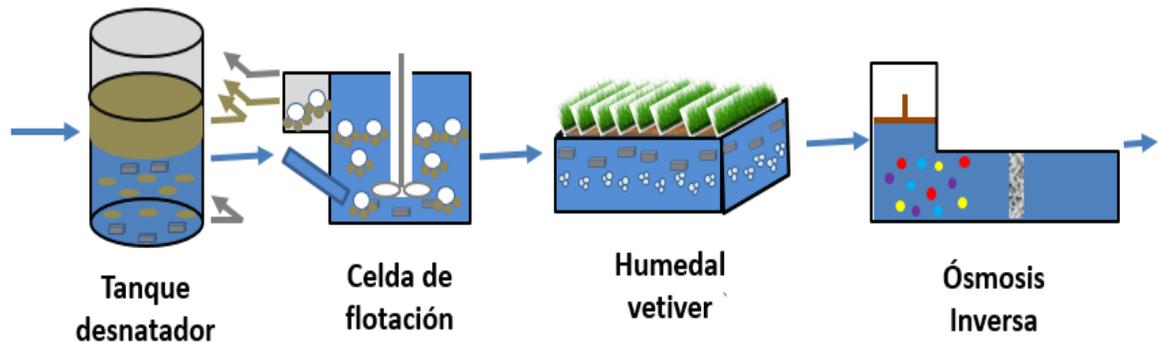


Tabla 7. Parámetros operacionales para vertimiento de la alternativa 1.

Parámetros	Tanque desnatador	Celdas de flotación	Humedal artificial vetiver	Osmosis inversa	Vertimiento
Grasas y aceites	Remoción de 362,3 a 18,115 mg/L (eficiencia de remoción de 95%). ^a	Remoción de 18,115 a 1,087 mg/L (eficiencia de remoción de 94 %). ^a	1,087 mg/L	1,087 mg/L	1,087 mg/L
Sólidos suspendidos totales	1.110 mg/L	Remoción de sólidos 1.110 a 66,6 mg/L (eficiencia de remoción 94%). ^a	Remoción de 66,6 a 3,996 mg/L (eficiencia de remoción 97%). ^b	3,996 mg/L	3,996 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	4.012 mg/L O ₂	4.012 mg/L O ₂	Remoción de 4.012 a 120,36 mg/L O ₂ (eficiencia	120,36 mg/L O ₂	120,36 mg/L O ₂

Parámetros	Tanque desnatador	Celdas de flotación	Humedal artificial vetiver	Osmosis inversa	Vertimiento
			de remoción 97 %). ^b		
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	440 mg/L O ₂	440 mg/L O ₂	Remoción de 440 a 13,2 mg/L O ₂ (eficiencia de remoción 97 %). ^b	13,2 mg/L O ₂	13,2 mg/L O ₂
Metales y metaloides: Plomo, arsénico y Selenio	Pb 0,64 mg/L As 0,14 mg/L Se 0,36 mg/L	Pb 0,64 mg/L As 0,14 mg/L Se 0,36 mg/L	Pb 0,64 mg/L As 0,14 mg/L Se 0,36 mg/L	Remoción de Pb 0,64 a 0,012 mg/L Remoción As 0,14 a 0,003 mg/L Remoción de Se 0,36 a 0,007 mg/L (Eficiencia de remoción 98%). ^c	Pb 0,012 mg/L As 0,003 mg/L Se 0,007 mg/L
Bario	102,4 mg/L	102,4 mg/L	102,4 mg/L	Remoción de 102,4 a mg/L (Eficiencia de remoción 98%). ^c	2,05 mg/L
Cloruros	17.867,6 mg/L	17.867,6 mg/L	17.867,6 mg/L	Remoción de 17.867,6 a 357,34 mg/L (Eficiencia de remoción 98%). ^c	357,34 mg/L

Fuente: modificado de: ^a Oil Skimmers, INC the oil removal solution expert; ^b SCAVO, Monica., et al (2016); ^c Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. Osmosis inversa. Op.Cit. (2012).

Alternativa 2: a) Separador API; b) Tanque desnatador; c) Humedal con pasto vetiver (tecnología limpia); d) Resinas de intercambio iónico. (Ver anexo c)

El sistema de tratamiento de agua propuesto en la alternativa 2, consta de un Separador API que disminuye en un 90% el contenido de sólidos suspendidos, grasas y aceites, seguido de un tanque desnatador que reduce las grasas y aceites hasta un 95% de contenido en el agua producida del campo, posteriormente un humedal con sistema vetiver cuyo propósito es eliminar en un 97% factores como DQO, DBO₅ y los sólidos suspendidos que aún permanecen en el agua; finalmente sistema de resinas de intercambio iónico para minimizar en un 99% las concentraciones de metales pesados, contenido de sales y cloruros.

Figura 11. Alternativa 2, para el tratamiento de las aguas de producción en el Campo Escuela Colorado.

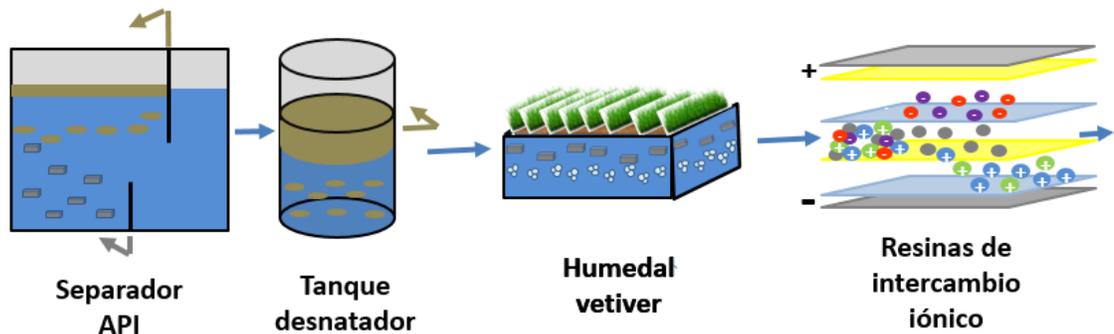


Tabla 8. Parámetros operacionales para vertimiento para la alternativa 2.

Parámetros	Separador api	Tanque desnatador	Humedal artificial vetiver	Resinas de intercambio iónico	Vertimiento
Grasas y aceites	Remoción de 362,3 a 72,46 mg/L (eficiencia de remoción 90%). ^d	Remoción de 72,46 a 3,623 mg/L (eficiencia de remoción 95%). ^a	3,623 mg/L	3,623 mg/L	3,623 mg/L
Sólidos suspendidos totales	Remoción de 1.110 mg/L a 222 mg/L. (eficiencia de remoción 90%). ^d	222 mg/L	Remoción de 222 a 6,66 mg/L (eficiencia de remoción 97 %). ^b	6,66 mg/L	6,66 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	4.012 mg/L O ₂	4.012 mg/L O ₂	Remoción de 4.012 a 120,36 mg/L O ₂ (eficiencia de remoción 97 %). ^b	120,36 mg/L O ₂	120,36 mg/L O ₂
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	440 mg/L O ₂	440 mg/L O ₂	Remoción de 440 a 13,2 mg/L O ₂ (eficiencia de remoción 97 %). ^b	13,2 mg/L O ₂	13,2 mg/L O ₂
Metales y metaloides: Plomo, arsénico y Selenio	Pb 0,64 mg/L As 0,14 mg/L Se 0,36 mg/L	Pb 0,64 mg/L As 0,14 mg/L Se 0,36 mg/L	Pb 0,64 mg/L As 0,14 mg/L Se 0,36 mg/L	Remoción de Pb 0,64 a 0,006 mg/L Remoción As 0,14 a 0,001 mg/L Remoción de Se 0,36 a 0,004 mg/L	Pb 0,006 mg/L As 0,001 mg/L Se 0,004 mg/L

Parámetros	Separador api	Tanque desnatador	Humedal artificial vetiver	Resinas de intercambio iónico	Vertimiento
				(Eficiencia de remoción 99%)	
Bario	102,4 mg/L	102,4 mg/L	102,4 mg/L	Remoción de 102,4 a 1,024 mg/L (Eficiencia de remoción 99%)	1,024 mg/L
Cloruros	17.867,6 mg/L	17.867,6 mg/L	17.867,6 mg/L	Remoción de 17.867,6 a 178,676 mg/L (Eficiencia de remoción 99%)	178,676 mg/L

Fuente: modificado de: ^a Oil Skimmers, INC the oil removal solution expert; ^b SCAVO, Monica., et al (2016); ^c DUARTE, Paula Alejandra., et al (2013); ^d IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z. (2012).

Tabla 9. Comparacion de alternativas propuestas para vertimiento.

Parámetros	Valores iniciales	Alternativa de vertimiento 1	Alternativa de Vertimiento 2	Resolución 0631/2015
Grasas y aceites	362,3 mg/L	1,087 mg/L	3,623 mg/L	15,0 mg/L
Sólidos suspendidos totales	1.110 mg/L	14,453 mg/L	6,66 mg/L	50,0 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	180 mg/L O ₂	120,36 mg/L O ₂	120,36 mg/L O ₂	180,0 mg/L O ₂
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	60 mg/L O ₂	13,2 mg/L O ₂	13,2 mg/L O ₂	60,0 mg/L O ₂

Parámetros	Valores iniciales	Alternativa de vertimiento 1	Alternativa de Vertimiento 2	Resolución 0631/2015
Metales y metaloides: Plomo, arsénico y Selenio	Pb 0,012 mg/L As 0,64 mg/L Se 0,36 mg/L	Pb 0,012 mg/L As 0,003 mg/L Se 0,007 mg/L	Pb 0,006 mg/L As 0,001 mg/L Se 0,004 mg/L	Pb 0,2 mg/L As 0,1 mg/L Se 0,2 mg/L
Bario	Análisis y reporte	2 mg/L	1,024 mg/L	0,2 mg/L
Cloruros	17.867,6 mg/L	357,34 mg/L	178,676 mg/L	1.200 mg/L

Después de haber formulado las dos alternativas para vertimiento del agua asociada a la producción de hidrocarburos a un cuerpo agua superficial.

Se plantea una tercera alternativa para el tratamiento de agua producida en Campo Escuela Colorado para su re-inyección en una formación receptora a través de pozos disposal. Para realizar dicha actividad se debe tener información de que parámetros o contaminantes tiene el agua producida del Campo. A partir de las características del agua de producción del campo se pueden establecer los límites máximos permisibles y así saber cuales son los parámetros que requieren modificación, con el objetivo de cumplir los requerimientos para la reinyección.

Tabla 10. Comparación de los parámetros físico-químicos del agua de producción del campo escuela colorado con los requerimientos para su re-inyección.

PARÁMETRO	LÍMITE DE REFERENCIA-RE-INYECCIÓN	VALORES DE AGUA PRODUCCIÓN	CUMPLIMIENTO DE LA NORMA
pH	6,5-8,5	7,66	SI
Fe^{2+}	<1,0 mg/L	0,6 mg/L	SI
O_2	<1 ppb 0,001 mg/L	500 ppb 0,5 mg/L	NO
Turbidez	< 2 NTU	577 NTU	NO
Grasas y Aceites	<5 mg/L	362,6 mg/L	NO
Sólidos suspendidos	<5 mg/L	1.110 mg/L	NO

La formulación de la alternativa que promueva la disminución de las cargas contaminantes en las aguas de producción para su re-inyección se plantea así:

Alternativa 3: a) Celdas de flotación; b) filtro de cascara de nuez; c) secuestrante de oxígeno.

El sistema de tratamiento de agua propuesto en la alternativa 3, consta de un sistema de celdas de flotación que disminuye en un 94% el contenido de sólidos suspendidos, grasas y aceites, seguido de un filtro de cáscara de nuez que reduce sólidos suspendidos totales, las grasas y aceites hasta un 94% de contenido en el agua producida del campo, posteriormente se adiciona un secuestrante de Oxígeno en los tanque de almacenamiento de agua tratada que permite reducir las cantidades de oxígeno disuelto, hasta llevarlas a loas establecidas en la norma.

Tabla 11. Parámetros operacionales para re-inyección para la alternativa 3.

Parámetros	Celdas de flotación	Filtro de cáscara de nuez	Secuestrante de oxígeno
Grasas y aceites	Remoción de 362,6 a 21,72 mg/L. (Eficiencia de remoción 94%). ^f	Remoción de 21,72 a 1,3 mg/L. (Eficiencia de remoción 94%).	1,3 mg/L.
Sólidos suspendidos totales	Remoción de sólidos 1.110 a 66,6 mg/L. (Eficiencia de remoción 94%). ^f	Remoción de sólidos de 66,6 a 4 mg/L (Eficiencia de remoción 97%). ^g	4 mg/L.
Oxígeno disuelto	0,5 mg/L	0,5 mg/L	< 0,001 mg/L

Fuente: modificado de: ^a Oil Skimmers, INC the oil removal solution expert; ^b DUARTE, Paula Alejandra., et al (2013); ^c Diego, Acosta Y Jacobs, Juan., et al (2017).

Teniendo en cuenta la cantidad de agua a tratar por el campo Escuela Colorado se realizó un estudio de las tecnologías con algunas especificaciones tales como: la capacidad de almacenamiento, la eficiencia de remoción y el costo de la unidad. (Ver tabla 10). De tal manera que permitió escoger las tecnologías con mayor eficiencia para la reducción de contaminantes presentes en el agua de producción para el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015.

Tabla 12. Costos tecnologías planteadas.

TECNOLOGÍA	COMPONENTES REMOVIDOS	ESPECIFICACIONES	PRETRATAMIENTO	COSTO
Tanque desnatador.	Remueve grasas y aceites en un 90-95% dependiendo del tiempo de vida útil de la banda desnatadora. ^a	Capacidad en base al tamaño del tanque 1000 barriles. ^a	No requiere pretatamiento. ^l	Costo básico 18.000 USD de la unidad. ^a
Celdas de flotación	Este proceso de tratamiento que utiliza como base la separación física para la remoción de parámetros como: grasas, aceites y sólidos suspendidos. Remoción secundaria de grasas y sólidos. Remueve partículas de 5 µm de diámetro y una eficiencia de hasta 90 a 94 %. ^b	Capacidad de 500 barriles de agua. ^b		Costo básico 14.250 USD la unidad. ^b
Técnica con pasto vetiver	Remoción de contaminantes de DQO, DBO ₅ , y sólidos suspendidos esto con un tiempo de retención de cuatro días. ^c Eficiencia de remoción de un 97% ^c .	Capacidad en base al tiempo de retención 200 barriles. Tiempo de retención en el humedal de 4 días. Dimensiones del humedal: Longitud 8 m Ancho 4 m Profundidad: 1 m Para un volumen de 32 metros cúbicos. Para tratar 200 barrile de agua se necesitan 2400 plantulas de pasto vetiver.	No requiere pretatamiento.	Valor plántula 411.6 USD. ^d Costo del humedal 681.95 USD. ^d
Ósmosis inversa.	Retiene otras sustancias disueltas con altos contenidos		Prefiltración con membranas e inhibidores de	Costo básico 82.540

TECNOLOGÍA	COMPONENTES REMOVIDOS	ESPECIFICACIONES	PRETRATAMIENTO	COSTO
	de sales como sodio, calcio, boro, hierro, cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos. ^e Eficiencia de remoción de 98%. ^f		escamas. ^g	USD de la unidad. ^g
Tanque desnatador.	Remueve grasas y aceites en un 90-95% dependiendo del tiempo de vida útil de la banda desnatadora. ^a	Capacidad en base al tamaño del tanque 1000 barriles. ^a	No requiere pretatamiento. ^a	Costo básico 18.000 USD de la unidad. ^a
Separador API	Esta tecnología tiene como fin eliminar las grasas y aceites, SST Y SSED de las corrientes de agua, con una eficiencia del 90%. ⁱ	Con unacapacidad de 1000 barriles de agua. ⁱ	Control de pH, para evitar la formación de emlsiones menores a 150 micras. ⁱ	Costo básico 75.000 USD la unidad. ^d
Técnica con pasto vetiver	Remoción de contaminantes de DQO, DBO ₅ , y solidos suspendidos esto con un tiempo de retención de cuatro días. ^c Eficiencia de remoción de un 97% ^c .	Capacidad en base al tiempo de retención 200 barriles. Tiempo de retención en el humedal de 4 días. ^c Dimensiones del humedal: Longitud 8 m Ancho 4 m Profundidad: 1 m Para un volumen de 32 metros cúbicos. Para tratar 200 barriles de agua se necesitan 2400 plantulas de pasto vetiver.	No requiere pretatamiento.	Valor plántula 411.6 USD. ^d Costo del humedal 681.95 USD. ^d
Intercambio iónico	Esta tecnología tiene una eficiencia sobre el 99%. ^j		Eliminación de SST, mi-nerales y metales oxidados. ^j	Costo básico 90.000 USD de

TECNOLOGÍA	COMPONENTES REMOVIDOS	ESPECIFICACIONES	PRETRATAMIENTO	COSTO
	Remueve parámetros presentes en el agua de producción como: cloruros, metales pesados y sales.			la unidad. ^k

Fuente: Modificado de: ^aOil Skimmers, INC (the oil removal solution expert); ^bDUARTE, Paula Alejandra., et al (2013); ^cSCAVO, Monica., et al (2016); ^dDAZA, R Tratamiento de aguas residuales mediante filtros e hidrosistemas naturales con Pasto vetiver. Op. Cit. (2013); ^eDiseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. Osmosis inversa. Op.Cit. (2012); ^fDUARTE, Paula Alejandra., et al (2013); ^f Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. Osmosis inversa. Op.Cit. (2012); ^g COLORADO SCHOOL OF MINES. (2009); ⁱAPI Oil-Water Separators Siemens AG (2013); ^jDiseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de producción, p174 (2009); ⁱIGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z. (2012).

Tabla 13. Presupuesto total de la alternativa 1 para vertimiento.

ÍTEM	TECNOLOGÍA	CANTIDAD	PRECIO DE LA UNIDAD (USD)	COSTO TOTAL POR TECNOLOGÍAS (USD)
1	Tanque desnatador	1	Costo básico 18.000 USD	18.000 USD
2	Celdas de flotación	1	Costo básico 14.250 USD.	14.250 USD
3	Técnica con pasto vetiver	2400 plántulas Un humedal artificial	Plántula: 411.6 USD Costo del humedal: 681.95 USD	1.093,55 USD
4	Ósmosis inversa.	1	Costo Básico 82.540 USD	82.540 USD
		TOTAL	109.884 USD	115.883,55 USD

Tabla 14. Presupuesto total de la alternativa 2 para vertimiento.

ÍTEM	TECNOLOGÍA	CANTIDAD	PRECIO DE LA UNIDAD (USD)	COSTO TOTAL POR TECNOLOGÍAS (USD)
1	Separador API	1	Costo básico 75.000 USD.	75.000 USD
2	Tanque desnatador	1	Costo básico 18.000 USD	18.000 USD
3	Técnica con pasto vetiver	2400 plántulas Un humedal artificial.	Plántula: 411.6 USD Costo del humedal: 681.95 USD	1.093,55 USD
4	Resinas de intercambio iónico	1	Costo de unidad: 90.000 USD.	90.000 USD
		TOTAL	183.681,95 USD	184.093,55 USD

Al comparar las dos alternativas planteadas anteriormente, es importante tener en cuenta en el momento de la selección, factores como: la eficiencia de cada una de las alternativas propuestas y el costo total de la alternativa.

Las dos alternativas propuestas son viables para vertimiento por su eficiencia de remoción, pero al momento de evaluar los costos se encuentra que la alternativa de menor costo en su implementación es la 1.

Tabla 15. Presupuesto total de la alternativa 3 para reinyección.

ÍTEM	TECNOLOGÍA	CANTIDAD	PRECIO DE UNIDAD (USD)	COSTO TOTAL POR TECNOLOGÍAS (USD)
1	Celdas de flotación (IAF)	1	Costo básico 14.250 USD.	14.250 USD
2	Cáscara de nuez	1	Costo básico de 15.000 USD. ^a	15.000 USD.
3	Secuestrante de Oxígeno	100	Costo del químico 168 USD/barril. ^b	16.800 USD.
		TOTAL		46.050 USD

Fuente: Modificado de: ^aDUARTE, Paula Alejandra., et al (2013); ^b Diego, Acosta Y Jacobs, Juan., et al (2017).

Haciendo una analogía a las alternativas de tratamiento de agua para el vertimiento, se propuso una alternativa 3 con el fin de reinyectar estas aguas y así minimizar los costos del tratamiento, obteniendo un costo total de 46.050 usd para tratar un promedio de 100 barriles de agua diarios.

6. CONCLUSIONES

- Las dos alternativas seleccionadas para el tratamiento de aguas de producción con enfoque de vertimiento, permiten la remoción de los contaminantes en un rango de 60% al 98%.
- La evolución de la normatividad ambiental Colombiana, en referencia la disposición final del agua de producción, con base al Decreto 1594/1984 y la Resolución 0631/2015, ha sido positiva porque esta última reduce las cargas contaminantes y las especifica por actividades económicas. Aunque presenta una falencia de en algunos parámetros enunciados como análisis y reporte que suelen ser tóxicos para los seres vivos.
- Dentro de las tecnologías propuestas en los sistemas de tratamiento agua, la que proporciona mayor eficiencia de remoción es la técnica de intercambio iónico.
- El pasto vetiver se constituye en una solución importante a la problemática presentada en este proyecto de investigación, al poder implementarse como un proceso biológico de fitorremediación, debido a que es un método de bajo costo, fácil manejo y muy eficiente.
- Como futuros ingenieros de petróleos enfocados a la perspectiva ambiental, se reconoce la importancia de implementar óptimos sistemas de tratamiento de agua con tecnologías limpias, con el objetivo de reducir la carga contaminante vertida y cumplir con la normatividad de vertimiento.

7. RECOMENDACIONES

- Hacer un piloto de las alternativas propuestas en el presente trabajo al campo, para evaluar las eficiencias de remoción y el cumplimiento con la normatividad vigente.
- Se recomienda realizar más investigaciones enfocadas a la implementación de tecnologías limpias dentro de los sistemas de tratamientos de las aguas de producción, como método de reducir cargas contaminantes que llegan a los cuerpos de agua superficial
- Realizar un análisis de factibilidad técnico-económica de los sistemas de tratamientos propuestos, con el fin de determinar su viabilidad económica.

BIBLIOGRAFÍA.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Monographs on Refinery Environmental Control, Management of Water Discharges. API 421.

ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Surface Production Operations, Desings of Oil- Handling Systems and Facilities Vol. 1. 2 ed. Houston, 1989. ISBN: 978-0-88415-821-9

CAMACHO, Alexander. Lipesa. Soluciones Químicas Productivas. Informe Tratamiento Químico Remoción de Bario en las aguas de producción y asociadas a la producción del Campo Escuela Colorado. 2013. p. 5.

Campo Escuela Colorado Convenio UIS – ECOPETROL S.A. [En línea]. 2007. [Recuperado en 12 marzo de 2017.] Disponible en: <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/academia/facultades/fisicoQuimicas/campoEscuela/documentos/primerSimposio/campoEscuela.pdf>.

BENAVIDES, Jhon y JAIMES, Yureynis. Factibilidad técnico – Financiera de los usos alternativos del agua de producción en Campo Escuela Colorado. Tesis de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicos, 2014. p.135.

Chen, et al; Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. Water Residual.2009. p. 43.

COLORADO SCHOOL OF MINES. Earth Energy Environment. Technical assessment of produced water treatment technologies, November 2009. 1st EDITION. p. 35

Condorchem Envitech. Destilación por membranas para tratar aguas residuales. Artículo. Febrero de 2017.

DAZA, R Tratamiento de aguas residuales mediante filtros e hidrosistemas naturales con Pasto vetiver. [En línea]. 2013. [Citado el 1 julio de 2017] http://www.vetiver.org/COL_TRATAMIENTO%20DE%20AGUAS%20RESIDUALE%20MEDIANTE%20FILTROS.pdf. (2013)

Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. Osmosis inversa. [En línea]. Julio de 2012. [Citado el: 22 mayo de 2017] http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf

DOMIC, Esteban. Hidrometalurgia: fundamentos procesos y aplicaciones. 1996. Vol 2

FULLER, Rick. API Separator [en línea]. [Citado 28 de julio de 2017]. http://waterfacts.net/Unit_Processes/Gravity_Separators/API_Separator/api_separator.html

Fundación Chile. Tecnologías de membrana nanofiltración. Tecnología convencional tipo físico. [En línea]. Noviembre de 2015. [Citado el 27 mayo de 2017] http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_23.pdf.

Gochin, J., Flotation, Royal School of Mines, Imperial College, London, chapter, 19: 503 - 524.

HENGCHAOVANICH, D. & NILAWEERA, N. An assessment of strength properties of vetiver grass sods. In relation to slope stabilization. Proceedings of the first international conference of vetiver. Office of the Royal Development project board, Bangkok. 2012.

HIRSCHFELDT, Marcelo. El manejo del agua producida en la industria petrolera Argentina, Journal of Oil Production Consulting, 2015

Huisman, J.L., Schouten, G., Schultz, C., 2006. Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry. Hydrometallurgy 83, 106-113.

IGUNNU, Ebenezer T. y Chen, George Z. Produced water treatment technologies, International Journal of Low-Carbon Technologies. 2012.

J, Daniel y Bruce, Langhus. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. ALL CONSULTING, LLC. Tulsa, 2005.

KUCERA J. Reverse Osmosis. Design, Processes, and applications for Engineers. Co-published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Salem, Massachusetts. 2010. USA. P. 151

LONDOÑO, Rubén. Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Bogotá, 2007. P. 89-104.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 (15, marzo, 2015). Por la cual se establece los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial y a los sistemas de alcantarillado público. Bogotá, D.C., 2015. P.1-62.

MOGOLLON, L.I. et al; Remoción biológica de bario de aguas de producción utilizando Asociaciones Microbianas Estratificadas (AME). 2006

MORCILLO, Gabriel. Diseño y construcción de una planta piloto para la purificación de salmueras de desalación, 1985. p.27

Observatorio ambiental de Bogotá. Datos e indicadores para medir la calidad del ambiente en Bogotá. Documentos e Investigaciones. Decreto 1594 de 1984. [En línea]. 2012. [Citado el: 15 marzo de 2017] <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/decreto-1594-de-1984>. 2017

ORIHUELA, Julio, Ing. Agrónomo. Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver (chrysopogon Zizanioides). Diciembre 2007.p 4 - 21

PAEZ, Ruth. Operaciones de recolección y tratamiento.2000.

PEÑUELA, Gustavo y MORATÓ, Jordi. Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas. En línea]. Julio de 2017. [Citado el: 5 de marzo de 2017] <http://www.unescosost.org/wp-content/uploads/2014/04/Manual-de-Tecnologias-Sostenibles-en-Tratamiento-de-Aguas.pdf>. 2017.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Resolución 0135 (12, febrero, 2015.). Características del agua de inyección que debe cumplir con la normativa NACE, p.23.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 1594 (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 3930 de 2010 (25, octubre, 2010). Gestión integral del recurso hídrico.

REYES, T. Erik, et al. Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. Ingenierías, 9 (31). 2006. p. 59-64. ISSN 1405-0676

ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas Residuales, teoría y principios de diseño. Escuela colombiana de ingeniería. 2014, p. 551

RUBIO, Diego, et al. Treatments for Removal of Heavy Metals Commonly Found in Industrial Wastewater. A Review. Journal Engineering and Region. January 2015.p. 80

Ruiz, Luis Alfonso. Propuesta de mejoramiento para las facilidades de tratamiento del agua de producción y disposición por sistema de inyección para el campo Cabiona. Universidad Industrial de Santander. 2015. p. 43.

Sander, E. de Rijk., Jaap, H. J. M., Van D. G. and Jan G. D. B., 1994. Bubble size in flotation thickening, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Water Management, The Netherlands, p.: 465 - 473.

Spellman FR. Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations. CRC Press, 2003.p.630.

ANEXOS

Anexo A. Análisis fisicoquímico del agua de producción de campo escuela colorado

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 1 de 3	

Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1659 de 2011, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas
 Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 5534 de 2010, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano

Informe de resultados No.	I-13-097	Fecha de emisión:	Marzo 20 de 2013
Cliente:	CAMPO ESCUELA COLORADO		
Dirección del cliente:	Universidad Industrial de Santander / Campo Colorado		
Solicitud de servicio No.	13-059	No. de muestras:	01
Fecha de recepción de las muestras:	Febrero 21 de 2013		
Muestras recibidas por:	Johanna Riveros		
Fecha de análisis:	Febrero 21 de 2013 –Marzo 20 de 2013		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	13-059-01	Tipo de muestra:	Compuesta
Identificación de la muestra:	Pozo 52		
Matriz de la muestra:	Agua de Producción		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Campo Colorado / Pozo 52		
Fecha del muestreo:	Febrero 21 de 2013		

PARAMETRO	RESULTADO	MÉTODO/NORMA
pH (Unidades de pH)	7,66	Potenciométrico / SM 4500-H ⁺ B
Temperatura (°C)	24,0	Termométrico / SM 2550 B
Demanda Biológica de Oxígeno (mgO ₂ /L)	440	Respirométrico /SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	4012	Titrimétrico Reflujo Cerrado
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	1110	Gravimétrico /SM 5220 D
Color (UPC)	3117,5	Espectrofotométrico / SM 2120 B
Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	0,5	Sonda Luminiscente
Nitrógeno Amoniacal (mg N /L)	4,63	Titrimétrico / SM 4500-NH ₃ C
Arsénico (µg As/L)	0,14	Absorción Atómica Generador de Hidruros/ SM 3114 C
Bario (mg Ba/L)	102,9	Absorción Atómica / SM 3111D
Cadmio (mg Cd/L)	0,081	Absorción Atómica / SM 3111B
Cinc (mg Zn/L)	0,052	Absorción Atómica / SM 3111 B
Cianuro Total(mg/L)	<L.D	Espectrofotométrico
Contenido de Sales (mg/L)	3728	Gravimétrico

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqi/> E-mail: labquimco@gmail.com;
laboratorioguimicodeconsultas@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. I-13-097 Solicitud de servicio No. 13-059

PARAMETRO	RESULTADO	MÉTODO/NORMA
Nitritos (mg NO ₂ /L)	3,50	Espectrofotométrico / SM 4500-B
Cloruros (mg Cl/L)	17867,6	Argentométrico / SM 4500-Cl ⁻ B
Cobre (mg Cu /L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 B
Cromo (mg Cr /L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 D
Mercurio (µg Hg/L)	<L.D	Absorción Atómica Generador de Hidruros/ SM 3114 C
Grasas y Aceites (mg/L)	362,3	Extracción Líquido Líquido / SM 5520 B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,41	Espectrofotométrico/RODIER
Plata (mg Ag /L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 B
Plomo (mg Pb /L)	0,64	Absorción Atómica / SM 3111 B
Selenio (µg Se/L)	0,36	Absorción Atómica Generador de Hidruros/ SM 3114 C
Sulfatos (mg SO ₄ ⁻² /L)	67,7	Espectrofotométrico / SM 4500 E
Tensoactivos (mg SAAM/L)	0,283	Espectrofotométrico / SM 5540 C
Cobalto (mg Co/L)	0,86	Absorción Atómica / SM 3111 B
Turbiedad (NTU)	577	Nefelométrico / SM 2130 B
Aluminio (mg Al/L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 D
Berilio (mg /L)	<L.D.	Absorción Atómica / SM 3111 D
Hierro Total (mg Fe/L)	0,6	Espectrofotométrico / SM 3500-Fe
Litio (mg Li / L)	0,49	Absorción Atómica
Manganeso (mg Mn/L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 B
Molibdeno (mg Mo/L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 D
Fluoruros (mg F/L)	<L.D	Espectrofotométrico / SM 4500 -D
Níquel (mg Ni/L)	0,35	Absorción Atómica / SM 3111 B
Vanadio (mg V /L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 D
Boro (mg B/L)	0,056	Espectrofotométrico
Cloro Total Residual (mg Cr/L)	0,0	Absorción Atómica / SM 3111D
Cromo Hexavalente (mg Cr+6/L)	<L.D.	Espectrofotométrico / SM 3500-Cr B

L.D: Límite de Detección del Mercurio 0,3 µg Hg/L
L.D: Límite de Detección del cianuro Total 0,005 mg /L CN-
L.D: Límite de Detección del Cromo 0,076 mg Cr /L
L.D: Límite de Detección del Cobre 0,038 mg Cu /L
L.D: Límite de Detección de la Plata 0,07 mg Ag /L
L.D: Límite de Detección del Berilio 0,08 mg Be /L
L.D: Límite de Detección del Aluminio 0,4 mg Al /L
L.D: Límite de Detección del Molibdeno 0,085 mg Mo /L
L.D: Límite de Detección del Manganeso 0,050mg Mn /L
L.D: Límite de Detección del Fluoruros 0,5 mg F- /L
L.D: Límite de Detección del Vanadio 0,4 mg V/L
L.D: Límite de Detección del Cromo +6 = 0,006 (mg Cr⁺⁶/L)

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Commutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqi/> E-mail: labquimco@gmail.com;
laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co
Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. I-13-097 Solicitud de servicio No. 13-059

Observaciones: *Ninguna*

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:

Luz Yolanda Vargas Fallo
Directora del Laboratorio
Química. Msc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: *Johanna Ríveros*

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com;
laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co
Bucaramanga - Colombia