

**SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE FORMACIÓN EN CAMPOS  
PETROLEROS PARA EL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA Y SU  
POTENCIAL EN COLOMBIA**

**DIEGO ALEJANDRO GARCÍA ARÉVALO  
SANTIAGO NIETO PULIDO  
LAURA CAMILA RUEDA VELEZ**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE PROYECTOS**

**ORIENTADOR  
JULIÁN ANDRÉS GÓMEZ VARGAS  
ADMINISTRADOR DE EMPRESAS**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PROYECTOS  
BOGOTÁ D.C**

**2022**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Nombre

Firma del Director

---

Nombre

Firma del presidente Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. marzo de 2022

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas

Dr. Marcel Hofstetter,

Director de programa

Dr. Julián Andrés Gómez Vargas

Las directivas de la Universidad América, Los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>14</b>
1.1. Producción de agua en la industria del petróleo y gas	14
1.2. Aguas de formación	14
<i>1.2.1. Componentes mayores</i>	<i>15</i>
<i>1.2.2. Componentes menores</i>	<i>15</i>
1.3. Tratamiento de aguas de formación	15
1.4. Calidad del agua de formación	15
1.5. Reuso del agua de formación	16
<i>1.5.1. Reinyección</i>	<i>17</i>
<i>1.5.2. Disposición a cuerpos de agua</i>	<i>17</i>
<i>1.5.3. Uso agrícola</i>	<i>17</i>
1.6. El Proceso Del Tratamiento	17
1.7. Tendencias Nacionales	18
1.8. Tendencias Internacionales	19
<i>1.8.1. Caso México</i>	<i>19</i>
<i>1.8.2. Caso Omán</i>	<i>19</i>
<i>1.8.3. Caso California</i>	<i>20</i>
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LAS GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE DIFERENTES CAMPOS PETROLEROS DE COLOMBIA</b>	<b>21</b>
2.1. Tipos de sistemas de tratamiento	21
<i>2.1.1. Sistemas cerrados</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2. Sistemas abiertos</i>	<i>21</i>
2.2. Técnicas implementadas en el tratamiento	21
<i>2.2.1. Separación basada en la gravedad</i>	<i>22</i>
<i>2.2.2. Separación basada en el filtrado</i>	<i>22</i>

2.2.3. <i>Separación mejorada por gravedad</i>	22
2.2.4. <i>Evaporación</i>	22
2.2.5. <i>Separación por flotación</i>	22
2.2.6. <i>Electrodialisis</i>	23
<b>3. ANÁLISIS DE AGUAS DE FORMACIÓN PARA LOS CAMPOS, PREVIO A SU TRATAMIENTO Y POSTERIOR AL TRATAMIENTO, DE ACUERDO CON LA NORMATIVA</b>	<b>24</b>
3.1. Parámetros fisicoquímicos – máximos permisibles (resolución 631 de 2015)	24
3.1.1. <i>Parámetros hidrocarburos</i>	24
3.1.2. <i>Parámetros compuestos del fósforo</i>	26
3.1.3. <i>Parámetros compuestos del nitrógeno</i>	26
3.1.4. <i>Parámetros iones</i>	27
3.1.5. <i>Parámetros metales y metaloides</i>	28
3.2. Parámetros fisicoquímicos admisibles del agua para riego agrícola (decreto 1594 de 1984)	29
3.3. Parámetros fisicoquímicos del agua proveniente del campo colorado	30
3.4. Parámetros fisicoquímicos del agua de fondo en la cuenca de los llanos orientales	31
<b>4. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS IMPLICADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA DE FORMACIÓN</b>	<b>34</b>
4.1. Equipos tratamiento de aguas	34
4.1.1. <i>Tanque desnatador</i>	34
4.1.2. <i>Recipiente desnatador</i>	35
4.1.3. <i>Interceptor de placas corrugadas</i>	35
4.1.4. <i>Separador de flujo transversal</i>	36
4.1.5. <i>Unidad de flotación inducida por gas</i>	37
4.1.6. <i>Lecho fluidizado</i>	37
4.1.7. <i>Tanque de sedimentación</i>	38
4.1.8. <i>Filtro multimedia</i>	39
4.1.9. <i>Equipo de ultrafiltración</i>	39
4.1.10. <i>Equipo de nanofiltración</i>	40
4.1.11. <i>Equipo de ósmosis</i>	40
4.1.12. <i>Filtro de seguridad</i>	41

4.1.13. <i>Equipo de radiación ultravioleta</i>	41
4.2. Costos aproximados maquinaria y equipo	42
<b>5. DISEÑOS Y ESPECÍFICACIONES TÉCNICAS DE LOS TRATAMIENTOS ACTUALES PARA EL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA</b>	<b>45</b>
5.1. Diagrama del proceso	45
5.2. Estudio de métodos	46
5.3. Análisis de operaciones	47
5.4. Diagrama de operaciones	48
5.5. Distribución en planta	49
5.5.1. <i>Planos de espacio requerido</i>	50
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>54</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>58</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Agua de formación	14
<b>Figura 2.</b> Planta de tratamiento de aguas	18
<b>Figura 3.</b> Planta de tratamiento de aguas Bauer Nimr	20
<b>Figura 4.</b> Tanque desnatador	34
<b>Figura 5.</b> Recipiente desnatador	35
<b>Figura 6.</b> Interceptor de placas corrugadas	36
<b>Figura 7.</b> Separador de flujo transversal	36
<b>Figura 8.</b> Unidad de flotación por gas	37
<b>Figura 9.</b> Lecho fluidizado	38
<b>Figura 10.</b> Tanque de sedimentación	38
<b>Figura 11.</b> Filtro multimedia	39
<b>Figura 12.</b> Equipo de ultrafiltración	39
<b>Figura 13.</b> Equipo de nanofiltración	40
<b>Figura 14.</b> Equipo de ósmosis	40
<b>Figura 15.</b> Filtro de seguridad	41
<b>Figura 16.</b> Equipo de radiación ultravioleta	42
<b>Figura 17.</b> Técnicas de tratamiento	45
<b>Figura 18.</b> Proceso de tratamiento	46
<b>Figura 19.</b> Proceso de tratamiento por equipos	47
<b>Figura 20.</b> Planta de tratamiento de aguas campo Infantas Oriente	50
<b>Figura 21.</b> Esquema de ubicación de equipos tratamiento de aguas	51
<b>Figura 22.</b> Planta de tratamiento de aguas propuesta por Spenagroup	51



## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Parámetros de calidad del agua agrícola	16
<b>Tabla 2.</b> Parámetros fisicoquímicos y límites permisibles en el agua	24
<b>Tabla 3.</b> Parámetros correspondientes a hidrocarburos contenidos en el agua	25
<b>Tabla 4.</b> Parámetros correspondientes a compuestos del fósforo contenidos en el agua	26
<b>Tabla 5.</b> Parámetros correspondientes a compuestos de nitrógeno contenidos en el agua	27
<b>Tabla 6.</b> Parámetros correspondientes a iones contenidos en el agua	27
<b>Tabla 7.</b> Parámetros correspondientes a hidrocarburos contenidos en el agua	28
<b>Tabla 8.</b> Parámetros admisibles para el uso del agua en la agricultura	29
<b>Tabla 9.</b> Parámetros del agua de producción del Campo Colorado	31
<b>Tabla 10.</b> Parámetros del agua Cuenca de los Llanos Orientales	32
<b>Tabla 11.</b> Costos maquinaria y equipo requerida.	42
<b>Tabla 12.</b> Diagrama de operaciones tratamiento de aguas	49

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>BTEX</b>	Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>HAP</b>	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
<b>HTP</b>	Hidrocarburos Totales
<b>INS</b>	Inspección
<b>MIN</b>	Minuto(s)
<b>SAAM</b>	Sustancias Activas al Azul de Metileno
<b>SSED</b>	Sólidos sedimentables
<b>SST</b>	Sólidos Suspendidos Totales
<b>USD</b>	United States Dollar
<b>UV</b>	Ultravioleta

## RESUMEN

El reúso del agua de producción de campos petroleros en la agricultura es una alternativa que permite aprovechar óptimamente el agua de producción para el beneficio del sector agrícola y la disminución del consumo de fuentes de agua tradicionales. La presente monografía tiene como objetivo analizar los sistemas de tratamientos de aguas de producción enfocándose en los aspectos técnicos y su potencial para la implementación en Colombia con el fin de aprovechar el agua tratada en el sector agrícola. Para ello se recolectó información respecto a las generalidades de los sistemas de tratamiento, así como datos de los parámetros regulatorios para la disposición final del agua de producción con lo cual se desarrolló una comparación y análisis con respecto a información del agua de dos campos del país, y se establecieron parámetros técnicos que permiten el adecuado tratamiento para el aprovechamiento del potencial hídrico de los campos petroleros del país.

**Palabras Claves:** Aguas de producción, tratamientos de agua, sector agrícola, hidrocarburos.

## INTRODUCCIÓN

La industria de petróleo y gas en Colombia desde los dos contratos de concesión firmados en 1905 ha venido siendo uno de los motores principales de la economía del país. Durante la etapa de extracción de hidrocarburos se genera una producción de petróleo y gas junto con una cantidad de agua asociada, según pronósticos de Ecopetrol para el año 2020 se esperaba una producción de agua de 20 Mbbl/día y una relación agua-petróleo de 16:1, lo que quiere decir que por cada barril de petróleo se producirían 16 barriles de agua.

Dentro de las alternativas que se presentan para la disposición de esta agua previo a un tratamiento adecuado que depende de igual forma de su posterior uso son reinyección o disposición en cuerpos de agua superficial, sin embargo, el reúso del agua en la agricultura es una alternativa responsable que permite el aprovechamiento de este recurso en otros sectores que requieren de una gran cantidad de agua para su desarrollo y se presenta como una solución a situaciones en las cuales la demanda de agua sea excesiva o si se presentan déficits por temporadas de sequias como es el caso del sector agrícola en Colombia.

De este modo la presente monografía pretende presentar un análisis entre del tratamiento de aguas de formación en Colombia comparando los diseños técnicos y de parámetros fisicoquímicos del agua con el fin de demostrar el potencial del reúso del agua en el sector agrícola que garantice un aprovechamiento responsable del agua de producción.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Analizar la viabilidad técnica para el diseño de un sistema de tratamiento de aguas de formación aplicable a campos petroleros en Colombia para el uso del agua en la agricultura.

### **Objetivos específicos**

- Describir las generalidades de los sistemas de tratamiento de aguas de diferentes campos petroleros de Colombia.
- Realizar un análisis de aguas de formación para los campos, previo a su tratamiento y posterior al tratamiento, de acuerdo con la normativa.
- Describir los equipos implicados en el tratamiento de agua de formación.
- Plantear algunas especificaciones técnicas de los tratamientos actuales que permitan el aprovechamiento del agua para su uso en la agricultura.

# 1. MARCO TEÓRICO

Se abordarán temáticas relacionadas con el tratamiento de aguas de formación obtenidas de la producción en la industria de petróleo y gas, para facilitar la comprensión de los temas.

## 1.1. Producción de agua en la industria del petróleo y gas

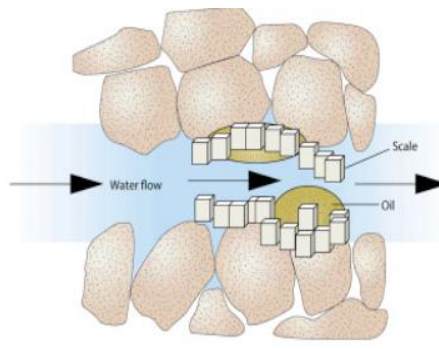
La industria del petróleo y el gas produce grandes volúmenes de agua durante la extracción, procesamiento y refinación de hidrocarburos. El agua obtenida en superficie con hidrocarburos durante la extracción se denomina "agua de producción o agua de retorno"; Esto a menudo comprende tanto agua de formación (que se produce naturalmente en cantidades significativas en el depósito con los hidrocarburos) como agua que ha sido extraída de otra fuente, inyectada en el reservorio y regresa a la superficie con los hidrocarburos. (Engle, Cozzarelli, & Smith, 2013, p. 1)

## 1.2. Aguas de formación

Son aquellas aguas que ocupan los poros de las rocas sedimentarias, se encuentran con el petróleo también son normalmente llamadas salmueras, pero difieren en la composición con el agua marina. Debido a los diferentes procesos durante la actividad petrolera esta adquiere distintos componentes. (Gregory, 2003, p. 706).

**Figura 1.**

*Agua de formación*



**Nota.** La figura presenta el flujo de agua de formación a través de los poros de las rocas en el subsuelo. Tomado de: Kharaka, Y.K., Hanor, J.S. (2014). Formation Water. Earth and planetary Sciences. *Formation Damage During Improved Oil Recovery*. Pp. 10. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/formation-water>

### ***1.2.1. Componentes mayores***

Iones de sales que constituyen los sólidos disueltos como los son Cloruros, Calcio, Sodio, Bicarbonato, Sulfatos y Carbonatos.

### ***1.2.2. Componentes menores***

Iones que se encuentran en concentraciones más bajas como Bario, Manganeso, Sílice, Cromo y Gases Disueltos (Dióxido de Carbono, Sulfuro de Hidrógeno y oxígeno).

## **1.3. Tratamiento de aguas de formación**

Debido a los diferentes procesos desarrollados en la industria del petróleo, se obtienen como resultado aguas de formación que deben ser debidamente tratadas, para esto se realiza un tratamiento de aguas de formación, cuyo objetivo es eliminar los distintos contaminantes presentes en el agua para su posterior reutilización o liberación directamente al ambiente.

## **1.4. Calidad del agua de formación**

En cuanto a la calidad del agua esta hace referencia a las propiedades del agua que puedan generar problemas o afectaciones a su implementación a un uso específico, es decir, se debe tener en cuenta la relación entre la calidad del agua y lo que busca o necesita el usuario en cuanto a la disposición de esa agua. Los límites máximos permisibles para los parámetros de calidad del agua destinada a sistemas agrícolas y pecuarios se encuentran establecidos en el Decreto 1594 de 1984 según el Ministerio de Agricultura, (IDEAM, 1984, p. 10-21), de igual forma, algunos parámetros de calidad del agua se encuentran en la Resolución 1207 de 2014.

**Tabla 1.**

*Parámetros de calidad del agua agrícola*

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permisible
Conductividad	μS/cm	1500
Fenoles Totales	mg/L	0,2
Hidrocarburos Totales	mg/L	1
Cianuro Libre	mg CN-/L	0,2
Cloruros	mg Cl-/L	300
Fluoruros	mg F-/L	1
Sulfatos	mg SO42-/L	500
Mercurio	mg Hg/L	0,001
Sodio	mg Na/L	200
Antimonio	mg Sb/L	0,1
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl2/L	< 1
Nitratos (NO3--N)	mg/L	15

**Nota.** La tabla presenta los valores límite máximo permisibles para distintos parámetros del agua. Tomado de: Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI). (2014). Documento técnico de soporte. [Archivo en pdf]. <http://www.andi.com.co/Uploads/DOCUMENTO%20T%C3%89CNICO%20DE%20SOPORTE.pdf>

## 1.5. Reúso del agua de formación

En cuanto al reúso del agua de producción se tiene que el agua de producción producto de las operaciones de petróleo y gas presenta varias opciones de reutilización, entre ellas: uso en operaciones futuras de fracturamiento, reinyección y reutilización en sistemas de riego para la agricultura. Fuera de la industria de petróleo y gas el agua de producción tiene un elevado potencial en el sector agrícola, esto debido a que con un adecuado tratamiento y control de los parámetros de calidad del agua esta puede generar beneficios en los distintos cultivos de una zona en específico. De esta manera el consumo de agua de otras fuentes se verá reducido sustancialmente y el aprovechamiento de estas aguas de producción permitirán tener recurso hídrico incluso en épocas de sequía. (Lester et al., 2015, p. 641-642).



### ***1.5.1. Reinyección***

El agua tratada puede reinyectarse en pozos de la industria de petróleo y gas para actividades de recuperación secundaria con el propósito de incrementar la recuperación de los componentes líquidos de distintos tipos de yacimientos. (Mesa, Orjuela, Ortega, & Sandoval, 2018, p. 90)

### ***1.5.2. Disposición a cuerpos de agua***

Después de un adecuado tratamiento de las aguas de producción estas se pueden descargar costa afuera o en otros cuerpos de agua desde que se cumpla con la regulación planteada por los organismos de control ambiental. (Sánchez, 2013, p. 105-112)

### ***1.5.3. Uso agrícola***

Debido a la compleja composición de las aguas de producción se requiere un tratamiento especializado que permita su aprovechamiento para el riego de cultivos agrícolas, sin generar daños ambientales o a la salud humana. (Echchelh, Hess, & Sakrabani, 2018, p. 1)

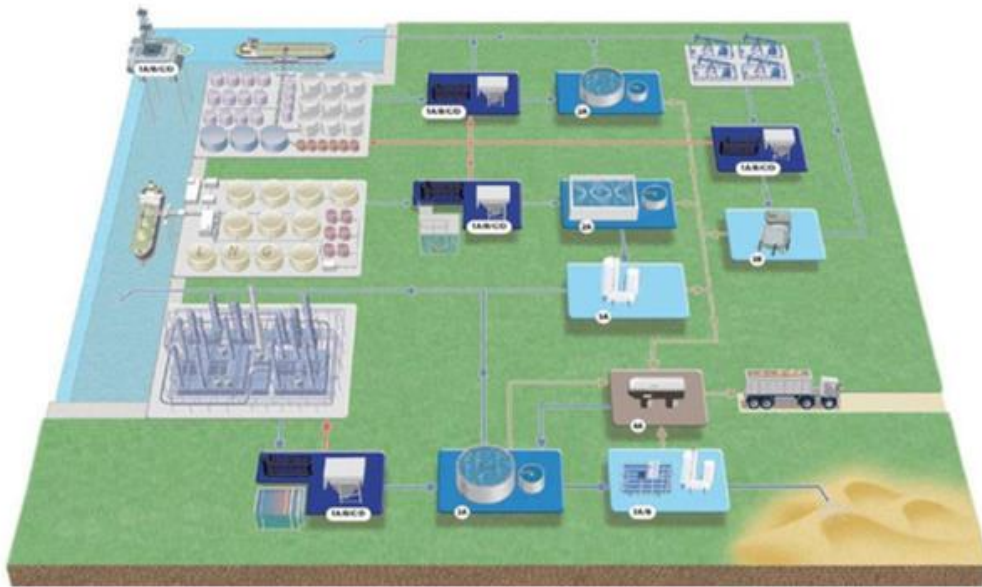
## **1.6. El proceso del tratamiento**

El agua generada requiere normalmente de un tratamiento inicial antes de decidir si se va a reutilizar o eliminar. Este tratamiento suele constar de equipos como un interceptor de platos o placas corrugados, un Skimmer o tanque de desnatación, recipiente desnatador, o separadores de flujo transversal.

Si el anterior tratamiento no logra eliminar los contaminantes de tal manera que el agua final salga con la calidad requerida se debe implementar un tratamiento posterior o secundario que consta de una unidad de flotación. (Jaimes & Pico, 2009. p. 36)

**Figura 2.**

*Planta de tratamiento de aguas*



**Nota.** La figura presenta un esquema tradicional de una planta de tratamiento de aguas cercana a una zona costera. Tomado de: Spengroup, planta de tratamiento de aguas residuales industriales. <https://spengroup.com/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-industriales/>

## 1.7. Tendencias nacionales

En Colombia se realizó un estudio para el reúso del agua de producción en Colombia, para esto, La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), en conjunto con Ecopetrol realizaron una investigación basada en la evaluación de la utilización de aguas producidas y tratadas en la industria de gas y petróleo, específicamente en los campos Apiay y Castilla La Nueva, en sistemas agrícolas y pecuarios. Este estudio se realizó mediante ensayos en lugares con control del ambiente y con especies vegetales como: caña de azúcar y un tipo de pasto; así como, el efecto en el consumo de aguas tratadas por parte de bovinos y aves de corral. A partir de este estudio lograron evidenciar que no se presentan efectos negativos por el uso del agua de producción en los cultivos o animales, con lo cual identificaron una oportunidad para reusar las aguas de producción cumpliendo con los parámetros medio ambientales requeridos. (Almansa, Velásquez-Penagos, & Rodríguez-Yzquierdo, 2018, p. 403-420)

## **1.8. Tendencias internacionales**

Alrededor del mundo se han implementado distintas técnicas que permiten el aprovechamiento de aguas de producción para su reutilización en distintos campos como lo son la industria, el sector agrícola o la disposición final en fuentes hídricas.

### ***1.8.1. Caso México***

En México el aprovechamiento de aguas residuales surgió como consecuencia de inundaciones provocadas por aguas lluvia, desde entonces, han puesto como base el aprovechamiento de las aguas residuales con fines de reusó en la agricultura, sin embargo, esto requiere tener precaución con la calidad del agua desde el punto de vista agronómico como desde el punto de vista bacteriológico. (Cisneros & Saucedo, 2016, p. 39-73)

### ***1.8.2. Caso Omán***

En Omán, la Petroleum Development Omán (PDO) genera unos 800.000 m<sup>3</sup>/d de agua producida en sus reservorios de petróleo en todo el país. El campo petrolífero de Nimr tiene una producción diaria de aguas de producción de más de 240.000 m<sup>3</sup>. Allí se realizó un proyecto de tratamiento de agua destinado a construir una instalación con una capacidad de 45.000 m<sup>3</sup>/día de agua producida para la separación de aceite/agua, un humedal artificial y finalmente estanques de evaporación para tratar inicialmente 1/5 de la producción diaria de agua. (Breuer & Al-Asmi, 2010, p. 1-2)

**Figura 3.**

*Planta de tratamiento de aguas Bauer Nimr*



**Nota.** La figura presenta la planta de tratamiento de aguas Bauer Nimr ubicada en Omán.

Tomado de <https://images.app.goo.gl/ZPKwBqNNx564iL6t7>

**1.8.3. Caso california**

En California se realizó un estudio que tenía como objetivo evaluar el impacto ambiental potencial, la calidad del suelo y los riesgos para la salud de los cultivos al implementar riego con agua de producción de campos petrolíferos. Examinaron un amplio espectro de sales, metales, radionucleidos ( $^{226}\text{Ra}$  y  $^{228}\text{Ra}$ ) y carbono orgánico disuelto (DOC) en agua de producción; utilizaron dicha agua para riego y también aguas subterráneas, descubriendo así que todos los parámetros de calidad del agua estudiados estaban por debajo de las pautas actuales de calidad de riego de California. (Kondash et al., 2020, p. 1)

## **2. DESCRIPCIÓN DE LAS GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE DIFERENTES CAMPOS PETROLEROS DE COLOMBIA**

El agua de producción es un elemento bastante usado y generado en los distintos campos petroleros de Colombia y que con un adecuado manejo y tratamiento permite su aplicación en distintos campos o su disposición en cuerpos de agua. Para el diseño de un sistema de tratamiento de aguas apto para el reúso de agua en la agricultura se deben implementar diferentes técnicas para eliminar los componentes no deseados en las aguas de formación como lo son; hidrocarburos, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, sales o iones.

### **2.1. Tipos de sistemas de tratamiento**

#### ***2.1.1. Sistemas cerrados***

Son sistemas en los cuales el diseño permite evitar el contacto de las aguas de producción con el oxígeno del ambiente. Con esto se busca que el agua se vea reducida de oxígeno disuelto, para evitar la oxidación de diferentes minerales. (Jaimes & Pico, 2009, p. 40)

#### ***2.1.2. Sistemas abiertos***

Son sistemas en los cuales el diseño no evita el contacto de las aguas de producción con el oxígeno del ambiente. El propósito u objetivo de esos sistemas es captar en el agua oxígeno disuelto para facilitar la remoción de sulfuro de hidrogeno o dióxido de carbono. (Jaimes & Pico, 2009, p. 40)

### **2.2. Técnicas implementadas en el tratamiento**

Con el objetivo de eliminar los distintos componentes que pueden contener las aguas de producción

### ***2.2.1. Separación basada en la gravedad***

Con este tipo de separación se implementa las variaciones de densidad de los líquidos, normalmente se utiliza en tanques horizontales que tienen varias presiones. debido a la diferencia de densidades el aceite va a flotar sobre el agua siguiendo el principio de retención selectiva. (Sánchez, 2013. p. 58)

### ***2.2.2. Separación basada en el filtrado***

Es utilizado para la separación de los componentes no solubles mediante el uso de membranas o mallas de filtración. estos filtros permiten el paso del líquido y retienen las partículas sólidas. (Sánchez, 2013, p. 58)

### ***2.2.3. Separación mejorada por gravedad***

Se le adiciona un campo gravitatorio artificial de manera que se mejoren las velocidades de sedimentación y así mejorar la eficiencia de la separación. con este sistema se pueden remover hasta partículas de tamaño muy fino. (Sánchez, 2013. p. 67)

### ***2.2.4. Evaporación***

Se basa en el proceso de evaporar parte del líquido de manera que se concentre una solución en el fondo del recipiente, a partir de su calentamiento. suelen utilizarse evaporadores de película descendente, evaporación por compresión de vapor y evaporadores de tubo vertical. (Jaimes & Pico, 2009, p. 62-63)

### ***2.2.5. Separación por flotación***

Se utiliza para retirar sólidos dispersos y líquidos que no se pueden mezclar que están en suspensión en una fase líquida. el proceso se da inyectando burbujas pequeñas en el líquido para

que se fijan a los sólidos que se quieren eliminar, así los sólidos suben a la parte superior donde pueden ser removidas. (Jaimes & Pico, 2009. p. 51)

### ***2.2.6. Electrodialisis***

Este proceso consiste en celdas fabricadas con membranas ión-selectivas y es utilizado para remover las sales disueltas en el agua en forma de cationes y aniones. el fluido es transportado a través de la membrana bajo la influencia de un potencial eléctrico. (Sánchez, 2013, p. 83)

### 3. ANÁLISIS DE AGUAS DE FORMACIÓN PARA LOS CAMPOS, PREVIO A SU TRATAMIENTO Y POSTERIOR AL TRATAMIENTO, DE ACUERDO CON LA NORMATIVA.

La industria de petróleo y gas debe cumplir con distintos parámetros de calidad del agua para su disposición final, una vez se ha captado el agua producto de la producción de hidrocarburos. El agua al contener distintos componentes mayores y menores requiere de un tratamiento que elimine ciertos componentes para cumplir con las normativas regulatorias en cuanto a parámetros fisicoquímicos de calidad del agua ya sea para reinyección, vertimientos en fuentes hídricas o su reúso en otros campos.

#### 3.1. Parámetros fisicoquímicos – máximos permisibles (resolución 631 de 2015)

La resolución 631 de 2015 publicada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, presenta los parámetros fisicoquímicos a monitorear y los valores máximos permisibles para vertimientos de aguas producto de actividades asociadas con hidrocarburos a cuerpos de agua superficiales.

##### 3.1.1. Parámetros hidrocarburos

En cuanto al contenido de hidrocarburos se presentan los parámetros mostrados en la siguiente imagen con sus valores máximos permisibles correspondientes a cada una de las etapas del ciclo de producción de hidrocarburos.

**Tabla 2.**

*Parámetros fisicoquímicos y límites permisibles en el agua*

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
<b>Generales</b>						
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	400,00	180,00	400,00	180,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	200,00	60,00	200,00	60,00	60,00



Tabla 2. (Continuación)

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Grasas y Aceites	mg/L	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Fenoles	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

**Nota.** La tabla presenta los parámetros fisicoquímicos y límites permisibles del agua de producción postratamiento. Tomado de: Resolución 631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. 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. D.O. No. 49.486. 18 de abril de 2015.

En cuanto al contenido de hidrocarburos en el agua tratada se debe tener en cuenta que para vertimiento en cuerpos de agua se fija un límite máximo permisible del total de hidrocarburos, pero se debe realizar un análisis y reporte de cada uno de los tipos de hidrocarburos o sustancias relacionadas que se encuentren en el agua de modo que se pueda realizar un seguimiento y concluir si se deben retirar específicamente ciertos componentes hidrocarburíferos.

**Tabla 3.**

*Parámetros correspondientes a hidrocarburos contenidos en el agua*

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
<b>Hidrocarburos</b> Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
BTEX (Benceno, Tolueno,	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	

**Nota.** La tabla presenta los parámetros correspondientes a hidrocarburos contenidos en el agua. Tomado de: Resolución 631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. 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. D.O. No. 49.486. 18 de abril de 2015.

### 3.1.2. *Parámetros compuestos del fosforo*

Los compuestos del fosforo incluyen los ortofosfatos y el contenido de fosforo total, para estos solo es necesario realizar un análisis y reporte de su respectiva cantidad en las aguas tratadas.

**Tabla 4.**

*Parámetros correspondientes a compuestos del fosforo contenidos en el agua*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>EXPLORACIÓN (UPSTREAM)</b>	<b>PRODUCCIÓN (UPSTREAM)</b>	<b>REFINO</b>
<b>Compuestos de Fósforo</b>				
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Ortofosfatos (P-PO43-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

**Nota.** La tabla presenta los parámetros fisicoquímicos y límites permisibles de compuestos del fosforo en el agua. Tomado de: Resolución 631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. 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. D.O. No. 49.486. 18 de abril de 2015.

### 3.1.3. *Parámetros compuestos del nitrógeno*

En relación con los compuestos de nitrógeno la normativa exige un valor máximo permisible de nitrógeno total de 10.00 mg/L, pero exige que se realice un análisis y reporte de los valores específicos de nitratos y nitrógeno amoniacal.

**Tabla 5.***Parámetros correspondientes a compuestos de nitrógeno contenidos en el agua*

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>						
Nitratos (N-NO3-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Nitrógeno Total (N)	mg/L	10,00	10,00	10,00 o 40,00 si en el proceso de refino se incluyen actividades de hidrogenación	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

**Nota.** La tabla presenta los parámetros fisicoquímicos y límites permisibles de compuestos de nitrógeno contenidos en el agua. Tomado de: Resolución 631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. 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. D.O. No. 49.486. 18 de abril de 2015.

### 3.1.4. Parámetros iones

Los iones presentes en el agua suelen ser de distintas sales que pueden encontrarse en el subsuelo y la regulación indica que para obtener una calidad del agua óptima que no afecte los cuerpos de agua superficiales y los seres vivos implicados en ella, se debe tener en cuenta el cianuro por su toxicidad, los cloruros, fluoruros, sulfatos y sulfuros.

**Tabla 6.***Parámetros correspondientes a iones contenidos en el agua*

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
<b>Iones</b>						
Cianuro Total (CN-)	mg/L	1,00	1,00	1,00		
Cloruros (Cl-)	mg/L	1.200,00	1.200,00	500,00	250,00	250,00
Fluoruros (F-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Sulfatos (SO42-)	mg/L	300,00	300,00	500,00	250,00	250,00
Sulfuros (S2-)	mg/L	1,00	1,00	1,00		

**Nota.** La tabla presenta los parámetros fisicoquímicos y límites permisibles de iones contenidos en el agua. Tomado de: Resolución 631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. 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. D.O. No. 49.486. 18 de abril de 2015.

### 3.1.5. Parámetros metales y metaloides

Los metales y metaloides presentan ciertos valores máximos permisibles dependiendo del elemento, es menester controlar dichos parámetros dado que ciertos metales, en especial los pesados, tienden a incorporarse a las aguas de producción provenientes de zonas o formaciones arcillosas, y estos pueden generar graves riesgos a la salud de los seres vivos, a los suelos y a los cultivos. Algunos de ellos son: el cadmio, mercurio, arsénico, plomo y vanadio, que deben encontrarse en cantidades muy bajas en el agua tratada, o preferiblemente con cantidades de 0.00 mg/L.

**Tabla 7.**

*Parámetros correspondientes a hidrocarburos contenidos en el agua*

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)
<b>Metales y Metaloides</b>					
Arsénico (As)	mg/L	0,10		0,10	0,10
Bario (Ba)	mg/L	Análisis y Reporte		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10		0,10	0,10
Cinc (Zn)	mg/L	3,00		3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00		1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50		0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	3,00		3,00	3,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01		0,01	0,01
Níquel (Ni)	mg/L	0,50		0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y Reporte		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,20		0,20	0,10
Selenio (Se)	mg/L	0,20		0,20	0,20
Vanadio (V)	mg/L	1,00		1,00	1,00

**Nota.** La tabla presenta los parámetros fisicoquímicos y límites permisibles de metales y metaloides contenidos en el agua. Tomado de: Resolución 631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. 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. D.O. No. 49.486. 18 de abril de 2015.

Entre otros parámetros que se deben registrar para análisis y reporte son la acidez total, la alcalinidad total, la dureza cálcica y total, y el color real en términos de absorbancia a longitudes de onda de 436 nm, 525 nm y 620 nm, para tener una mayor identificación de los componentes y de la calidad del agua. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015. p. 8)

### 3.2. Parámetros fisicoquímicos admisibles del agua para riego agrícola (decreto 1594 de 1984)

Para la disposición específica del agua en la agricultura se deben adicionalmente tener en cuenta los valores admisibles de ciertos componentes del agua, de modo que los suelos no se vean afectados y los cultivos puedan desarrollarse sin ningún tipo de inconveniente. (IDEAM, 1984)

**Tabla 8.**

*Parámetros admisibles para el uso del agua en la agricultura*

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.1
Berilio	Be	0.1
Cadmio	Cd	0.01
Cinc	Zn	2.0
Cobalto	Co	0.05
Cobre	Cu	0.2
Cromo	Cr + 6	0.1
Fluor	F	1.0
Hierro	Fe	5.0
Litio	Li	2.5
Manganeso	Mn	0.2
Molibdeno	Mo	0.01
Níquel	Ni	0.2
pH	Unidades	4.5 - 9.0
Plomo	Pb	5.0
Selenio	Se	0.02
Vanadio	V	0.1

**Nota.** La figura presenta los parámetros fisicoquímicos y sus límites permisibles para el uso del agua en el sector agrícola. Tomado de: Decreto 1594 de 1984. [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM]. Por el cual se establecen los usos del agua y residuos líquidos.

Estos parámetros tienen prioridad sobre los parámetros mencionados en el apartado anterior dado que expresan los valores permisibles para el uso específico del agua en la agricultura, y por lo tanto, se puede esperar que al cumplir con los valores específicos para este uso se cumplirá indirectamente con los permisibles para su disposición en cuerpos de agua.

### **3.3. Parámetros fisicoquímicos del agua proveniente del campo colorado**

El campo colorado está ubicado en el departamento de Santander y las propiedades del agua en la figura 12 muestran en cuanto al pH del campo Colorado que tiene un valor de 8.37 lo cual le da un carácter básico al agua, teniendo en cuenta que el pH para disposición en cuerpos de agua es de 6 - 9 está cumpliendo con la norma, al igual que para el reúso en la agricultura dado que el rango es de 4.5 - 9. El valor de los sulfatos está dentro del rango para su disposición en cuerpos de agua.

El valor de los cloruros está muy por encima del valor establecido en las regulaciones, por lo cual se requiere un tratamiento para eliminar las sales en el agua. Los sólidos suspendidos totales superan el valor de la regulación por lo cual se requiere un tratamiento para eliminarlos. De igual forma, las aguas de producción contienen una alta cantidad de sales por lo cual se debe realizar un tratamiento correspondiente. En cuanto al contenido de hidrocarburos totales el valor está por debajo del límite permisible para la disposición en cuerpos de agua, sin embargo, es recomendable disminuir en mayor medida el contenido de hidrocarburos en el agua para el uso en la agricultura.

La demanda bioquímica de oxígeno está por encima del rango permitido (60 DBOS), al igual que la demanda química de oxígeno, por lo cual se deben controlar estos parámetros en el agua. Las grasas y aceites también están por encima de los valores establecidos por la norma. Los fenoles están por debajo del límite permisible, por lo cual no generan inconvenientes con la regulación. Los sólidos sedimentables y totales están por encima de lo que exige la normativa por lo cual requieren de un tratamiento.

**Tabla 9.***Parámetros del agua de producción del Campo colorado*

PARAMETRO	RESULTADO	METODO / NORMA
pH (Unidades de pH)	8.37	Potenciométrico/SM 4500-H*B
Bario (mg Ba/L)	28.1	Absorción Atómica/ SM 3500-Ba
Sulfatos (mg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> / L)	50.4	Espectrofotométrico/SM 4500 E
Calcio (mg Ca/L)	1346	Absorción Atómica/ SM 3500-Ca
Magnesio (mg Mg/L)	54.4	Absorción Atómica/ SM 3500-Mg
Cloruros (mg CL <sup>-</sup> /L)	8929	Argentométrico/SM 4500-CL-Mg
Carbonatos (mg CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> /L)	192	Titrimétrico/SM 2320 B
Grasa y Aceites (mg/L)	23.3	Extracción Líquido-Líquido/SM 5520 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	92	Filtración por membrana/SM 2540D
Turbiedad (NTU)	134	Nefelométrico/SM 2130 B
Salinidad (ppm CaCO <sub>3</sub> )	12210	Conductivimétrico/ SM 2520
Conductividad (µS/cm)	14790	Conductivimétrico/ SM 2510 B
Hidrocarburos Totales (mg/L)	6.74	Extracción Líquido-Líquido/SM 5520F
Alcalinidad Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	320	Trimétrico /SM 2320B
Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	2473	Trimétrico /SM 2340C
Color (UPC)	37	Espectrofotométrico /SM 2120 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)	245	Respirométrico /SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)	646.7	Espectrofotométrico /SM 5220 D
Sólidos Totales (mg/L)	378	Gravimétrico /SM 2540 B
Sólidos Disueltos(mg/L)	286	Gravimétrico /SM 2540 C
Sólidos Sedimentables (ml/L)	4.5	Cono Imhoff / SM 2540 F
Fenoles (Mg/L)	0.08	Espectrofotométrico-Extracción con Cloroforno / SM 5530 C

**Nota.** La figura presenta datos tomados de un estudio del agua de formación del campo Colorado. Tomado de: Jaimes, D., & Pico, M. (2009). Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras-aplicación Campo Colorado. (Trabajo de grado.) Universidad Industrial de Santander.

### 3.4. Parámetros fisicoquímicos del agua de fondo en la cuenca de los llanos orientales

Para la cuenca de los llanos orientales se puede observar de la figura 13 que el agua es predominantemente salada, lo cual es una característica normal de las aguas de producción por lo que requieren de un tratamiento para disminuir el contenido de sales. El pH del agua es de 7.22 lo cual está dentro del rango establecido por la normativa para disposición en cuerpos de agua al igual que para riego agrícola. Se puede ver que la conductividad del agua es muy alta esto debido a la presencia de sales en disolución. El valor de cloruros está por encima del límite permisible dado por la norma por lo cual debe controlarse. En cuanto a los sulfatos el valor está por debajo del límite permisible por lo cual no genera problemas a la calidad del agua. Es menester tener en

cuenta que para dar un buen análisis de la calidad del agua se necesitan más parámetros de las aguas estudiadas que permitan comparar con los límites permisibles por los entes regulatorios.

**Tabla 10.**

*Parámetros del agua Cuenca de los Llanos Orientales*

Parámetro	Valor
Tipo de agua predominante	Na-Ca-Cl
Temperatura (°C)	112,8
pH	7,22
Conductividad (us/cm)	8850
Na (mg/l)	1490
K (mg/l)	124
Ca (mg/l)	429
Mg (mg/l)	72,30
Cl (mg/l)	2570
SO <sub>4</sub> (mg/l)	8,15
NO <sub>3</sub> (mg/l)	-
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	378
CO <sub>3</sub> (mg/l)	<1
Ca/Mg (mg/l)	5,93
Ca/SO <sub>4</sub> (mg/l)	52,64
Na/Cl (mg/l)	0,58
Cl/Br (mg/l)	287

**Nota.** La figura presenta los parámetros y valores obtenidos del estudio de agua de formación de la cuenca de los Llanos Orientales. Tomado de: Ortega, A. (2019). Estrategia para el uso sostenible de agua de producción para riego de suelos, adaptada de la experiencia del desierto de Omán a un patrón de pozos en un campo colombiano. (Tesis de maestría.) Fundación Universidad de América. Repositorio Institucional Lumieres.

Al analizar los límites permisibles establecidos para el reúso del agua en la agricultura en comparación con los límites permisibles establecidos para la disposición del agua producto de actividades del sector de petróleo y gas, se pueden observar ciertas diferencias en algunos de sus parámetros y que es de gran importancia tener en cuenta. En cuanto al contenido de arsénico, ambas normativas tienen el mismo valor límite con lo cual se asegura que ese parámetro no afectara la calidad del agua; los límites permisibles para el cadmio, cinc, cobre, cromo, níquel, selenio y vanadio de acuerdo con la regulación para la disposición en cuerpos de agua son más altos por lo cual no funcionarían para el riego agrícola, debido a esto el tratamiento del agua debe ser más riguroso de manera que se alcancen los valores permisibles para el riego agrícola en cuanto a estos parámetros. Para el hierro y el plomo, los valores para disposición en cuerpos de agua son menores



que los de riego agrícola por lo cual al cumplir con ellos se cumpliría indirectamente con los límites permisibles para riego agrícola.

Es importante tener en cuenta que los límites permisibles de los parámetros de las aguas que tienen prioridad son los establecidos por la regulación para riego agrícola dado que este es el objetivo que se tiene para disponer del agua, por ello los análisis de las aguas de producción antes y después del tratamiento deben incluir todos los parámetros establecidos por dicha norma de modo que se pueda establecer que parámetros no cumplen con la calidad del agua requerida y se pueda realizar un tratamiento adecuado y óptimo que permita eliminar los contaminantes presentes en el agua y con ello se pueda disponer finalmente del agua en el sector agrícola.

## 4. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS IMPLICADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA DE FORMACIÓN

### 4.1. Equipos tratamiento de aguas

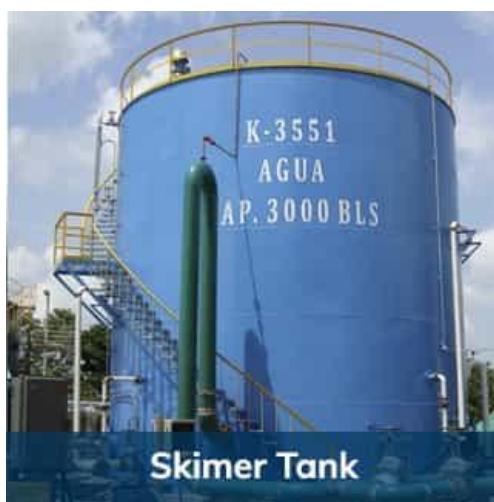
Los equipos implicados en el tratamiento de aguas de formación dependen del tipo de campo y en general del tipo de componentes que se deseen eliminar del agua, de este modo, son múltiples los equipos que permiten realizar el tratamiento de aguas y de acuerdo con un análisis se decide que equipos implementar en determinados campos para el tratamiento del agua de producción. A continuación se presentan los diferentes equipos implementados generalmente para el tratamiento de aguas de formación en un campo petrolero.

#### 4.1.1. *Tanque desnatador*

Es un sistema basado en la separación por gravedad, el cual consta de un gran tanque el cual proporciona un alto tiempo de retención para que se pueda dar la separación del aceite y el agua por coalescencia. (Jaimes & Pico, 2009. p. 41)

**Figura 4.**

*Tanque desnatador*



**Nota.** La figura presenta un tanque desnatador usado en el tratamiento de aguas. Tomado de: Proton Colombia. Equipos para la industria de petróleos. Skimer Tank. <https://proton-colombia.com/web/images/equiposparalaindustriadepetroleo/skimer-tank-2-industrias-proton.jpg>

#### **4.1.2. Recipiente desnatador**

Suelen ser sistemas parecidos a los tanques desnatadores pero tienen incorporados platos coalescedores o interceptores de placas paralelas para proporcionar una mejor y más rápida separación mediante la separación de gravedad y la coalescencia. (Sánchez, 2013. p. 61).

**Figura 5.**

*Recipiente desnatador*



**Nota.** La figura muestra un recipiente desnatador de una planta de tratamiento de aguas. Tomado de: Maderplas. Skimmer, trampa de grasas o desarenador industrial de plástico, para derrames de hidrocarburos y derivados. Skimmer desnatador. <https://maderplas.com/skimmer-petrolero-desnatador-trampa-de-grasas-conexion-hermetica-subteraneo-plastico-industrial/>

#### **4.1.3. Interceptor de placas corrugadas**

Es una unidad con corrugaciones similares a la de un tejado, deben tener una inclinación o ángulo de 45° por el cual el agua se fuerza a fluir hacia abajo para que de esta manera sean removidas las partículas de aceite que se encuentren en el agua. (Englande, Krenkel, & Shamas, 2015. p. 8-10)

**Figura 6.**

*Interceptor de placas corrugadas*



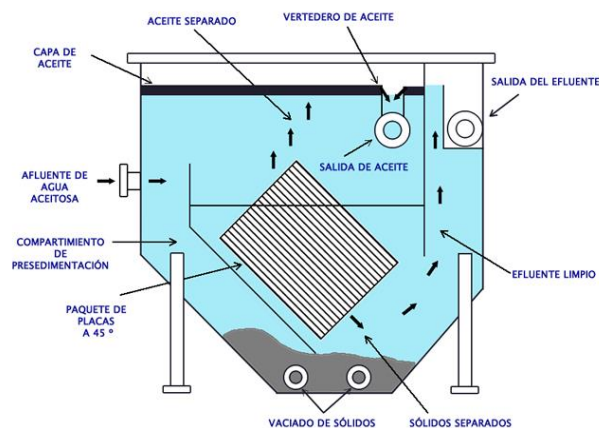
**Nota.** La figura presenta un interceptor de placas corrugadas ubicado en campo para el tratamiento de aguas. Tomado de: Makeinindiatrade. Corrugated plate interceptor k-pack systems private limited. <https://www.makeinindiatrade.com/k-pack-systems-private-limited/p-d/corrugated-plate-interceptor>

#### **4.1.4. Separador de flujo transversal**

Contiene un sistema de placas corrugadas en las que el agua fluye de forma horizontal y perpendicular a las corrugaciones del plato, esto va a permitir su configuración en ángulos mayores a 45°, lo que permite la eliminación de sedimentos. (Sánchez, 2013. p. 59-66)

**Figura 7.**

*Separador de flujo transversal*



**Nota.** La figura muestra el esquema de un separador de flujo transversal con cada una de sus partes y el flujo del agua dentro de él. Tomado de: Sumiowater. Separador de placas corrugadas. <https://sumiowater.com/tratamiento-de-aguas-residuales-en-refinerias-de-petroleo/separador-de-placas-corrugadas/>

#### **4.1.5. Unidad de flotación inducida por gas**

Estos equipos se fundamentan en la separación por arrastre con gas de partículas de aceite. El proceso que desarrolla la unidad inicia con la generación de diminutas burbujas de gas que son disueltas en el agua, donde al hacer contacto con las gotas de aceite y partículas sólidas incrementan las densidades con lo cual ayudan a que estas partículas asciendan a superficie donde son recolectadas. (Forero, Ortiz, & Duque, 2007. p. 150-151)

**Figura 8.**

*Unidad de flotación por gas*



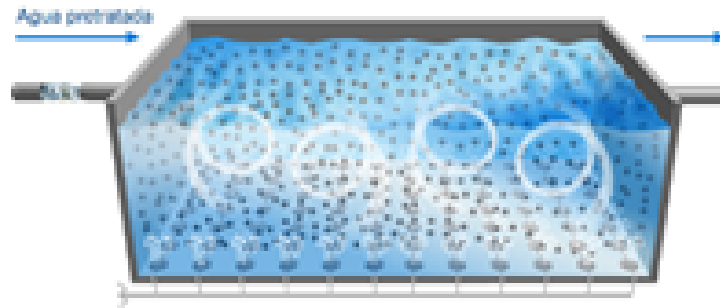
**Nota.** La figura presenta una unidad de flotación por gas en campo en el cual se agrega el gas al agua tratada. Tomado de: Alibaba. Dissolved gas flotation. <https://www.alibaba.com/showroom/dissolved-gas-flotation.html>

#### **4.1.6. Lecho fluidizado**

Equipo en forma de piscina cúbica con ducto para el ingreso del agua y ducto para la salida del agua tratada. En la parte inferior cuenta con orificios para la inyección del gas. (Prada, 2014. p. 4)

**Figura 9.**

*Lecho fluidizado*



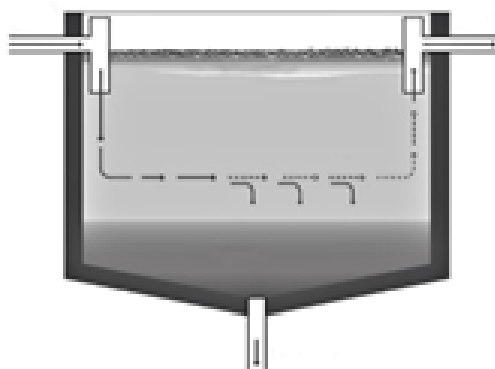
**Nota.** La figura presenta el esquema de un lecho fluidizado con el movimiento del gas y el flujo de agua. Tomado de: Condorchem. Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. <https://condorchem.com/es/blog/sistemas-con-reactores-aerobicos-para-tratar-aguas-residuales/>

#### **4.1.7. Tanque de sedimentación**

Este equipo consta de un tanque con fondo inclinado de manera que los lodos y sólidos se dirijan al ducto inferior para ser retirados. En la parte superior encontramos dos ductos, uno para el ingreso del agua y otro para la salida. (Sánchez, 2013. p. 79)

**Figura 10.**

*Tanque de sedimentación*



**Nota.** La Figura presenta un tanque de sedimentación con sus correspondientes entradas y salidas y la forma en la que se sedimentan los lodos y sólidos en el fondo para salir por un desagüe. Tomado de: SSWM. Tecnologías de saneamiento. Sedimentador. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/sedimentador>

#### 4.1.8. Filtro multimedia

Los filtros multimedia contienen unas capas o secciones que filtran sobre un lecho de grava o arena gruesa. Están formados con capas de minerales como antracita, arena en dos diferentes granulometrías y grava para soporte. (Merinsac, S.f. p. 2)

**Figura 11.**

*Filtro multimedia*



**Nota.** La figura muestra un filtro multimedia con cada uno de sus cilindros dentro de los cuales se encuentran los materiales filtrantes. Tomado de: planta purificadora de agua. Filtros multimedia. <https://planta-purificadora-de-agua.com/filtros-multimedia.html>

#### 4.1.9. Equipo de ultrafiltración

Contiene una membrana que tiene la capacidad de retener partículas de tamaños entre 0,001 – 0,1  $\mu\text{m}$  micras en el agua, dado que tienen un tamaño menor de poro que otro tipo de membranas como las de microfiltración. (Sánchez, 2013. p. 82)

**Figura 12.**

*Equipo de ultrafiltración*



**Nota.** La figura presenta un equipo de ultrafiltración con todos los cilindros para realizar el filtrado del agua. Tomado de: freepng. La ultrafiltración, osmosis inversa tratamiento de agua industrial. <https://www.freepng.es/png-6mq3pr/>

#### ***4.1.10. Equipo de nanofiltración***

Este compuesto de una nano membrana que es semipermeable al estar bajo presiones específicas, que se generan dependiendo del tamaño de las partículas que puedan atravesar la membrana. (Sánchez, 2013. p. 82)

**Figura 13.**

*Equipo de nanofiltración*



**Nota.** La figura presenta un equipo de nanofiltración con cada uno de sus componentes para el filtrado del agua. Tomado de: Sanitronec. Sistemas de nanofiltración. <https://sanitronec.com/producto/sistemas-de-nanofiltracion/>

#### ***4.1.11. Equipo de ósmosis***

Se compone de una membrana semipermeable, tanques donde el agua pasa y pierde iones o partículas diluidas, hasta que se igualan las concentraciones en ambas partes de la membrana. (Lester et al., 2015. p. 642)

**Figura 14.**

*Equipo de ósmosis*



**Nota.** La figura muestra un equipo de ósmosis por el cual fluye el agua para eliminar iones a partir de una semimembrana. Tomado de: Iagua. Equipo de tratamiento de aguas mediante osmosis inversa. <https://www.iagua.es/noticias/jhuesa/equipo-tratamiento-aguas-mediante-osmosis-inversa>



#### ***4.1.12. Filtro de seguridad***

Permite retirar algunas partículas, olores, cloro residual y materia orgánica del agua. (Avila & Moreno, 2016. p. 14-16). Contiene Carbón activado filtro de agua industrial se compone principalmente de dos partes:

- Cama de carbón activado
- Apoyo a la capa: Compuesto por guijarros, gravas o algo más.

**Figura 15.**

*Filtro de seguridad*



**Nota.** La figura presenta un filtro de seguridad utilizado para verificar que se hayan removido las partículas del agua. Tomado de: Alibaba. Security filter water oil. [https://www.alibaba.com/showroom/security+filter+water+oil.html?fsb=y&IndexArea=product\\_en&CatId=&SearchText=security+filter+water+oil&isGalleryList=G](https://www.alibaba.com/showroom/security+filter+water+oil.html?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=security+filter+water+oil&isGalleryList=G)

#### ***4.1.13. Equipo de radiación ultravioleta***

Está compuesto por una o varias lámparas de cuarzo, que emiten distintas longitudes de onda entre 200-300 nanómetros. La luz ultravioleta no cambia las propiedades del agua. (Purewater. S.f.)

**Figura 16.**

*Equipo de radiación ultravioleta*



**Nota.** La figura presenta un equipo de radiación ultravioleta, con las lámparas de radiación y el agua fluyendo.

Tomado de: filtros calcificadores. Ultravioletas. <https://www.filtrosdescalcificadores.es/ultravioletas/>

## 4.2. Costos aproximados maquinaria y equipo

A continuación se presenta una tabla con los distintos equipos presentados para el tratamiento de aguas de producción, con su descripción, imagen y costo aproximado de una unidad de cada equipo. El valor de cada equipo fue tomados y promediados de distintas páginas web de ventas de equipos online.

**Tabla 11.**


*Costos maquinaria y equipo requerida.*

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN	CANTIDAD	VALOR
Interceptor de platos corrugados	Sistema de platos con corrugaciones coalescentes, material polipropileno. Unidades en acero con caudales máximos de 500 m <sup>3</sup> por hora,		1	5000 - 20000 USD
Equipo flotación por gas	Tiene eductores dobles y un disco difusor-impulsor. El disco cuenta con una serie de orificios finos con el fin de lograr una difusión de burbujas de aire con tamaños entre 10 y 100 $\mu$ m de diámetro. El sistema permite ajustar el volumen de aire y ajustar el tamaño de las burbujas según las necesidades del proceso.		1	20000- 50000 USD

Tabla 11. (Continuación)

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN	CANTIDAD	VALOR
Lecho fluidizado	Equipo en forma de piscina cubica con ducto para la entrada del agua y ducto para la salida del agua tratada. En la parte inferior cuenta con orificios para la inyección del gas.		1	4000 USD
Tanque de sedimentación	Este equipo cuenta consta de un tanque con fondo inclinado de manera que los lodos y solidos se dirijan al ducto inferior para ser retirados. En la parte superior encontramos dos ductos, uno para la entrada del agua y otro para la salida.		1	20000 USD
Filtro multimedia	Contienen diferentes tipos de secciones filtrantes sobre una capa de grava o arena gruesa. Son dispuestos con secciones de antracita, arena para filtrar en dos granulometrías y grava como soporte.		1	3000 USD
Equipo Ultrafiltración	Tiene membranas que retienen partículas de tamaños 0,001 – 0,1 µm micras en un líquido por lo que presentan menor tamaño de poro que otro tipo de membranas.		1	4000 USD
Equipo Nanofiltración	Se compone de una membrana (nano) que es semipermeable bajo distintas condiciones, tiene menor tamaño de poro que otras, solo atraviesan moléculas con menor tamaño que nano.		1	6000 USD

Tabla 11. (Continuación)

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN	CANTIDAD	VALOR
Equipo Osmosis	Se compone de una membrana semipermeable, tanques donde el agua pasa de estar en dilución a una solución concentrada, hasta que se iguala la diferencia en las concentraciones a ambos lados de la membrana.		1	4000 USD
Filtro de seguridad	Carbón activado filtro de agua industrial se compone principalmente de dos partes: 01. Cama de carbón activado 02. Apoyo a la capa: Compuesto por guijarros, gravas o algo más.		1	1000 USD
Equipo radiación ultravioleta	Tiene una o varias lámparas de cuarzo, y emite unas longitudes de onda entre 200 a 300 nanómetros. La luz ultravioleta no cambia las propiedades del agua.		1	500 USD

**Nota.** La tabla presenta los equipos, descripción, imagen y costos por unidad aproximados para un sistema completo de tratamiento de aguas de producción, los precios aproximados corresponden a datos proporcionados por la plataforma de comercio entre empresas en línea Alibaba.

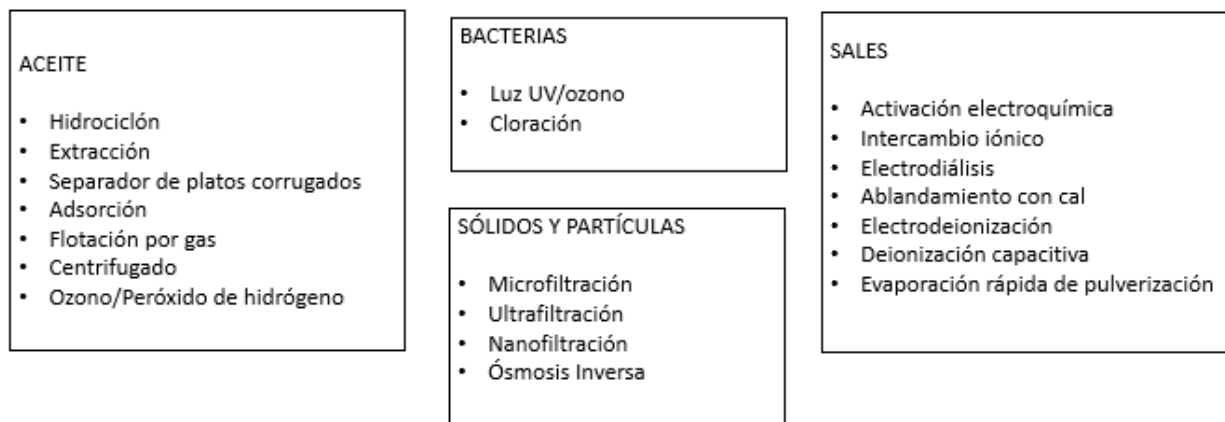
## 5. DISEÑOS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS TRATAMIENTOS ACTUALES PARA EL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

### 5.1. Diagrama del proceso

Para el tratamiento de aguas se cuenta con una numerosa cantidad de equipos que realizan el mismo proceso, pero que dependiendo la necesidad de la empresa se selecciona uno u otro, de esta manera en la figura 17 se presenta una clasificación de los distintos procesos o técnicas usadas dependiendo su objetivo de tratamiento o el contaminante a eliminar.

**Figura 17.**

*Técnicas de tratamiento*

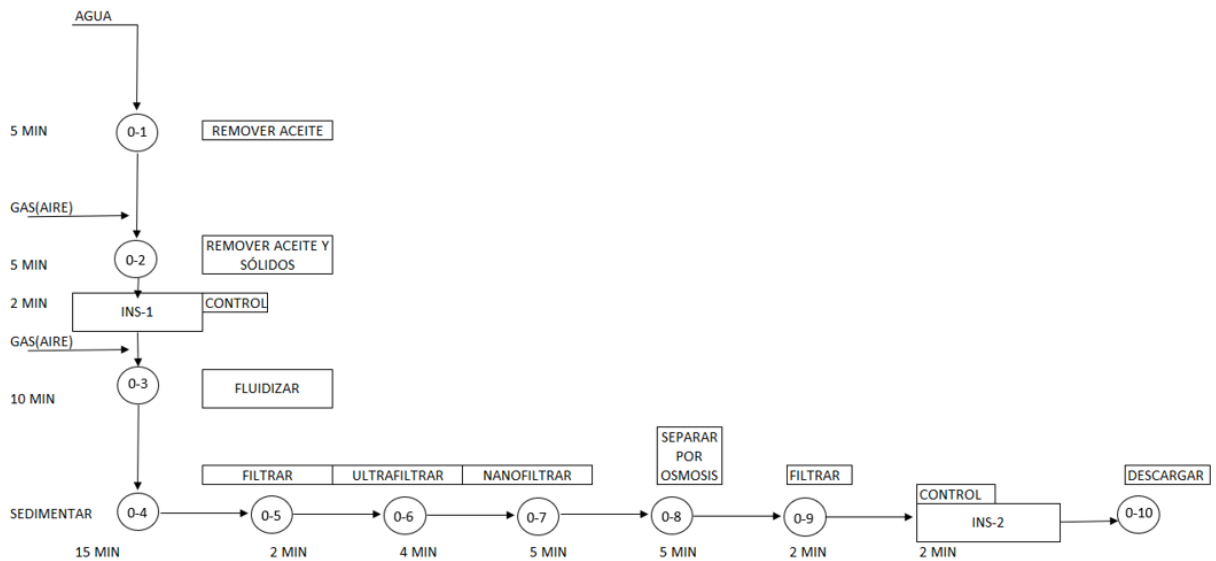


**Nota.** La figura presenta los distintos tipos de contaminantes que puede presentar el agua y las diferentes técnicas que permiten eliminar los contaminantes. Elaboración propia.

Como se puede observar son distintos los procesos que permiten eliminar los componentes del agua, sin embargo, en la industria se seleccionan los óptimos que se ajusten a las necesidades de la empresa, a partir de esto en la siguiente figura se presenta el proceso de tratamiento de aguas de producción seleccionado con el cual se pretende reusar el agua posteriormente en el sector agrícola y a partir del cual se realizarán distintos análisis, en la figura se incluyen los tiempos aproximados de tratamiento en cada sección del proceso.

**Figura 18.**

*Proceso de tratamiento*



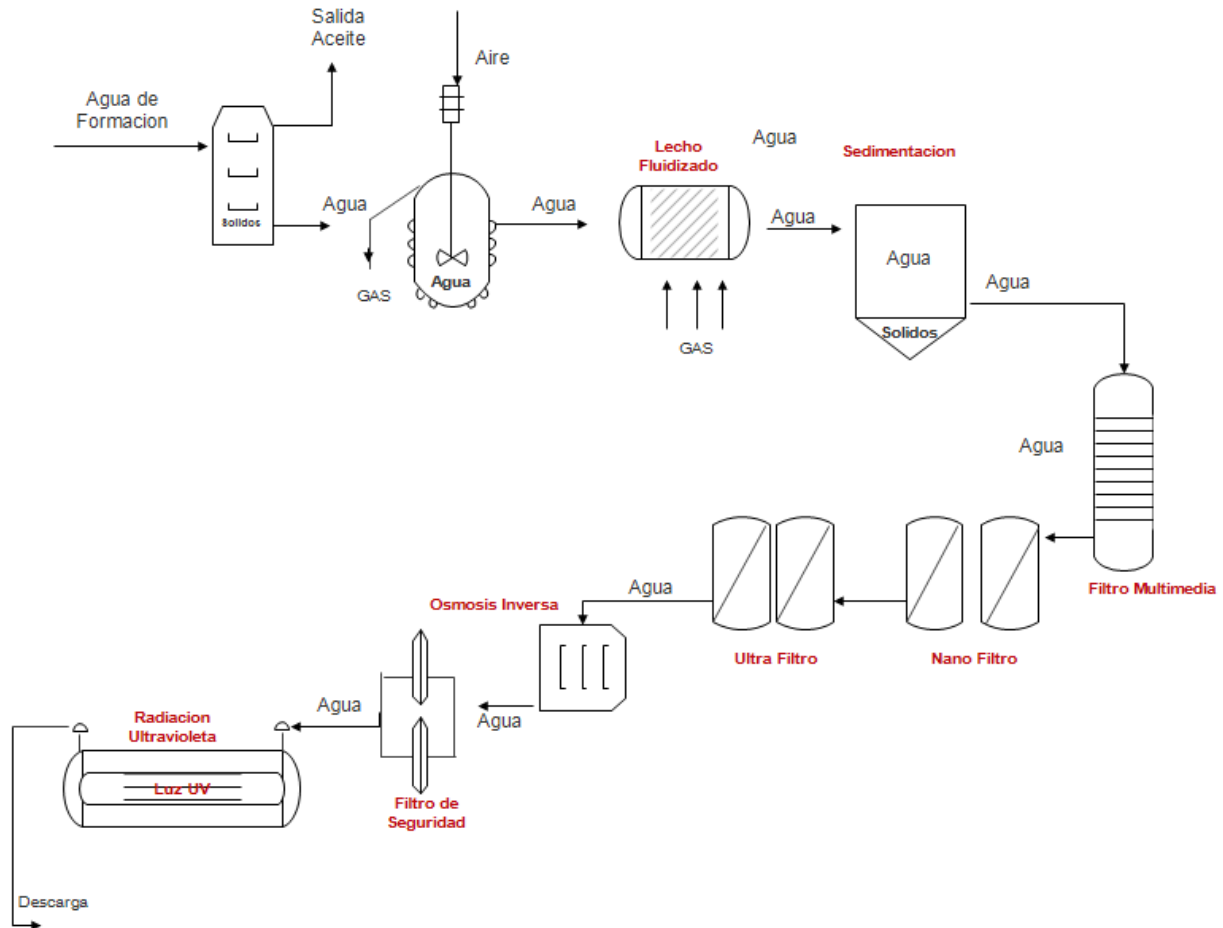
**Nota.** En la figura se presenta el proceso de tratamiento de agua con cada uno de las etapas de tratamiento y los tiempos estimados para cada etapa, el inicio del proceso en el diagrama es por la parte superior con el ingreso del agua a tratar y continua el camino indicado por las flechas hasta el último proceso que es la descarga. Los procesos en rectángulos corresponden a inspecciones o controles de verificación de calidad del agua. Elaboración propia.

## 5.2. Estudio de métodos

La siguiente figura presenta los equipos utilizados para el tratamiento de aguas de producción en relación con la figura 18 que presenta los procesos seleccionados que van en relación con los equipos a continuación presentados.

**Figura 19.**

*Proceso de tratamiento por equipos*



**Nota.** En la figura se presenta la instrumentación del sistema de tratamientos de aguas con cada equipo, desde que ingresa el agua hasta que es descargada. Elaboración propia.

### 5.3. Análisis de operaciones

Inicialmente el agua de producción proveniente de los pozos se inyecta a través de tuberías al equipo denominado **interceptor de platos corrugados**, en este equipo se da la separación inicial del aceite y el agua mediante una serie de platos ubicados de manera escalonada dentro del equipo por donde se hace fluir el agua para que las partículas de aceite queden adheridas sobre los distintos

platos. Luego, el agua fluye a través de tuberías hacia el **equipo de flotación por gas** donde se le inyecta gas al agua (normalmente aire) para que de esta manera las burbujas se adhieran al aceite y sólidos, disminuyan su densidad y asciendan por flotación a la superficie donde son removidas fácilmente. Después, el agua pasa a una unidad de **lecho fluidizado** donde se le inyecta nuevamente gas (aire) al agua para que en el siguiente equipo la separación sea más eficiente.

Así pues, el siguiente equipo es un **tanque de sedimentación** en el cual se deja reposar el agua un tiempo determinado (tiempo de retención) para que de esta manera los sólidos y el lodo presentes en el agua sedimenten en el fondo del tanque donde pueden ser removidos, así mismo el gas inyectado anteriormente asciende a superficie con algunas partículas de aceite y sólidos donde también son removidas. Posteriormente, el agua pasa por un proceso de filtración que inicia con un **filtro multimedia** en el cual se retiran las partículas sólidas de mayor tamaño presentes en el agua; el segundo es un **ultrafiltro** (normalmente una membrana semipermeable) que permite retirar las partículas sólidas de tamaño ultra (0.01 a 0.1 micras); el tercer y último filtro es un **nanofiltro** que permite retirar las partículas tamaño nano (10 a 100 Å) presentes en el agua.

Después, el agua es dirigida a un **equipo de osmosis inversa** que se basa en una membrana semipermeable que permite retirar partículas de tamaños muy pequeños y iones presentes en el agua (1 a 10 Å), por lo cual también se conoce como hiperfiltración. El agua es direccionada a un **filtro de seguridad** que permite finalmente verificar que el agua tratada no contenga sólidos suspendidos o en solución. Luego, el agua pasa a través de un equipo de **radiación ultravioleta** que permite eliminar las bacterias presentes en el agua que puedan afectar de alguna manera la calidad del agua para su disposición final en la agricultura. Finalmente, se da la descarga del agua.

#### **5.4. Diagrama de operaciones**

A continuación, se presenta la tabla 12 con las operaciones para el tratamiento de aguas de producción a partir de los diagramas de procesos y equipos, presentados anteriormente. Es importante aclarar que debido a que este es un proceso continuo mediante el cual el agua fluye entre cada equipo, entre cada actividad se tendrá un flujo del agua de un equipo al otro mediante tuberías.



**Tabla 12.**

*Diagrama de operaciones tratamiento de aguas*

<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>
1	Inyectar agua al interceptor de platos corrugados
2	Remover aceite (interceptor de platos corrugados)
3	Inyectar gas al equipo de flotación por gas
4	Remover aceite y solidos (Equipo de flotación por gas)
5	Inyectar gas al lecho fluidizado
6	Fluidizar agua (lecho fluidizado)
7	Sedimentar (tanque de sedimentación)
8	Filtrar (filtro multimedia)
9	Filtrar (Ultrafiltración)
10	Filtrar (Nanofiltración)
11	Remover sólidos, partículas y sales (osmosis)
12	Filtrar (Filtro de seguridad)
13	Eliminar bacterias (Radiación ultravioleta)
14	Descargar

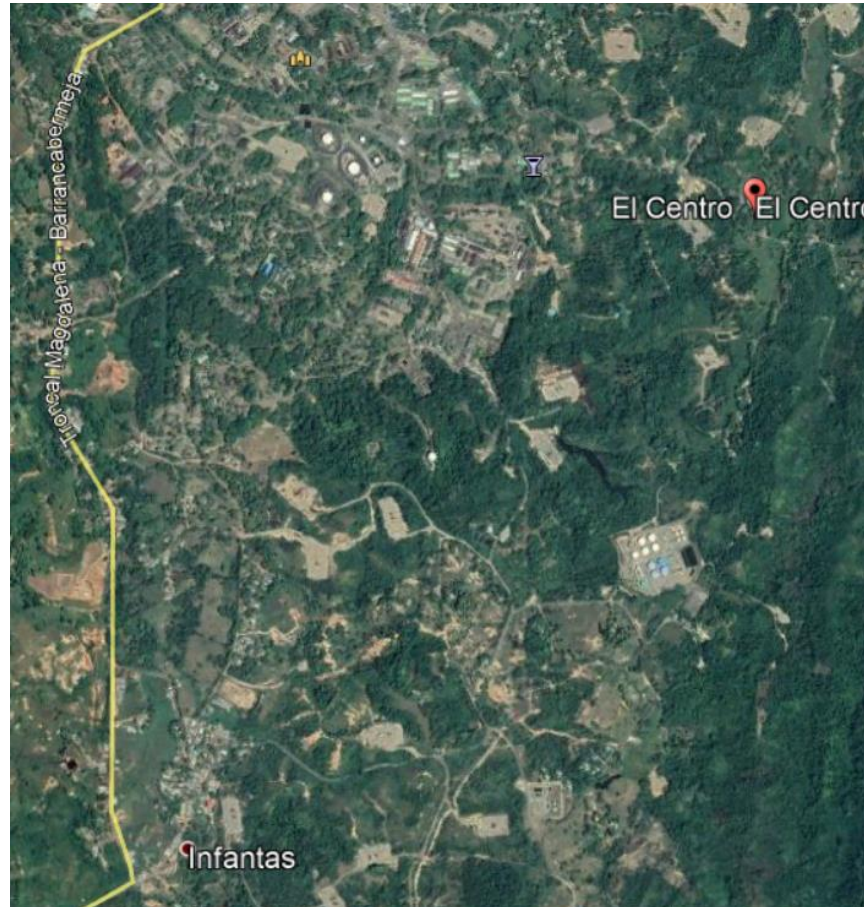
**Nota.** La tabla presenta las operaciones del tratamiento de agua con cada una de las actividades y la descripción de estas. Elaboración propia.

## **5.5. Distribución en planta**

En esta sección se presenta la distribución en planta o Layout de los equipos necesarios para el tratamiento de aguas de producción. Al estar el proyecto enfocado en Colombia se seleccionó el campo Infantas Oriente que es un campo maduro con alta producción de agua, a continuación se presenta una figura satelital de una sección correspondiente al campo.

**Figura 20.**

*Planta de tratamiento de aguas campo Infantas Oriente*



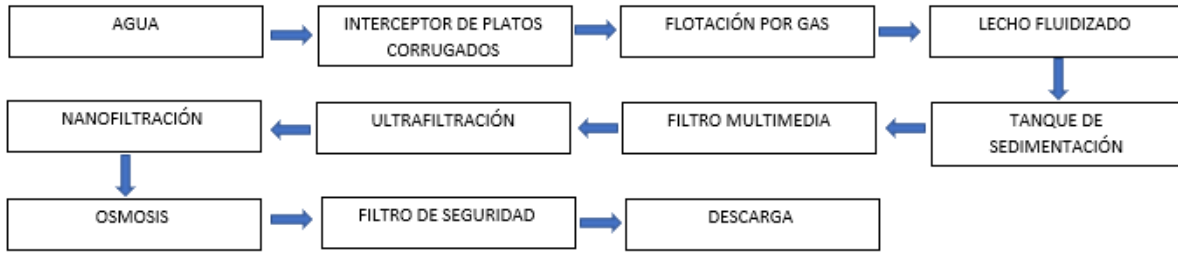
**Nota.** La figura presenta una vista aérea de la planta de tratamiento de aguas del campo Infantas Oriente. Tomado de: Google Earth.

### ***5.5.1. Planos de espacio requerido***

A continuación, se presenta una figura con la posible ubicación y flujo de los equipos a utilizar en el proceso de tratamiento de aguas de producción, así mismo, se presenta una figura tomada de SpinaGroup en la que se representa el layout de una planta de tratamiento de aguas de producción y la disposición de los equipos en el área.

**Figura 21.**

*Esquema de ubicación de equipos tratamiento de aguas*



**Nota.** La figura presenta la ubicación y orden de los equipos de tratamiento del agua de producción desde el ingreso hasta la descarga. Elaboración propia.

**Figura 22.**

*Planta de tratamiento de aguas propuesta por Spenagroup*



**Nota.** La figura presenta un esquema tradicional de una planta de tratamiento de aguas cercana a una zona costera. Tomado de: SpenaGroup, planta de tratamiento de aguas residuales industriales. <https://spenagroup.com/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-industriales/>

## 6. RESULTADOS

El uso del agua de producción en ambientes agrícolas es una opción de vital importancia en zonas donde se presentan sequías o escases de agua. Por ello, su estudio e implementación permitirá mejorar los sistemas agrícolas y la relación entre la industria del petróleo y el sector agrícola. Es importante tener en cuenta que las aguas de producción de la industria petrolera requieren un tratamiento adecuado que permita la eliminación de los contaminantes y compuestos tóxicos para obtener los niveles o parámetros de calidad requeridas, y de esta manera poder reusar las aguas tratadas en la agricultura. Los compuestos adquiridos por el agua de producción deben ser identificados de manera que aquellas aguas que presenten un potencial mineralógico provechoso para los suelos puedan ser reusadas y así generar un beneficio en los cultivos y suelos.

La comparación entre los parámetros de los campos Colorado y la cuenca de los Llanos Orientales con los límites máximos permisibles tanto para disposición en cuerpos de agua como para el uso agrícola, evidencia que las condiciones del agua de la cuenca de los llanos orientales, se acerca en mayor medida con los estándares establecidos. es decir, con los límites que establecen las regulaciones legales, mientras que el agua del campo Colorado tiene una mayor cantidad de contaminantes, de componentes mayores y menores, con lo cual los parámetros se alejan de los límites máximos permisibles, lo que permite observar que necesitará un tratamiento más estricto que permita eliminar los contaminantes, y a nivel general, se evidencia que un tratamiento de agua óptimo dependerá del tipo de agua que se tenga y sus composición, de esta forma se pueden planear y diseñar sistemas de tratamiento que permitan eliminar los contaminantes y obtener una calidad adecuada del agua para el riego agrícola.

En cuanto a las propiedades químicas, el uso de esta agua aumenta el contenido de calcio, magnesio, potasio y sodio en el suelo, así como la capacidad de intercambio catiónico (CIC), dando un aporte mineralógico al suelo, para ello se debe realizar un tratamiento adecuado que permita establecer cuales componentes pueden generar beneficios al suelo, y por ende, a los sistemas agrícolas. Es menester realizar una medición y análisis adecuado de los parámetros del agua que estén enfocados en la regulación específica para riego agrícola, de modo que se pueda analizar el sistema de tratamiento que permita obtener una calidad de agua adecuada para el riego agrícola.

De igual forma, para futuras investigaciones, es necesario ampliar la información y las aplicaciones de esta alternativa en otros países donde se estén desarrollando adecuaciones para la implementación de este tipo de proyectos. De esta manera se dará una mejor aplicación en el sector petrolero referente al problema de las aguas de producción. Finalmente, analizando la panorámica del país actualmente referente al sector petrolero y con la puesta en marcha de los pilotos de investigación integral de no convencionales, es de vital importancia el análisis de las aguas de retorno (flowback) que para estos procesos involucran cantidades de agua bastante altas o significativas, de esta manera una de las alternativas a futuro para la disposición de estas aguas puede ser el riego de cultivos agrícolas lo cual beneficiaría a la industria y al sector agrícola.

## BIBLIOGRAFÍA

- Almansa, E., Velásquez-Penagos, J., & Rodríguez-Yzquierdo, G. (2018). Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias Effect of the use of production water of petroleum industry in agricultural and livestock activities. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 19(2), 403–420.
- Avila, I., & Moreno, M. (2016). *Diseño, propuesta e implementación de un filtro para tratamiento de aguas de uso domestico en tanques de reserva en la población del casco urbano de la inspección de San Antonio de Anampoima* (Universidad Libre; Vol. 18). Tomado de:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2009.07.006><http://dx.doi.org/10.1016/j.neps.2015.06.001><https://www.abebooks.com/Trease-Evans-Pharmacognosy-13th-Edition-William/14174467122/bd>
- Breuer, R., & Al-Asmi, S. R. (2010). Nimr water treatment project - Up scaling a reed bed trail to industrial scale produced water treatment. *Society of Petroleum Engineers - SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production 2010*, 1(Pdo 2007), 286–296. <https://doi.org/10.2523/126265-ms>
- Cisneros, O., & Saucedo, H. (2016). *Reúso de aguas residuales en la agricultura*. Retrieved from [www.gob.mx/imta](http://www.gob.mx/imta)
- Echchelh, A., Hess, T., & Sakrabani, R. (2018). Reusing oil and gas produced water for irrigation of food crops in drylands. *Agricultural Water Management*, 206(May), 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.006>
- Englande, A. J., Krenkel, P., & Shamas, J. (2015). Wastewater Treatment & Water Reclamation. *In Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09508-7>

Engle, M. A., Cozzarelli, I. M., & Smith, B. D. (2013). USGS Investigations of Water Produced During Hydrocarbon Reservoir Development. *USGS*, 21(8), 1803–1820.  
<https://doi.org/10.3133/fs20143104>

Forero, J., Ortiz, O., & Duque, J. (2007). *Design and application of flotation systems for the treatment of reinjected water in a Colombian petroleum field*. 3, 147–158.

Gregory, R. T. (2003). Stable Isotopes as Tracers of Global Cycles. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 695–714. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00723-7>

IDEAM. (1984). *Decreto 1594 de 1984*. [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM]. Por el cual se establecen los usos del agua y residuos líquidos.

Jaimes, D., & Pico, M. (2009). *Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras-aplicación Campo Colorado*. Universidad Industrial de Santander.

Kondash, A. J., Redmon, J. H., Lambertini, E., Feinstein, L., Weinthal, E., Cabrales, L., & Vengosh, A. (2020). The impact of using low-saline oilfield produced water for irrigation on water and soil quality in California. *Science of the Total Environment*, 733, 139392.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139392>

Lester, Y., Ferrer, I., Thurman, E. M., Sitterley, K. A., Korak, J. A., Aiken, G., & Linden, K. G. (2015). Characterization of hydraulic fracturing flowback water in Colorado: Implications for water treatment. *Science of the Total Environment*, 512–513, 637–644.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.043>

Merinsac. (n.d.). *Filtro Multimedia*. 3. Retrieved from  
[http://www.merinsa.com/pdf/industriales/equipos/FiltroMultimediaMerinsacSimple\\_Magnu m.pdf](http://www.merinsa.com/pdf/industriales/equipos/FiltroMultimediaMerinsacSimple_Magnu m.pdf)

- Mesa, S., Orjuela, J., Ortega, A., & Sandoval, J. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87–98. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.69792>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015. *Diario Oficial No. 49.486 de 18 de Abril de 2015*, 2015(49), 73. Tomado de: [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res\\_631\\_marz\\_2015.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf)
- Prada, Á. (2014). Estudio Experimental de la aglomeración de partículas de un lecho fluidizado. *Universidad Carlos III*.
- Purewater. (S.f.). Sistemas de desinfección de agua mediante luz ultravioleta. Agua desinfectante, agua potable, aguas residuales. <https://purewater.com.co/sistemas-de-desinfeccion-de-agua-mediante-luz-ultra-violeta/#:~:text=Los%20Purificadores%20de%20Agua%20por,purificadores%2C%20que%20contienen%20estas%20l%C3%A1mparas.>
- Rodríguez, C. (2007). Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM). [Archivo en pdf]. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb#:~:text=La%20Demanda%20Qu%C3%ADmica%20de%20Ox%C3%ADgeno,agente%20oxidante%2C%20temperatura%20y%20tiempo.&text=La%20materia%20org%C3%A1nica%20se%20calcula%20en%20t%C3%A9rminos%20de%20ox%C3%ADgeno%20equivalente.>
- Sánchez, J. (2013). *Tratamiento y disposición final del agua producida en yacimientos petroleros* (Universidad Nacional Autónoma de México). Tomado de: [http://www.geocities.com/alaro2001/espanyol/historia\\_cast.htm.4www.epec.com.ar/PaginaOficial2/docs/.../fichaguerra\\_ctes.pdf](http://www.geocities.com/alaro2001/espanyol/historia_cast.htm.4www.epec.com.ar/PaginaOficial2/docs/.../fichaguerra_ctes.pdf) <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream>



m/132.248.52.100/1439/1/tesis.pdf

Schlumberger. Yacimiento [Geología]. Oilfield Glossary en español.

<https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/r/reservoir>

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

Valdivielso, A. (S.f.). ¿Qué es la cloración de aguas residuales?. IAGUA. Tratamiento del agua.

<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-cloracion-aguas-residuales>

Wikipedia. (S.f.). Agricultura. Sector agrícola.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura#:~:text=Sector%20agr%C3%ADcola%20es%20el%20sector,materias%20primas%20de%20origen%20vegetal>

## GLOSARIO

**Agua de producción:** Es el agua contenida dentro de los poros de las rocas que se produce junto con los hidrocarburos en un pozo petrolero, y por ende, contiene ciertos componentes mineralógicos y salinos. (Gregory, 2003. p. 706)

**Cloración:** Es una técnica utilizada en el tratamiento de aguas con el fin de desinfectar el agua mediante la implementación de cloro. (Valdivielso, S.f.)

**Conductividad:** Es una propiedad que describe en que cantidad una sustancia puede transmitir la corriente eléctrica.

**Decreto 1594 de 1984:** Reglamenta los límites máximos permisibles de los parámetros del agua para su disposición final en cultivos agrícolas. (IDEAM, 1984)

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Mide la cantidad de oxígeno que usan los organismos biológicos, específicamente microorganismos, para poder estabilizar materia orgánica, en un tiempo de 5 días a condiciones de 20°C. (Jaimes & Pico, 2009. p. 27)

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Establece la cantidad de oxígeno que requiere una sustancia orgánica o inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte, para oxidarse. (Rodríguez, 2007. P. 2)

**Dureza total:** Es la suma de las durezas de los iones magnesio, calcio, estroncio y bario, cuando forman carbonatos o bicarbonatos.

**Filtros:** Son dispositivos que permiten el paso de ciertas partículas y sustancias y retienen otras de acuerdo con el tamaño de la partícula.

**Grasa:** Es uno de los componentes que presentan las aguas de producción en distinta medida que puede generar problemas en el transporte del agua y en la calidad del agua en general. (Teqma, S.f.)

**Minerales:** Sólidos inorgánicos que se presentan de forma natural en el ambiente y que poseen una composición química definida (formula química) y una estructura interna ordenada (sistema cristalino).

**Osmosis:** Es una técnica que permite eliminar elementos de tamaño muy pequeño presentes en el agua a partir de una membrana o semimembrana selectiva. (Lester et al., 2015. p. 642)

**Petróleo:** Es una mezcla compuesta de hidrocarburos simples y complejos, al igual que de otros elementos y compuestos, que se encuentra presente en el subsuelo en algunas rocas, y que puede presentar estado líquido, sólido o gaseoso.

**Resolución 631 de 2015:** Establece los parámetros y límites máximos permisibles para vertimientos de aguas a cuerpos de agua superficiales. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

**Salinidad:** Mide la cantidad de sales que se encuentran disueltas en el agua de producción, normalmente este parámetro tiene valores altos debido a la procedencia del agua.

**Sector agrícola:** Es el sector de la economía que se encarga de la producción de productos o materias primas de origen vegetal. (Wikipedia, S.f.)

**Sostenibilidad:** Se basa en asegurar lo que se necesita en el presente pero sin vulnerar lo que necesitarán las futuras generaciones.

**Yacimiento:** Es un cuerpo de roca en el subsuelo que presenta buenas propiedades de porosidad y permeabilidad y por lo tanto puede transmitir y almacenar fluidos. (Schlumberger, S.f.)