

**EFFECTOS ASOCIADOS A LAS OPERACIONES DE POZOS DE INYECCIÓN  
PARA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES SOBRE FUENTES HÍDRICAS  
SUBTERRÁNEAS**

**GUSTAVO ADOLFO CANOSA ÁLVAREZ  
CLARA MARCELA JAIMES BALCUCHO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2017**

**EFFECTOS ASOCIADOS A LAS OPERACIONES DE POZOS DE INYECCIÓN  
PARA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES SOBRE FUENTES HÍDRICAS  
SUBTERRÁNEAS**

**GUSTAVO ADOLFO CANOSA ÁLVAREZ  
CLARA MARCELA JAIMES BALCUCHO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para aspirar al título de  
Ingenieros de Petróleos**

**Director:  
Ing. ADOLFO POLO RODRIGUEZ  
Especialista en Química de Aguas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

*A Dios por darme la fuerza, tenacidad y perseverancia para poder cumplir con este objetivo y lograr este triunfo, que, sin duda alguna, es el más grande de mi vida.*

*A mis padres Claudio Canosa Campo y Dilia Álvarez Arévalo, por ser mi motor y mi ejemplo a seguir. Gracias por la paciencia, por la fe y por darme su apoyo incondicional en cada momento de mi vida.*

*A mis hermanas Andrea y Sara Sofía, por llenarme de amor, cariño y energía a lo largo de toda esta carrera.*

*A mi novia Silvia Juliana, por creer siempre en mí y en mis capacidades. Por estar siempre a mi lado, apoyándome, respaldándome y amándome.*

*A mi gran amigo, colega y hermano Alberto Contreras Ariza, gracias por todos estos años de amistad. Por su respaldo, su colaboración y sus consejos.*

*A todos los compañeros de la Escuela de Ingeniería de Petróleos que he hecho a lo largo de este trayecto; especialmente a Álvaro Ayala, Daniel Sanguino, Jesús Pacheco y Marlon Ríos, quienes se han convertido en grandes amigos y hermanos.*

*A mi compañera Clara por el tiempo y la dedicación.*

*Por último, a todos los que hicieron posible este proyecto.*

*Gustavo Canosa Álvarez.*

## DEDICATORIA

*Dedico este libro y logro a Dios por ser el que me ha dado fortaleza para continuar.*

*A mi esposo Juan David por estar junto a mí y apoyarme en todo momento y esfuerzo.*

*A mi hijo Juan Esteban por ser mi motor cada día.*

*A mis padres Cruz y Guillermo porque ellos fueron los patrocinadores número uno de este triunfo, y desde siempre han dado todo su esfuerzo para que llegue a cumplir con esta meta.*

*A toda mi familia, que estuvo junto a nosotros apoyándonos.*

*A todos mis compañeros y profesores con los que compartí este proceso, especialmente a mi compañero de tesis Gustavo por su esfuerzo.*

*Clara Marcela Jaimes Balcucho.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander por habernos formado de manera íntegra y honesta como personas y profesionales.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos por la constante ayuda y colaboración durante nuestra etapa universitaria.

A los todos los Profesores y compañeros por su contribución en este largo camino de formación.

A nuestro director de tesis el Ingeniero Adolfo Polo Rodríguez, por su apoyo y todos sus aportes en el desarrollo de este proyecto.

A nuestros amigos por toda la ayuda, atención y respaldo.

A todos y cada uno de ustedes, muchas gracias.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. FUNDAMENTO TEÓRICO .....	18
1.1 CONCEPTOS .....	18
1.1.1 Pozos de inyección .....	18
1.1.2 Acuíferos confinados .....	19
1.1.3 Agua de producción .....	20
1.1.4 Inyección.....	20
1.1.5 Reinyección. ....	20
1.1.6 Cluster.....	20
1.2 DEFINICIÓN POZOS DISPOSAL.....	20
1.3 GENERALIDADES .....	22
1.3.1 Condiciones para la inyección disposal .....	23
1.3.2 Criterios para la selección del sitio de la inyección disposal .....	23
1.4 ANTECEDENTES DE POZOS DE INYECCIÓN PARA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	24
2. AGUA DE PRODUCCIÓN .....	27
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN .....	32
2.2 NORMATIVIDAD COLOMBIANA PARA LA DISPOSICIÓN Y CONTROL DEL AGUA PRODUCIDA .....	32
2.2.1 Decreto 1594 de 1984.....	33
2.2.2 Decreto 3930 de 2010.....	33
2.2.3 Resolución 0631 de 2015 .....	34
2.3 VALORES LIMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA LOS COMPONENTES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DISPUESTA A INYECTAR.....	34

3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL PROCESO DE POZOS DE INYECCIÓN PARA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	40
3.1 METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	40
3.2 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS A SENSIBILIZAR .....	42
3.3 DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	42
3.3.1 Campo Rubiales .....	43
3.3.2 Campo Castilla.....	46
3.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LOS PARAMETROS Y CASOS MENCIONADOS.....	48
3.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	51
4. EFECTOS E IMPACTOS ASOCIADOS A LAS OPERACIONES DE POZOS DISPOSAL SOBRE FUENTES HÍDRICAS SUBTERRÁNEAS.....	52
4.1 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN.....	52
4.2 DAÑOS ASOCIADOS A LA TÉCNICA DE POZOS DISPOSAL SOBRE ACUÍFEROS POTENCIALMENTE APROVECHABLES.....	54
4.2.1 Contacto entre fluidos en el subsuelo .....	54
4.2.2 Alteración de la formación receptora .....	58
4.3 OTROS TIPOS DE IMPACTOS VINCULADOS A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE POZOS DISPOSAL .....	59
4.3.1 Calidad del agua de producción.....	59
4.3.2 Actividades sísmicas.....	60
4.4 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES EN LOS CAMPOS ESTUDIO.....	64
4.4.1 Daños asociados a las operaciones de inyección de agua en Campo Rubiales.....	64
4.4.2 Daños asociados al manejo y distribución del agua de producción en Campo Castilla.....	61
4.5 PLAN DE CIERRE TÉCNICO Y ABANDONO CON RESPECTO A POZOS INYECTORES.....	69

4.5.1 Plan de desmantelamiento y abandono.....	70
5. CONCLUSIONES .....	72
6. RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Clasificación de acuíferos .....	19
Figura 2. Esquema de un proceso de inyección disposal. ....	22
Figura 3. Ubicación de Pozos Disposal en Oklahoma, Estados Unidos. ....	26
Figura 4. Perfil típico de producción de un campo petrolero. ....	27
Figura 5. Relación de producción Agua-Petróleo en Colombia.....	28
Figura 6. Destino del Agua de Producción en Colombia.....	31
Figura 7. Puntos de Disposición de Agua de Inyección (PADS) en Campo Rubiales. ....	44
Figura 8. Influencia sobre la técnica analizada del parámetro: Tipo de Roca. ....	49
Figura 9. Influencia sobre la técnica analizada del parámetro: Presión de Inyección.....	50
Figura 10. Influencia sobre la técnica analizada del parámetro: Tipo de Roca. ....	50
Figura 11. Contaminación de acuífero de agua fresca por filtración de fluidos inyectados debido al fracturamiento de la formación receptora. ....	56
Figura 12. Inyección masiva de agua en la formación Arbuckle, Oklahoma. ....	63
Figura 13. Actividades Sísmicas presentadas en el municipio de Puerto Gaitán, Meta; área de ubicación del Campo Rubiales. ....	65
Figura 14. Línea de vertimiento del Agua Residual del Campo Castilla al Rio Guayuriba. ....	68

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Manejo del Agua de Producción en Colombia. ....	30
Tabla 2. Parámetros y valores máximos permisibles para el agua de inyección. ...	35
Tabla 3. Cortes de Agua en diversos Campos Petroleros de Colombia. ....	41
Tabla 4. Características Campo Rubiales.....	45
Tabla 5. Características Campo Castilla.....	47
Tabla 6. Identificación de daños, parámetros y consecuencias ambientales.....	53

## RESUMEN

**TÍTULO:** EFECTOS ASOCIADOS A LAS OPERACIONES DE POZOS DE INYECCIÓN PARA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES SOBRE FUENTES HÍDRICAS SUBTERRÁNEAS\*

**AUTORES:** GUSTAVO CANOSA ÁLVAREZ\*\*  
CLARA JAIMES BALCUCHO

**PALABRAS CLAVE:** Pozos de Inyección, Pozos Disposal, Acuíferos Confinados, Formación Receptora, Agua de Producción, Inyección Disposal, Reinyección.

### DESCRIPCIÓN:

Con el desarrollo de este proyecto se propone realizar un análisis de los efectos asociados al método de Pozos Disposal con acuíferos de agua fresca y evaluar los posibles daños que se pueden originar a la formación productora y zonas de interés ocasionados por la aplicación de dicha técnica. En primera instancia, se detalla el soporte teórico del procedimiento, así como también algunos de los antecedentes más representativos en la industria.

Posteriormente, con base en la bibliografía consultada en el presente trabajo, se elabora un estudio de un proceso de reinyección de agua de producción por medio de Pozos Disposal, teniendo en cuenta las características fisicoquímicas que este fluido debe tener antes de ser reinyectado en acuíferos confinados; definiendo de esta manera los parámetros fundamentales que deben ser aplicados al momento de diseñar dicho procedimiento. Ya fijados los parámetros, se estudian los tipos de yacimientos candidatos a la aplicación de inyección disposal y se establecen las características del área donde se puede emplear este método.

Una vez aplicada la metodología, los estudios son revisados y analizados mediante un análisis de sensibilidad realizado a los principales parámetros y características de las formaciones donde se han desarrollado reinyección de agua por Pozos Disposal; determinando su influencia en el proceso e identificando cual es el escenario sobre el que se hace más eficiente la utilización de la técnica y así desarrollar medidas de prevención para evitar la migración de los fluidos de inyección disposal a fuentes hídricas subterráneas potencialmente aprovechables.

---

\* Tesis de Pregrado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Adolfo Polo Rodríguez

## ABSTRACT

**TITLE:** ASSOCIATED EFFECTS TO RESIDUAL WATER INJECTION WELLS OPERATIONS OVER SUBSURFACE WATER SOURCES\*

**AUTHORS:** GUSTAVO CANOSA ÁLVAREZ\*\*  
CLARA JAIMES BALCUCHO

**KEYWORDS:** Injection Wells, Disposal Wells, Confined Aquifers, Receiving Formation, Production Water, Disposal Injection, Reinjection.

### **DESCRIPTION:**

This project proposes to make an analysis of the associated effects related to the Disposal Wells method and evaluates its possible damages over near production formations and zones of interest. First, it is described the theoretical support of the procedure and some of the most representative background in the industry.

Based in the bibliography consulted, a profound study of a production water reinjection process involving Disposal Wells is performed, taking into count the physical and chemical characteristics that the fluid should have before being reinjected in a confined aquifer, and defining the most relevant parameters that need to be considered during the designing process of this procedure. Once these aspects are defined, the types of candidate reservoirs and their characteristic are reviewed to determine the feasibility of implementing a disposal injection process.

Finally, a sensibility analysis is performed to review and analyse the data obtained in the study regarding the characteristics and conditions of the reservoirs where residual water had been reinjected by disposal wells, determining the influence of these parameters and identifying the best scenario where this technique obtains the most efficient results. In this way, it is possible to develop and suggest different prevention measures to avoid the migration of injected fluids to zones where potentially usable subsurface water sources could be found.

---

\* Dissertation – Undergraduate Thesis.

\*\* Faculty of Physic - Chemical Engineering. Petroleum Engineering School. Director: Ing. Adolfo Polo Rodríguez

## INTRODUCCIÓN

Día a día dentro de la industria del petróleo se puede observar, en los diferentes pozos productores, retos que en la mayoría de los casos vienen asociados a la producción de agua, en donde la gerencia y el control de la producción de este fluido constituye un importante desafío para los ingenieros de campo, ya que esto es un factor limitante que controla la vida productiva y útil de un yacimiento, razón más que suficiente para entender los gigantescos esfuerzos humanos y económicos que ha dedicado la industria en materia de tratamiento y manejos de aguas en las últimas décadas.

Pabel Lema<sup>1</sup> define el agua de producción como el fluido asociado a la producción de hidrocarburos, la cual, debe ser separada por procesos de deshidratación y tratada de manera adecuada según sea su disposición final. Para tratar el corte de agua cuando es excesivo y costoso, se emplea una de las técnicas más usadas que hace parte de los procesos de reinyección como lo son los pozos de inyección para disposición de aguas residuales o también llamados Pozos Disposal, cuyo fin es el almacenamiento de dicho fluido.

La primera operación conocida de inyección de agua fue efectuada en 1865 en el área de Pithole City al oeste de Pennsylvania, Estados Unidos<sup>2</sup>. Actualmente, en Colombia, un ejemplo importante de inyección disposal se encuentra en el campo *Castilla* ubicado en el departamento del Meta, el cual reinyecta un promedio de 60.000 barriles de agua por día (BWPD) a un acuífero confinado ubicado a 8.000 pies (ft) de profundidad. Con la aplicación de este método se busca evitar impactos en aguas superficiales siendo ésta una solución favorable para el medio ambiente<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Pabel Imar Lema Copa, Pozos Disposal, 2012

<sup>2</sup> Ecopetrol & Nalco (an Ecolab Company). Disposición de agua de producción mediante la reinyección a pozos disposal [Video]. Colombia: a Lapix, 2014. 3 min 17 seg

<sup>3</sup> *Ibíd.*, seg. 54

Conseguir que un proceso de reinyección de agua por medio de la técnica de pozos disposal sea exitoso constituye un reto para los profesionales del petróleo, desde las condiciones fundamentales para la inyección hasta los criterios para la selección del sitio. Entre las razones que dificultan conseguir esta meta se encuentran el volumen de fluido bombeado que causa problemas de separación, tratamiento y disposición de agua en superficie, además de la disminución en la producción de crudo y otros efectos tales como corrosión, formación de escamas y energía del yacimiento.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende evaluar la efectividad de un proyecto de reinyección de agua por medio del método de pozos disposal, a través de un estudio de los principales parámetros que inciden en el desarrollo de la técnica, presentando un caso exitoso que represente las características de un yacimiento al cual se le pueda considerar como favorable a practicar la inyección disposal y así exponer diferentes medidas de prevención para evitar el contacto de los fluidos reinyectados con acuíferos de agua fresca.

## 1. FUNDAMENTO TEÓRICO

El agua asociada a la producción de petróleo en los distintos yacimientos de la industria, luego de ser separada por los diferentes métodos de deshidratación, se debe tratar de una manera adecuada según sea su disposición final. Para esto, se emplea la técnica de Pozos Disposal, la cual tiene como objetivo principal almacenar el agua de producción en un acuífero o formación subterránea aislada, permitiendo su almacenamiento final de modo favorable para con el medio ambiente; siendo así, una solución a problemas relacionados con la distribución del líquido debido a su alta producción<sup>4</sup>.

La mayoría de empresas operadoras que deciden implementar la técnica de Pozos Disposal como método de reinyección del agua de formación para su distribución, emplean Pozos que han dejado de ser económicamente viables y productivos, los cuales son reacondicionados para dicho fin; de igual manera, usan otros que fueron abandonados por sufrir algún tipo de daño mecánico o perforan pozos nuevos en las distintas formaciones del yacimiento<sup>5</sup>.

### 1.1 CONCEPTOS

**1.1.1 Pozos de inyección.** Se define como un hoyo profundo que se hace en la tierra, en el que se inyectan fluidos en vez de producirse. Uno de sus objetivos es mantener la presión del yacimiento y los principales fluidos inyectados son gas y agua. El gas inyectado puede provenir de un pozo, pozos cercanos o ser importado.

---

<sup>4</sup> Ecopetrol & Nalco (an Ecolab Company). Disposición de agua de producción mediante la reinyección a pozos disposal [Video]. Colombia: a Lapix, 2014. 3 min 17 seg. Seg. 19 – 44

<sup>5</sup> *Ibíd.*, Min. 1:07 – 1:24

Los pozos de inyección de agua son comunes en las áreas marinas donde el agua, filtrada y tratada, es inyectada en una sección acuífera inferior del yacimiento.

**1.1.2 Acuíferos confinados.** Los acuíferos confinados son formaciones geológicas situadas en medio de dos capas, una inferior que proporciona estabilidad y otra superior que tiene el efecto de sobrecarga o confinamiento, la cual comprime tanto a los materiales sólidos como al agua presente en la formación. El agua que contienen estos tipos de acuíferos está sometida a cierta presión superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros de la formación geológica, saturándola totalmente. Los acuíferos confinados se encuentran sellados por materiales impermeables que no permiten que el agua ascienda hasta igualar su presión con la atmosférica.<sup>6</sup>

**Figura 1. Clasificación de acuíferos**



Fuente: "Acuíferos Confinados - Definición", La Comunidad Petrolera, 2010.

<sup>6</sup> Acuíferos Confinados – Definición. En: Revista Virtual La Comunidad Petrolera [online]. [Citado 30, Marzo, 2010]. Disponible en: <<https://www.lacomunidadpetrolera.com/diccionario/>>

**1.1.3 Agua de producción.** Es la fase líquida acuosa que se genera en un pozo productor de hidrocarburos junto con las fases de petróleo y/o gases durante las operaciones normales de producción. Esto incluye al agua de origen natural, agua con depósitos o presencia de hidrocarburos y agua inyectada en el suelo.

**1.1.4 Inyección.** Acción que consiste en introducir un líquido o un gas a presión en el interior de un pozo.

**1.1.5 Reinyección.** La reinyección es la acción de inyectar un fluido de producción a un pozo nuevamente, con el fin de mantener la presión del yacimiento. El agua de producción se reinyecta en otros pozos que no tengan contacto con aguas subterráneas para minimizar costos de tratamiento y disposición de la misma.

**1.1.6 Clúster.** Grupo de puntos de datos que tienen características similares.<sup>7</sup>

## **1.2 DEFINICIÓN POZOS DISPOSAL**

Los pozos de inyección para disposición de aguas residuales o Pozos Disposal, se crearon con el fin de tratar, gestionar y almacenar de una manera adecuada el agua producida en yacimientos de petróleo, así como también controlar los problemas asociados a la cantidad de dicho líquido extraído y con el propósito de garantizar una reducción de los costos de tratamiento y separación de fluidos, un aumento en la producción de hidrocarburos, ayudar a solventar la problemática que se tiene con el incremento de algunos componentes fisicoquímicos los cuales están presentes en dicho fluido y una manera de evitar impactos en las aguas superficiales y buscar

---

<sup>7</sup> Oilfield Glossary, Schlumberger. Cluster – Definition. En: Diccionario Virtual Schlumberger [online]. Disponible en: <<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/c/cluster.aspx>>

una solución favorable para con el medio ambiente; objetivo que debe ser claro y conciso para un ingeniero de petróleos.

Actualmente se realiza la inyección del agua de producción a una formación subterránea, profunda (mayor a 2000 ft), diferente y aislada de la formación productora. Los pozos disposal se pueden considerar como una de las estrategias de manejo y disposición del agua producida en yacimientos que originan hidrocarburos. Éstos tienen la función de garantizar que el fluido inyectado no entre en contacto con otras zonas de interés como acuíferos someros o confinados y de igual manera asegurar la integridad de los pozos inyectoros controlando y monitoreando la calidad del agua inyectada<sup>8</sup>.

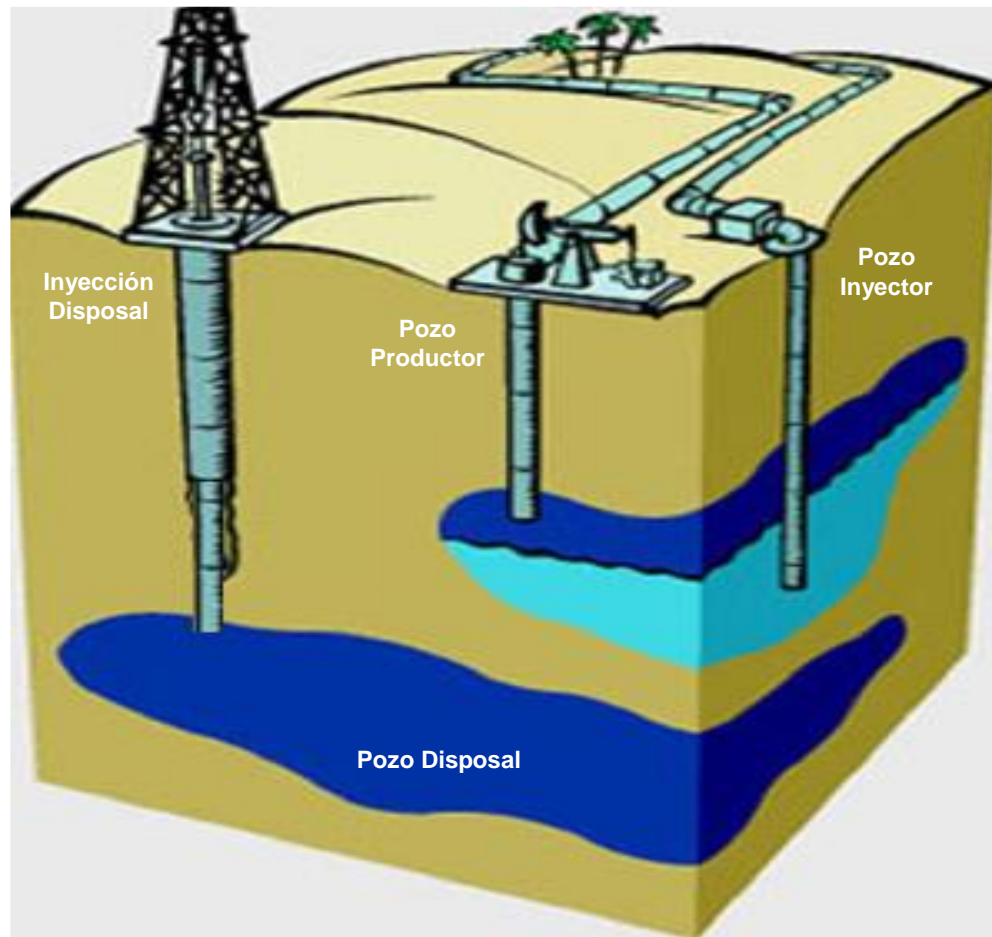
En la mayoría de los casos, el agua producida se inyecta en estas formaciones almacenadoras como procedimiento de disposición final, descartando la reutilización del fluido en métodos de recobro secundario o un reúso en superficie.

Es importante mencionar que se debe evitar el contacto de los fluidos de inyección con acuíferos de agua fresca cercanos a estos pozos y que se utilizan o son potencialmente aprovechables para consumo humano. Antes de realizar este procedimiento, se adelantan tratamientos de acuerdo con las normas establecidas para cada país y luego sí se procede a la reinyección o inyección del agua producida.

---

<sup>8</sup> NIÑO FLÓREZ, Fredy; GÓMEZ, Jaime. Colombia: “Taller de Inyección de pozos – Generalidades sobre pozos Disposal”, Ecopetrol & Nalco (an Ecolab Company), 2014

**Figura 2. Esquema de un proceso de inyección disposal.**



Fuente: Modificado de “Taller de Inyección de pozos – Generalidades sobre pozos Disposal”, Ecopetrol & Nalco (an Ecolab Company), 2014.

### **1.3 GENERALIDADES**

Dentro de un proceso de reinyección de agua de formación por medio del sistema de pozos disposal existen ciertas generalidades, las cuales comprenden el óptimo desarrollo de este procedimiento al momento de realizarse por parte de las empresas operadoras interesadas en poner en práctica el método. Con el propósito

de dar a conocer dichas generalidades, se mencionan a continuación las principales sin profundizar mucho en cada una de ellas:

### **1.3.1 Condiciones para la inyección disposal**

- Es importante asegurar que el agua a inyectarse en un pozo disposal, no puede ser utilizada en métodos de recobro mejorado ni reúso en superficie después de disponerse en el mismo.
- Se debe garantizar que la formación disponible para realizar un pozo de inyección para la disposición de aguas residuales, esté aislada de alguna fuente hídrica subterránea; esto con el objetivo de evitar la contaminación de las mismas, las cuales pueden ser aprovechadas en ciertas condiciones para el consumo humano, usos beneficiosos e industriales.
- La clave para mantener un buen resultado al emplear o hacer uso de esta técnica es proteger la integridad de los pozos inyectoros, controlando y monitoreando la calidad del agua inyectada.

**1.3.2 Criterios para la selección del sitio de la inyección disposal.** Después de dar a conocer las condiciones para realizar la inyección disposal y poder emplear el método de pozos de disposición de aguas, se debe tener en cuenta un factor fundamental, la selección del sitio y/o formación donde se llevará a cabo el procedimiento. Por esto es de suma importancia saber criterios como la geología del pozo, de la zona y de la región donde se planea crear el pozo con el fin de asegurar que es apto para realizar dicho proceso y así tener un mejor acondicionamiento, control y conocimiento del pozo disposal con respecto a la formación receptora que lo alberga. Otros criterios importantes son:

- Uniformidad del yacimiento.
- Suficiente extensión horizontal.
- Espesor adecuado.
- Profundidad suficiente.
- Alta porosidad y permeabilidad.
- Baja presión de inyección.
- Aislamiento de acuíferos de agua fresca.
- Aislamiento de pozos vecinos.
- Compatibilidad entre el fluido inyectado y la zona receptora.
- Acuíferos de agua preferiblemente salada.

#### **1.4 ANTECEDENTES DE POZOS DE INYECCIÓN PARA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

El uso generalizado de pozos de inyección comenzó en la década de 1930 con el propósito de eliminar el agua salada generada durante la producción de petróleo y gas (EPA, 2016). Retos vinculados a grandes porcentajes de agua producida en los diferentes yacimientos de hidrocarburos, llevaron a la seguida implementación de esta técnica. Actualmente se conoce con el nombre de pozos disposal, al procedimiento que se aplica como método de disposición final para el agua de producción inyectada en distintas formaciones.

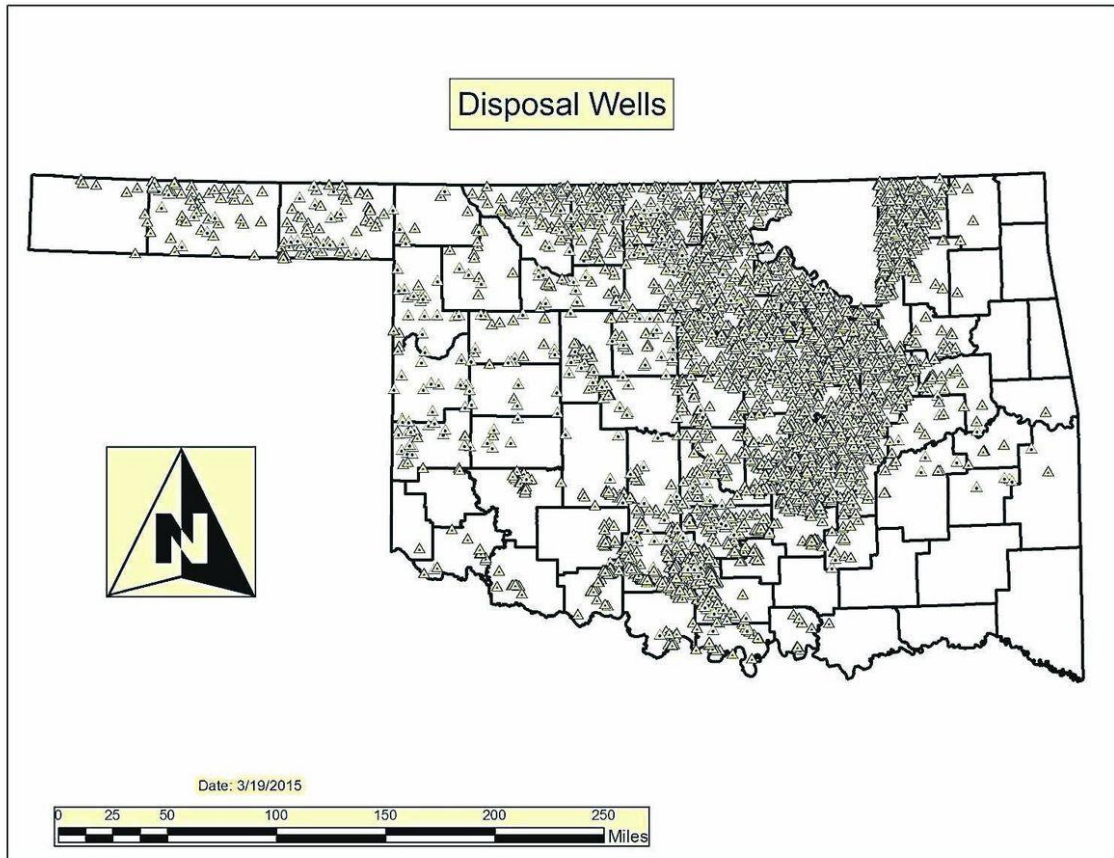
En Estados Unidos, más de 2 mil millones de galones de agua producida se inyectan todos los días en formaciones receptoras por medio de este proceso. El líquido que es inyectado a los pozos, se encuentra bajo la regulación de la Ley de *Agua Potable Segura* o *Safe Drinking Water Act (SDWA)*. Estos pozos están clasificados como Pozos Clase II por la *Agencia de Protección Ambiental* o

*Environmental Protection Agency (EPA)*, junto con aquellos utilizados para el recobro mejorado de petróleo y el almacenamiento de hidrocarburos (EPA, 2016).

Aproximadamente 180.000 pozos inyectoros se encuentran en operación en el país norteamericano, de los cuales 36.000 son considerados como disposal, en otros términos, un 20% del total de Pozos Clase II. La mayoría de estos pozos de inyección para disposición de aguas residuales, se encuentran ubicados en estados como Oklahoma (que posee cerca de 4.500), Texas, Kansas, California, entre otros. (EPA, 2016) (Ver **Figura 3**).

En Colombia, la normatividad ambiental que tiene el propósito de controlar y regular la disposición del agua proveniente de la explotación de hidrocarburos, se rige por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Esta entidad cumple con el objetivo de establecer normas, parámetros y licencias para aprobar el almacenamiento del líquido en pozos receptores ubicados en las distintas formaciones del país. Los Campos Rubiales y Castilla, situados en el departamento del Meta, son dos grandes pioneros y ejemplos de la utilización de pozos disposal como mecanismo de disposición final, debido al elevado corte de agua que presentan sus producciones.

**Figura 3. Ubicación de Pozos Disposal en Oklahoma, Estados Unidos.**

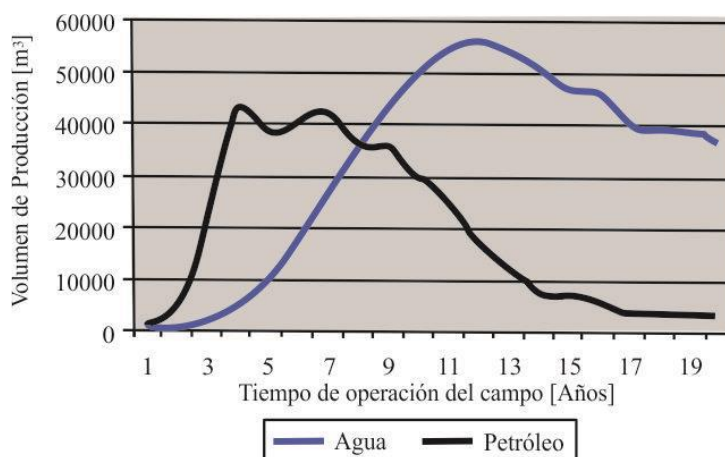


Fuente: Oklahoma Corporation Commission, 2015.

## 2. AGUA DE PRODUCCIÓN

La producción de petróleo en grandes volúmenes, conlleva a obtener altas cantidades de residuos, entre ellos el agua de producción; la cual representa más del 80% de los residuos líquidos en un campo y un 95% en los campos maduros. La producción mundial promedio de petróleo en el año 2014 alcanzó una cifra aproximada de 80 millones de barriles por día (BPD) y unos 315 millones de barriles por día de agua (BWPD)<sup>9</sup>. Con respecto a estas cifras, se producen de 3 a 5 barriles de agua por cada barril de petróleo, pero en algunos yacimientos considerados maduros esta cantidad puede llegar a ser de 10 a 14 barriles de agua por barril de petróleo<sup>10</sup>. La cantidad de agua producida aumenta con la madurez de los campos petroleros (Ver **Figura 4**).

**Figura 4. Perfil típico de producción de un campo petrolero.**



Fuente: Traducido de Igunnu y Chen (2012).

<sup>9</sup> A. Fakhru'l-Razi et al., "Review of technologies for oil and gas produced water treatment," Elsevier, vol. 170, n° 2-3, pp. 530-551, 2009

<sup>10</sup> IFP Energies Nouvelles. "Water in fuel production Oil production and refining," [En línea], Disponible: [http://www.ifpenergiesnouvelles.com/index.php/content/download/70601/1513892/version/2/file/Panorama2011\\_11-VA\\_Eau-Production-Carburants.pdf](http://www.ifpenergiesnouvelles.com/index.php/content/download/70601/1513892/version/2/file/Panorama2011_11-VA_Eau-Production-Carburants.pdf), 2011

En el año 2015, la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP) publicó un Informe de Desempeño Ambiental, en el cual se compararon los volúmenes de aguas de producción generados por cada barril de crudo producido en Colombia y se obtuvo un indicador de 1,91 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de agua, lo que equivale, en otras unidades, a que por cada barril de crudo se generaron 12,02 barriles de estas aguas<sup>11</sup>. El 56,3 % de la cantidad de agua producida fue destinada a métodos de inyección para disposición final<sup>12</sup>, generando así la necesidad de incrementar el número de pozos disposal con el objetivo de almacenar dicho porcentaje de agua de producción en el país.

**Figura 5. Relación de producción Agua-Petróleo en Colombia.**



Fuente: Asociación Colombiana del Petróleo, Informe de Desempeño Ambiental, 2015.

Las aguas de producción pueden manejarse de distintas maneras para su correcta disposición. Después de obtener los debidos permisos y adquirir la respectiva licencia ambiental de los proyectos, las opciones a aplicar incluyen; reinyección para mantener la presión del yacimiento y como método de recobro mejorado, o, reinyección para disposición final de dichas aguas en una formación distinta a la original, que debe tener las propiedades de almacenamiento y confinación evaluadas y autorizadas; éste último procedimiento es conocido como pozos

<sup>11</sup> Asociación Colombiana del Petróleo (ACP). Colombia: Informe de Desempeño Ambiental, 2015. p. 25

<sup>12</sup> *Ibíd.*, p. 21.

disposal y, como es mencionado anteriormente, es aquel que representa el mayor porcentaje de aplicación en Colombia. (Ver **Tabla 1**)

**Tabla 1. Manejo del Agua de Producción en Colombia.**

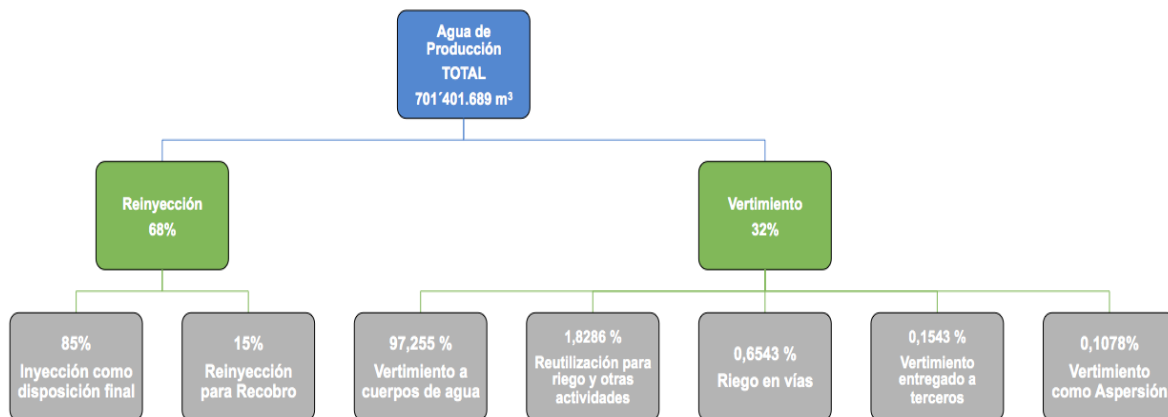
AGUAS DE PRODUCCIÓN						
Indicador	Unidad	Valor	%	Volumen Total (m3)	Volumen Total (bbl)	Aguas de producción
Reinyección para recobro mejorado	m <sup>3</sup> de agua inyectada/m <sup>3</sup> de agua de producción	0,102	10,2	71.542.972,28	449.991.743,23	701.401.689 m <sup>3</sup>  4.411'683.757,13 bbl
Inyección como disposición final	m <sup>3</sup> de agua reinyectada/m <sup>3</sup> de agua de producción	0,563	56,3	394.889.150,91	2.483.777.955,28	
Vertimientos a cuerpos de agua	m <sup>3</sup> de agua vertida/m <sup>3</sup> de agua de producción	0,305	30,5	213.927.515,15	1.345.563.545,95	
Riego en vías	m <sup>3</sup> de agua vertida/m <sup>3</sup> de agua de producción	0,002	0,2	1.442.803,83	9.074.962,78	
Aspersión	m <sup>3</sup> de agua vertida/m <sup>3</sup> de agua de producción	0,00034	0,034	238.476,57	1.499.972,45	
Vertimiento entregado a terceros	m <sup>3</sup> de agua vertida/m <sup>3</sup> de agua de producción	0,00048	0,048	336.672,81	2.117.608,19	
Vertimiento reutilizado para riego y otras actividades	m <sup>3</sup> de agua vertida/m <sup>3</sup> de agua de producción	0,0057	0,57	3.997.989,63	25.146.597,43	

Fuente: Modificado de “Informe de Desempeño Ambiental”, Asociación Colombiana del Petróleo, 2015.

Es importante mencionar que antes de realizar los procesos de reinyección estas aguas son sometidas a tratamientos que garantizan la remoción de sustancias no compatibles con las características de la formación hasta alcanzar los niveles establecidos por la autoridad<sup>13</sup>.

Por otra parte, un porcentaje considerable de las aguas de producción se descarga de manera controlada en cuerpos de agua superficial mediante procedimientos autorizados por la autoridad ambiental y acordes con lo establecido en las normas vigentes del país. Una cantidad de éste líquido producido también se dispone para el riego de vías o aspersión en suelos, mientras que otra se les entrega a terceros legalizados para que la aprovechen; también hay un porcentaje que se reutiliza en el riego de campos y cultivos<sup>14</sup>. (Ver **Gráfica 1**)

**Figura 6. Destino del Agua de Producción en Colombia.**



Datos: Asociación Colombiana del Petróleo, 2015.

<sup>13</sup> Asociación Colombiana del Petróleo (ACP). Colombia: Informe de Desempeño Ambiental, 2015. p. 25

<sup>14</sup> *Ibíd.*, p. 25.

## **2.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN**

El agua de producción presenta una composición compleja, donde sus constituyentes pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos. Generalmente, los componentes presentes en el agua producida son: aceite disuelto y disperso, metales pesados, químicos de tratamiento, gases disueltos, materiales radiactivos, sólidos producidos y minerales disueltos<sup>15</sup>. Antes de realizar un proceso de reinyección o inyección de agua de producción en pozos disposal, se debe cumplir con ciertos límites de cantidad o concentración en cuanto a los componentes fisicoquímicos mencionados anteriormente.

Los criterios relacionados a la calidad del agua producida se deben establecer teniendo en cuenta la estrategia de manejo a la cual será aplicada. La disposición de las aguas de producción por medio de la inyección disposal no debe representar una amenaza para el equilibrio natural entre los acuíferos asociados al yacimiento; por este motivo es necesario reducir el ensuciamiento y la cantidad de bacterias presentes en el líquido para evitar daños en la formación receptora.

## **2.2 NORMATIVIDAD COLOMBIANA PARA LA DISPOSICIÓN Y CONTROL DEL AGUA PRODUCIDA**

En Colombia, la normatividad ambiental que tiene el objetivo de controlar, manejar y regular el uso y disposición del agua proveniente de la exploración o explotación de hidrocarburos con sus respectivos criterios y límites en concentraciones para los

---

<sup>15</sup> MORALES RINCÓN, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Desempeño técnico y ambiental de las tecnologías convencionales y modernas de tratamiento de agua producida. Tesis de pregrado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. 2016. p. 20

compuestos presentes en el líquido, se rige por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

A través de los años, la legislación presentada por el MADS ha evolucionado con el fin de establecer parámetros que presenten una mejor calidad y condición del agua de producción al momento de su disposición, así como también para el manejo progresivo y productivo de la misma. Sumando a lo dicho anteriormente el cuidado al medio ambiente y la protección a la fauna del país, se ha desarrollado la siguiente normatividad ambiental:

**2.2.1 Decreto 1594 de 1984.** El Decreto 1594 del año 1984 identificó los límites máximos permisibles de las sustancias de interés sanitario y los criterios de calidad del agua con respecto a su uso. Prohibió todo vertimiento de residuos líquidos a las calles, calzadas, canales o sistemas de alcantarillado y su inyección a los acuíferos. Sin embargo, en su *Artículo 72*, estableció que se permite la reinyección del agua proveniente de la exploración o explotación, siempre y cuando no impida el uso potencial de un acuífero. Algunos parámetros que debía cumplir un vertimiento a cuerpos de agua según el *Artículo 72* del Decreto son: pH de 5 a 9, temperatura menor a 40 °C, remoción de grasas y aceites mayor al 80% en carga. Dependiendo del tipo de usuario (existente o nuevo) la remoción de sólidos suspendidos debía ser mayor al 50% u 80% y la de DBO mayor al 20% u 80% en carga. Fijó un mecanismo de control en kg/día y no en mg/L<sup>16</sup>.

**2.2.2 Decreto 3930 de 2010.** El Decreto 3930 del año 2010 derogó el Decreto 1594 de 1984 corrigiendo algunas falencias en cuanto a la conservación de la calidad de los cuerpos de agua y el control de los vertimientos puntuales y no puntuales. Sin embargo, siguieron transitoriamente vigentes los artículos que establecían los valores límites de contaminantes. Este decreto responsabilizó al MADS de fijar

---

<sup>16</sup> *Ibíd.* p. 41-42

mediante una resolución los usos del agua y sus criterios de calidad para cada uso, los límites para vertimiento a los cuerpos de agua, aguas marinas, alcantarillados públicos y al suelo y el Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos en Aguas Superficiales y Subterráneas. Obedeciendo a lo anterior, se creó la resolución 0631 de 2015<sup>17</sup>.

**2.2.3 Resolución 0631 de 2015.** La Norma de Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Agua Superficiales y a los Sistemas de Alcantarillado está vigente desde el 1 de enero de 2016 y es más rigurosa que todas las anteriores. Para su estructuración se observaron como referencia indicadores internacionales e información enviada tanto por cada sector como por las autoridades ambientales que realizan el seguimiento (MADS, 2015b). Se estableció un régimen de transición de 2 años para las empresas con permiso vigente de vertimientos que cumplieran con el decreto 1594 y 1.5 años para aquellos que no estuviesen cumpliendo el decreto 1594. Si durante el primer año de vigencia de la nueva norma la empresa presenta Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias tiene 3 años adicionales<sup>18</sup>.

### **2.3 VALORES LIMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA LOS COMPONENTES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DISPUESTA A INYECTAR**

El tratamiento del agua producida será diferente con respecto al método de disposición seleccionado. Cuando el agua de producción va a ser inyectada o reinyectada a un acuífero que esté geológicamente aislado y que no vaya a cumplir alguna función secundaria, la calidad del agua a inyectar no debe ser demasiado alta y el único tratamiento requerido es la remoción de aceite<sup>19</sup>. Más, sin embargo,

---

<sup>17</sup> *Ibíd.*, p. 42.

<sup>18</sup> *Ibíd.*, p. 42-43

<sup>19</sup> D. Robinson, "Oil and gas: Treatment and discharge of produced waters offshore," [En línea], Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0015188213700740>, 2013

de acuerdo a los decretos, resoluciones, leyes y teoría mencionada anteriormente, se ha elaborado un estudio de los límites y valores máximos permitidos para los componentes presentes en el agua de producción que está dispuesta a inyectarse en pozos disposal; estos son: (Ver **Tabla 2**).

**Tabla 2. Parámetros y valores máximos permisibles para el agua de inyección.**

	Parámetro	Concentraciones Límites	Observaciones
Decreto 1594 del año 1984	pH	5 – 9	Un pH por debajo de 9 evita la tendencia a incrustaciones. <sup>a</sup>
	Temperatura	< 40 °C	
	Remoción de grasas y aceites	> 80%	Remoción de grasas y aceites mayor al 80% en carga. <sup>a</sup>
	Remoción de sólidos suspendidos	> 50% - > 80%	Dependiendo del tipo de usuario (existente o nuevo) la remoción de sólidos suspendidos debía ser mayor al 50% u 80%. <sup>a</sup>
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	> 20% - > 80%	La remoción de DBO debe ser mayor al 20% u 80% en carga. <sup>a</sup>

	Parámetro	Valores Máximos (mg/L)	Observaciones
<b>Resolución 0631 del año 2015</b>	<b>pH</b>	5 – 9	Un pH por debajo de 9 evita la tendencia a incrustaciones. <sup>a</sup>
	<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</b>	60 mg/L O <sub>2</sub>	
	<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	50	Evita el taponamiento de la formación receptora. <sup>b</sup>
	<b>Sólidos Sedimentables</b>	1	
	<b>Grasas y Aceites</b>	15	Previene la obstrucción de los filtros en la Superficie. Evita reducir la permeabilidad de la formación. <sup>b</sup>
	<b>Fenoles</b>	0,2	
	<b>Temperatura</b>	40 °C	
	<b>Hidrocarburos</b>		
	Hidrocarburos Totales	10	
	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	AR	AR: "Análisis y Reporte", MADS (2015b). <sup>c</sup>
	BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno)	AR	
	Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles	AR	
	<b>Compuestos de Fósforo</b>		
	Fósforo Total (P)	AR	
	Ortofósforos	AR	
	<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		
	Nitratos	AR	
	Nitrógeno Amoniacal	AR	
	Nitrógeno Total	10	
	<b>Iones</b>		
	Cianuro Total	1	Previene la formación de sales y compuestos insolubles que forman incrustaciones y
	Cloruros	1200	
Fluoruros	AR		

	<b>Parámetro</b>	<b>Valores Máximos (mg/L)</b>	<b>Observaciones</b>
	Sulfatos	300	obstrucciones en el sistema de inyección. <sup>b</sup>
	Sulfuros	1	
	<b>Metales y Metaloides</b>		
	Arsénico	0,1	Prevención de la corrosión de la tubería y evita la formación de precipitados. <sup>b</sup>
	Bario	AR	
	Cadmio	0,1	
	Cinc	3	
	Cobre	1	
	Cromo	0,5	
	Hierro	3	
	Mercurio	0,01	
	Níquel	0,5	
	Plata	AR	
	Plomo	0,2	
	Selenio	0,2	
	Vanadio	1	
	<b>Gases Disueltos</b>		
	CO <sub>2</sub>	10 ppm	Prevención de corrosión. <sup>b</sup>
	O <sub>2</sub>	1 ppm	
	<b>Minerales Disueltos</b>		
	Cloruros	250	Previene alta salinidad en el agua producida. <sup>b</sup>
	<b>H<sub>2</sub>S</b>	0	Prevención corrosión y "agriamiento" de la formación. <sup>b</sup>
	<b>Densidad</b>	-	Preferible que la densidad del fluido a inyectar sea superior a la del líquido de la formación, para que, de esta manera, exista mayor dispersión del mismo. <sup>b</sup>
	<b>Calidad del Agua</b>	0,99 Pendiente (Caudal vs Volumen)	Garantiza que no se excede la capacidad del acuífero. <sup>b</sup>

	Parámetro	Valores Máximos (mg/L)	Observaciones
	<b>Otros Parámetros para Análisis y Reporte</b>		
	Acidez Total	AR	mg/L CaCO <sub>3</sub> (Unidades)
	Alcalinidad Total	AR	mg/L CaCO <sub>3</sub> (Unidades)
	Dureza Cálctica	AR	mg/L CaCO <sub>3</sub> (Unidades)
	Dureza Total	AR	mg/L CaCO <sub>3</sub> (Unidades)
	Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	AR	m <sup>-1</sup> (Unidades)
<p><b>Nota:</b> Datos tomados de “Decreto 1594 del año 1984” &amp; “Resolución 0631 del año 2015”.</p> <p><sup>a</sup> Decreto 1594 del año 1984</p> <p><sup>b</sup> Fredy Omar Niño Flórez &amp; Jaime F. Gómez, Taller de pozos de inyección-Generalidades sobre Pozos Disposal, 2014.</p> <p><sup>c</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2015a). Minambiente presenta nueva Norma de Vertimientos que permitirá mejorar la calidad del agua del país. Recuperado de <a href="https://goo.gl/o0nQ1b">https://goo.gl/o0nQ1b</a>.</p> <p>AR = Análisis y Reporte.</p> <p>MORALES RINCÓN, María Camila. REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Desempeño técnico y ambiental de las tecnologías convencionales y modernas de tratamiento de agua producida. Tesis de pregrado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2016. 80 p.</p>			

Contrario al Decreto 1594 del año 1984, esta norma establece los límites en mg/L y no en kg/día, lo que permite un mayor control en los vertimientos y disposiciones del agua. Una de las principales falencias en el Decreto 0631 de 2015 es que muchos de los parámetros que se han identificado como altamente tóxicos para la salud humana y los ecosistemas no tienen establecida una concentración límite.

En su lugar aparece para “*Análisis y Reporte*”, expresión que según el MADS (2015b), tiene como objetivo generar una línea base para establecer en el futuro un límite máximo permisible.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> MORALES RINCÓN, REVELO NÚÑEZ, p. 41-42. Óp. Cit.

### **3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL PROCESO DE POZOS DE INYECCIÓN PARA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

El principal objetivo de la realización de un análisis de sensibilidad a los parámetros de yacimiento que hacen parte del diseño y desarrollo de un proceso de pozos disposal es identificar y proponer las características de un escenario favorable, las cuales están vinculadas con la efectividad y el comportamiento general de la técnica implementada, con el fin de evaluar de manera más profunda el funcionamiento de este tipo de proceso permitiendo mejorar su comprensión.

En cuanto a la inyección disposal, el análisis de sensibilidad toma gran importancia al momento de conocer el volumen de agua producida inyectada y las condiciones geológicas a las cuales se encuentra la formación del campo al que se le aplicará dicha técnica; esto con el fin de presentar un escenario favorable que permita obtener mejores resultados.

#### **3.1 METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se tiene en cuenta la información teórica investigada y obtenida de los dos casos más representativos y reales de pozos disposal ubicados en Colombia: Campo Rubiales y Campo Castilla. Con un elevado corte de agua en sus producciones (Ver **Tabla 3**), estos campos son ejemplos de la utilización del proceso de pozos de inyección para disposición de aguas residuales en sus distintas formaciones. Los criterios de comparación que se utilizarán para el desarrollo del análisis serán la geología, que comprende de tipo de roca, formaciones, fallas y presencia de acuíferos; propiedades del yacimiento

tales como permeabilidad, porosidad y profundidad; y por último, el volumen de agua producida inyectada en los pozos disposal correspondientes a los campos mencionados anteriormente. Con esta información, se busca establecer y determinar un caso favorable para la aplicación de dicho proceso.

**Tabla 3. Cortes de Agua en diversos Campos Petroleros de Colombia.**

Campo	Producción de Crudo (BPD)	Corte de Agua (%)
Caño-Limón	21.463 <sup>a</sup>	99% <sup>b</sup>
Casabe	13.127 <sup>a</sup>	87% <sup>c</sup>
Castilla	71.216 <sup>a</sup>	83% <sup>d</sup>
Chichimene	50.849 <sup>a</sup>	40% <sup>e</sup>
Cira-Infantas	38.077 <sup>a</sup>	94% <sup>f</sup>
Cusiana	2.098 <sup>a</sup>	75% <sup>g</sup>
Rubiales	113.931 <sup>a</sup>	80% <sup>h</sup>

<sup>a</sup> Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). Colombia: Producción Fiscalizada de Crudo, Junio 2017.

<sup>b</sup> DEL PINO, J. MARTIN J.L. VARGAS, H. Occidental de Colombia. Electric Submersibles Pumps (ESP) Performance Improvement by Implementation of Extreme Performance Motor Technology in Caño Limon Field. En: Society of Petroleum Engineers (SPE). 27-28 May 2015. p. 1.

<sup>c</sup> AMAYA, Mauro. AMAYA, Raúl. CASTAÑO, Héctor. LOZANO, Eduardo. RUEDA, Carlos Fernando. Ecopetrol S.A. Casabe: Revitalización de un campo maduro. En: Schlumberger. Primavera de 2010.

<sup>d</sup> MERCADO, Orlando. ECOPETROL. & VELEZ, Jorge. Halliburton. Multilateral Wells in the Castilla Field of Eastern Colombia: A Case History of the Guadalupe Reservoir. En: SPE International/IADC. March 2009. p. 2-3.

<sup>e</sup> URIBE LOPEZ, J.E. MORALES JIMENEZ, G.E. SPE. ESP Optimization in an Extra Heavy Oilfield: A Case Study in Colombia Llanos Basin. En: Society of Petroleum Engineers (SPE). Alberta, Canada, 10-12 June 2014.

<sup>f</sup> PRIETO, María Elizabeth. MANTILLA, Jorge. Ecopetrol SA. OWENS, Brian Keith. LOBO, Adriano. Occidental de Colombia. FERNANDEZ, Fabián. Redevelopment Progress for Colombia's La Cira-Infantas Field. En: Society of Petroleum Engineers (SPE). Cartagena, Colombia. 3 May 2009.

<sup>g</sup> SOTO, L. PENUELA, G. BENAVIDES, I. MARTINEZ, M. CASTIBLANCO, I. SPE. CHAVES, I. BP Colombia. Gas-Injection Redistribution Revitalizes a Mature Volatile Oil Field: Cusiana Field Case Study. En: Society of Petroleum Engineers (SPE). San Antonio, Texas. USA. 27 September 2006. p. 2.

<sup>h</sup> A. Flórez Anaya, Y. Araujo Paz, M. Uzcategui Rivas, W. Parra Moreno, R. Lavado Quiñones. Pacific Rubiales Energy. Improved Heavy Oil Recovery by Drilling Horizontal Wells in Rubiales Field, Colombia. En: SPE International. April 2012.

La anterior tabla muestra los diferentes cortes de agua que poseen los campos petroleros más importantes del país. Campos como Caño-Limón, Casabe y Cira-Infantas, no son tomados en cuenta para el presente estudio a pesar de su elevado porcentaje de líquido, debido a que sus aguas derivadas de la producción de petróleo, son utilizadas como método de recobro mejorado y no se disponen de manera final por medio de la técnica analizada.

### **3.2 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS A SENSIBILIZAR**

Con respecto a la selección de los parámetros y características que influyen en mayor grado a la aplicación del proceso de pozos disposal se logran identificar los siguientes:

- El tipo de formación y/o tipo de roca.
- La tasa de inyección de agua promedio en cada pozo.
- La presión a la cual se inyecta el fluido.
- La profundidad a la que se encuentra el pozo disposal o receptor.

### **3.3 DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Con el propósito de iniciar el desarrollo de este objetivo del proyecto, se toma en cuenta la información obtenida de los campos indicados, a fin de realizar una comparación entre las características y parámetros establecidos anteriormente; para así, definir cuál de estos ejemplos con presencia de pozos disposal posee una mejor aplicación, desarrollo y resultados del proceso. Por último, se concluye dando

a conocer los aspectos más convenientes de un escenario oportuno para la realización de dicho procedimiento.

A continuación, se presenta la información investigada de los casos ubicados en Colombia:

**3.3.1 Campo Rubiales.** El Campo Rubiales fue descubierto en el año de 1980. Se ubica al sureste de la cuenca de los Llanos Orientales a 167 Km del casco urbano de Puerto Gaitán, Meta y a 465 Km de Bogotá, capital colombiana. Su desarrollo inició en el año 2006 por parte de la compañía operadora Pacific Rubiales, la cual logró maximizar su potencial<sup>21</sup>. Al paso del tiempo, en Julio del año 2016, La Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) asumió el desarrollo de este campo. Rubiales se caracteriza por su avance tecnológico en pozos horizontales y la aplicación de algunos verticales, contando actualmente con la presencia de 527 pozos productores activos en sus distintas formaciones<sup>22</sup>.

Posee un área de 138.000 Acres, produce un crudo pesado de 11.3° a 14.4° API, una viscosidad de 310 a 730 cp a una temperatura de 147 °F y tiene una producción promedio de 121.000 barriles de petróleo por día (BOPD), lo que equivale al 14% de la producción nacional y al 23% de la producción de Ecopetrol<sup>23</sup>. La zona productora del Campo Rubiales se origina en la formación Carbonera, compuesta por areniscas basales de color gris claro de grano fino a grueso, con una porosidad de 25% a 32%, una permeabilidad entre 5 a 13 Darcys y un espesor de 20 a 80 pies

---

<sup>21</sup> FLÓREZ ANAYA, Y.; ARAUJO PAZ, M.; UZCATEGUI RIVAS, W.; PARRA MORENO, R. Lavado Quiñones. Pacific Rubiales Energy. Improved Heavy Oil Recovery by Drilling Horizontal Wells in Rubiales Field, Colombia. En: SPE International. April 2012. p. 2

<sup>22</sup> Ecopetrol, Así funciona el Campo Rubiales, Campo Rubiales, 2016. Disponible en: <<http://www.ecopetrol.com.co/documentos/Asi-funciona-rubiales.pdf>>

<sup>23</sup> Ecopetrol. Excelentes resultados tras un año de operación en Rubiales [Video]. Colombia: Ecopetrol Oficial, 2017. 5 min 5 seg

(ft). Su estructura consiste en un monoclinal con una pendiente debajo de 4° en la dirección N50°W<sup>24</sup>.

El mecanismo de producción de Rubiales es un acuífero activo que actúa como un sello vertical y su corte de agua es del 80%, lo cual equivale a 30 barriles de agua por cada barril de crudo generado, en otras unidades, 3'630.000 BWPD. La inyección del agua de producción se realiza actualmente en Puntos de Disposición de Agua o PADS de inyección; éstos son una configuración de varios pozos inyectoros pertenecientes a un mismo cluster. Hasta la fecha se cuentan con 8 PADS de inyección y su distribución geográfica en el campo se puede observar en la **Figura 6**.

**Figura 7. Puntos de Disposición de Agua de Inyección (PADS) en Campo Rubiales.**



Fuente: “Así funciona el Campo Rubiales”, Campo Rubiales, Ecopetrol, 2016.

<sup>24</sup> FLÓREZ ANAYA, Y.; ARAUJO PAZ, M.; UZCATEGUI RIVAS, W. PARRA MORENO, R. Lavado Quiñones. Óp. cit., p. 2

Dentro de estos Puntos de Disposición de Agua de inyección en el campo Rubiales se pueden apreciar un gran número de pozos inyectoros considerados disposal ya que al tener un elevado índice de producción de agua se busca disponer finalmente dicho líquido de una manera controlada. Un ejemplo claro de pozos para disposición de aguas residuales en Rubiales es el pozo **DW-009H** el cual toma el fluido proveniente del PAD 2 e inyecta un promedio de 95.000 BWPD a una presión de 1140 PSI, a un acuífero confinado ubicado a 4.590 ft de profundidad. Con el volumen de inyección de agua promedio más alto, este pozo es el caso más representativo de la campaña disposal en el campo Rubiales<sup>25</sup>.

**Tabla 4. Características Campo Rubiales**

Característica	Información
Nombre	Rubiales <sup>a</sup>
Departamento	Meta <sup>a</sup>
Cuenca	Llanos Orientales <sup>a</sup>
Tipo de formación/Tipo de Roca	Areniscas Basales <sup>a</sup>
Fallas	Monoclinal con una pendiente debajo de 4° en la dirección N50°W <sup>a</sup>
Acuífero	Activo <sup>a</sup>
Tipo de Yacimiento	Crudo Pesado <sup>a</sup>
Gravedad API	11,3° - 14,4° <sup>a</sup>
Profundidad	3.100 ft <sup>a</sup>
Permeabilidad	5.000 md – 13.000 md <sup>a</sup>
Porosidad	25% - 32% <sup>a</sup>
Espesor	20 ft – 80 ft <sup>a</sup>
Corte de Agua	80 % <sup>a</sup>
<b>Pozo Disposal</b>	
Nombre	DW-009H <sup>b</sup>
Inyección de Agua Promedio	95.000 BWPD <sup>b</sup>

<sup>25</sup> RODRÍGUEZ TORRES, Paula Alexandra. Evaluación del sistema pozo-yacimiento para los inyectoros de agua tipo disposal en el campo Rubiales. Tesis de pregrado en Ingeniería de Petróleos. Bogotá: Fundación Universidad de América, facultad de Ingenierías. 2012. 198 p

Característica	Información
Presión	1.140 PSI (cabeza de pozo) <sup>b</sup>
Profundidad	4.590 ft <sup>b</sup>
<sup>a</sup> A. Flórez Anaya, Y. Araujo Paz, M. Uzcategui Rivas, W. Parra Moreno, R. Lavado Quiñones. Pacific Rubiales Energy. Improved Heavy Oil Recovery by Drilling Horizontal Wells in Rubiales Field, Colombia. <u>En:</u> SPE International. April 2012.	
<sup>b</sup> RODRÍGUEZ TORRES, Paula Alexandra. Evaluación del sistema pozo-yacimiento para los inyectores de agua tipo disposal en el campo Rubiales. Tesis de grado en Ingeniería de Petróleos. Bogotá: Fundación Universidad de América, facultad de Ingenierías. 2012. 198 p.	

**3.3.2 Campo Castilla.** El Campo Castilla se ubica aproximadamente a 250 km al sureste de Bogotá, capital colombiana. Fue descubierto por la compañía petrolera Chevron en el año de 1969. Con un área de 10.300 Acres, Castilla produce crudo pesado proveniente de la formación Guadalupe en la cuenca de los llanos orientales y cuenta con la presencia de un acuífero de gran tamaño. La Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol, adquirió el campo en el año 2000 y completó el primer pozo horizontal en febrero del 2001. En el año 2005 una segunda campaña de perforación se llevó a cabo usando Clusters diseñados para reducir el efecto de afluencia del agua ocasionada por la existencia del acuífero<sup>26</sup>.

Castilla se ubica en el departamento del Meta con un tipo formación compuesta por arenas delgadas y arcillosas. Con un corte de agua del 83%, el Campo Castilla dispone el 7% del agua total producida en el pozo Castilla-Disposal 1, el cual toma el fluido de la estación Castilla 2 e inyecta un promedio de 60.000 BWPD a una presión de 1.000 PSI en cabeza de pozo, a un acuífero confinado ubicado a 8.000 ft de profundidad. El agua producida es previamente filtrada en los lechos de cascarilla de nuez para retener la cantidad máxima de aceites y sólidos que aún

<sup>26</sup> MERCADO, Orlando. ECOPETROL. & VELEZ, Jorge. Halliburton. Multilateral Wells in the Castilla Field of Eastern Colombia: A Case History of the Guadalupe Reservoir. **En:** SPE International/IADC. March 2009. p. 1-3.

puede llevar al momento de reinyectarla. A futuro la campaña disposal en el campo castilla tiene proyectado 15 pozos reinyectores en 3 áreas cluster; con un caudal de 70.000 BWPD para cada pozo, un total de 1'150.000 BWPD<sup>27</sup>.

**Tabla 5. Características Campo Castilla**

Característica	Información
Nombre	Castilla <sup>a</sup>
Departamento	Meta <sup>a</sup>
Cuenca	Llanos Orientales <sup>a</sup>
Tipo de formación/Tipo de Roca	Arenas delgadas y arcillosas <sup>a</sup>
Fallas	Anticlinal que limita al este con una falla de alto ángulo inverso <sup>a</sup>
Acuífero	Activo <sup>a</sup>
Tipo de Yacimiento	Crudo Pesado <sup>a</sup>
Gravedad API	13,7° <sup>a</sup>
Profundidad	6.600 ft <sup>a</sup>
Permeabilidad	95 md – 1.400 md <sup>a</sup>
Porosidad	18% - 20% <sup>a</sup>
Espesor	70 ft – 350 ft <sup>a</sup>
Corte de Agua	83 % <sup>a</sup>
<b>Pozo Disposal</b>	
Nombre	Castilla-Disposal 1 <sup>b</sup>
Inyección de Agua Promedio	60.000 BWPD <sup>b</sup>
Presión	1.000 PSI (cabeza de pozo) <sup>b</sup>
Profundidad	8.000 ft <sup>b</sup>
<sup>a</sup> MERCADO, Orlando. ECOPETROL. & VELEZ, Jorge. Halliburton. Multilateral Wells in the Castilla Field of Eastern Colombia: A Case History of the Guadalupe Reservoir. <u>En: SPE International/IADC</u> . March 2009. p. 2-3. <sup>b</sup> Ecopetrol & Nalco (an Ecolab Company). Disposición de agua de producción mediante la reinyección a pozos disposal [Video]. Colombia: a Lapix, 2014. 3 min 17 seg.	

<sup>27</sup> Ecopetrol & Nalco (an Ecolab Company). Disposición de agua de producción mediante la reinyección a pozos disposal [Video]. Colombia: a Lapix, 2014. 3 min 17 seg.

### 3.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LOS PARÁMETROS Y CASOS MENCIONADOS

Como se puede apreciar en las *tablas 4 y 5* mostradas anteriormente, el comportamiento de los parámetros estudiados varía principalmente por la presencia del tipo de roca que se encuentra en las formaciones de los dos casos analizados. Teniendo en cuenta esta información se observa que en la aplicación de la técnica de pozos disposal una tasa de inyección de agua más alta, requiere de un aumento en la presión de inyección del fluido. La profundidad varía dependiendo de los acuíferos de agua fresca que se encuentren alrededor del área donde se ubica el pozo receptor y demás formaciones, ésta debe ser mayor que la última fuente de agua potencialmente aprovechable. El tipo de roca presente en el área de aplicación del proceso disposal es una propiedad muy importante al momento de inyectar el fluido, ya que dependiendo de ésta el yacimiento receptor podrá tener una mayor o menor capacidad de almacenamiento para disponer un volumen de agua.

En el caso del pozo **DW-009H** del Campo Rubiales, la principal ventaja que se tiene es que su área de ubicación se considera apropiada para la inyección de agua debido a la presencia de areniscas basales. Este tipo de roca tiene una propiedad particular, presenta arenas saturadas en un 100% de agua, lo que impide una comunicación con áreas que contienen aceite, creando así una buena compatibilidad entre el agua de producción inyectada y la formación receptora del pozo disposal. Estas características permiten que el pozo tenga una mejor aplicación, desarrollo y resultados del proceso, con una mayor capacidad de almacenamiento y tasas de inyección elevadas de 95.000 BWPD promedio<sup>28</sup>.

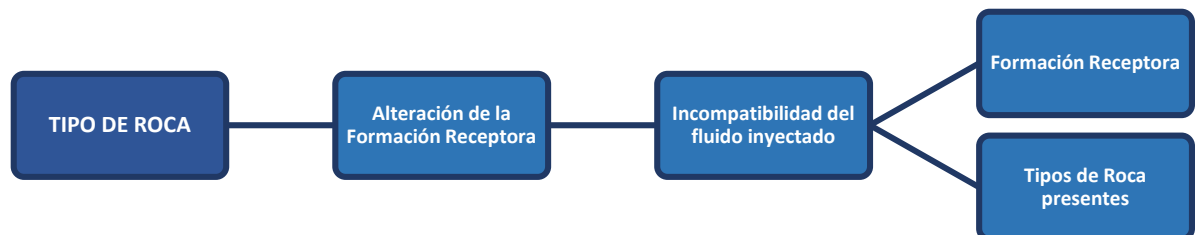
---

<sup>28</sup> RODRÍGUEZ TORRES, Óp. Cit. 198 p

Caso distinto es el que se aprecia en el pozo **Castilla-Disposal 1** del Campo Castilla, el cual inyecta a una tasa menor 60.000 BWPD promedio. En el área de aplicación del proceso disposal para este pozo se encuentran arenas delgadas y arcillosas las cuales dificultan la determinación de la saturación en el yacimiento y la inyección de agua a tasas más elevadas. El tipo de roca, la presencia de arcillas, sus porcentajes y modo de distribución en la formación originan diferentes efectos en la resistividad de la misma; si esto no es tomado en cuenta se puede interpretar como zonas de agua, intervalos que contienen hidrocarburos; además de generar problemas tales como derrumbes, fracturas y filtraciones del fluido. Con el fin de evitar este tipo de inconvenientes, se debe realizar un estudio previo de compatibilidad entre la roca y el fluido inyectado; para así, conocer o determinar el volumen de agua que se puede inyectar a la formación receptora y la capacidad de almacenar y mantener el líquido para disponer en este pozo<sup>29</sup>.

Durante el desarrollo del análisis de sensibilidad, también se pudo determinar, que parámetros importantes para el óptimo desarrollo de la técnica analizada, tales como el tipo de roca presente en el área de la inyección disposal, puede causar una incompatibilidad del fluido inyectado con la formación receptora y tipos de roca presentes en esta, produciendo una posible alteración de la misma (Ver **Gráfica 2**).

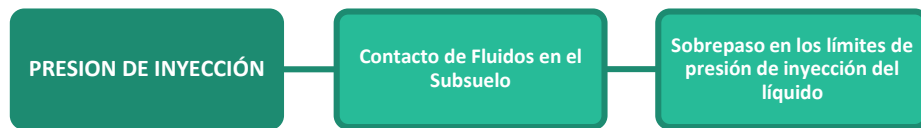
**Figura 8. Influencia sobre la técnica analizada del parámetro: Tipo de Roca.**



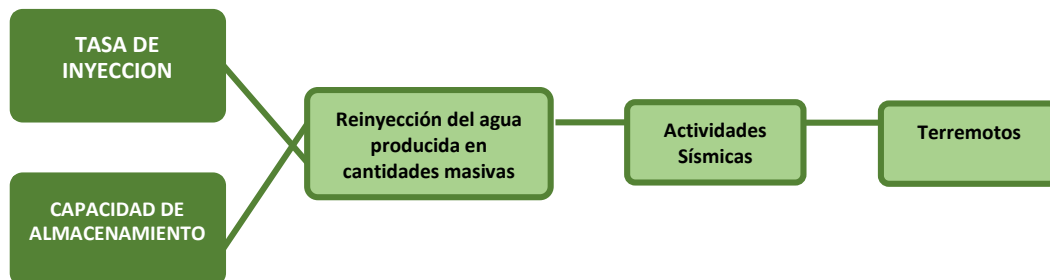
<sup>29</sup> MERCADO, Op. Cit. p. 1-3.

Un sobrepaso en los límites de presión de inyección del líquido, provocaría un fracturamiento del estrato confinante, causando un desplazamiento del agua de producción hacia fuentes hídricas cercanas generando un contacto de fluidos en el subsuelo y a su vez, un impacto negativo en estas (Ver **Figura 9**). Además, un mal control de la tasa de inyección del fluido podría originar una alteración en la capacidad de almacenamiento del pozo receptor, debido a la reinyección en cantidades masivas del líquido en este, acumulándose con lentitud, hasta que finalmente hay una liberación de energía en la formación, manifestándose como una actividad sísmica de tipo terremoto o temblor (ver **Figura 10**).

**Figura 9. Influencia sobre la técnica analizada del parámetro: Presión de Inyección.**



**Figura 10. Influencia sobre la técnica analizada del parámetro: Tipo de Roca.**



### 3.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a la información consultada de los casos expuestos y los resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad convencional realizado a los parámetros más influyentes en el proceso de reinyección de agua de producción a pozos disposal como método de disposición final, se logra determinar un escenario favorable compuesto principalmente por el parámetro del tipo de roca que se encuentra en las formaciones a las cuales se les desea aplicar la técnica de pozos de inyección para disposición de aguas residuales, basando esta decisión primordialmente en los siguientes puntos:

- La compatibilidad entre el agua de producción a ser reinyectada y el tipo de roca presente en el yacimiento.
- La saturación de la roca presente en la formación receptora del pozo disposal.
- La presencia de acuíferos de agua fresca alrededor del área donde se ubica el pozo receptor.

Puntos que determinan parámetros importantes tales como el volumen de inyección de agua, la capacidad de almacenamiento y disposición de la misma, la prevención de problemas como filtración de fluidos por fracturas, derrumbes de la formación y contaminación de acuíferos cercanos al pozo disposal.

#### **4. EFECTOS E IMPACTOS ASOCIADOS A LAS OPERACIONES DE POZOS DISPOSAL SOBRE FUENTES HÍDRICAS SUBTERRÁNEAS.**

A lo largo del desarrollo de este proyecto se ha estudiado la técnica de reinyección de agua de producción a pozos disposal como método de almacenamiento final, dando a conocer las ventajas que tiene la implementación de este procedimiento en cuanto a la disminución de daños al no verter el líquido al medio ambiente, cuerpos de aguas superficiales o ambientes marinos; sino, a pozos que han sido abandonados por problemas mecánicos o aquellos que dejaron de ser económicamente viables y se utilizan para este fin.

Mas, sin embargo, la aplicación incorrecta de este método trae consigo unas desventajas e impactos a los acuíferos de agua fresca que se encuentran alrededor del área donde se ubica el pozo receptor. Por consiguiente, se evaluó los posibles daños que se pueden originar a fuentes hídricas potencialmente aprovechables.

##### **4.1 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN**

Durante el estudio de los efectos negativos derivados de la implementación de la técnica disposal, se debe tener en cuenta los siguientes parámetros de evaluación:

- Presión de inyección del fluido.
- Compatibilidad entre el fluido inyectado y la formación receptora.
- Calidad del agua producida.
- Volumen de líquido inyectado.
- Número de perforaciones realizadas para pozos disposal.

Antes de realizar el estudio específico de cada uno de los daños que se pueden generar debido a una mala actividad de inyección disposal, se identifican los parámetros a los cuales están asociados y el consecuente impacto ambiental.

**Tabla 6. Identificación de daños, parámetros y consecuencias ambientales.**

Daño	Parámetro Asociado	Consecuencias
<b>Contacto Entre Fluidos en el Subsuelo</b>	Sobrepaso en los límites de presión de inyección del líquido (Agua de Producción).	Fracturamiento del estrato confinante.
		Contacto entre el líquido inyectado y el agua situada en los acuíferos aledaños.
		Contaminación del agua fresca presente en fuentes hídricas subterráneas.
<b>Alteración de la Formación Receptora</b>	Incompatibilidad del fluido inyectado con la formación receptora y tipos de roca presentes en esta.	Taponamiento del área de aplicación de la inyección disposal.
		Desplazamiento del agua inyectada hacia acuíferos cercanos o la superficie.
<b>Calidad del Agua de Producción</b>	Calidad y caracterización del agua producida.	Reducción de la tasa de inyección del líquido debido al taponamiento de la formación receptora a causa de la presencia de sólidos en el agua de producción inyectada.
	Monitoreo y control del líquido inyectado.	Problemas de reacondicionamiento de pozos.

Daño	Parámetro Asociado	Consecuencias
Actividades Sísmicas	Incremento del número de perforaciones realizadas para pozos disposal.	Eventos sísmicos tales como terremotos y temblores.
	Reinyección del agua producida en cantidades masivas.	

## 4.2 DAÑOS ASOCIADOS A LA TÉCNICA DE POZOS DISPOSAL SOBRE ACUÍFEROS POTENCIALMENTE APROVECHABLES

A continuación, se enumeran los posibles daños e impactos negativos que puede ocasionar una mala implementación de la técnica de pozos disposal como método de disposición final para el agua producida en yacimientos de hidrocarburos sobre acuíferos o fuentes hídricas cercanas a la formación receptora.

**4.2.1 Contacto entre fluidos en el subsuelo.** En un proyecto disposal, existe el riesgo potencial de la comunicación del agua de producción inyectada con acuíferos superficiales cercanos al área donde se ubica el pozo receptor. Razones como el fracturamiento del estrato confinante debido a un sobrepaso en los límites de presión de inyección del líquido, podrían generar un contacto entre el agua de producción inyectada y el agua fresca ubicada en los acuíferos aledaños, ocasionando un daño a esta última debido a los componentes fisicoquímicos presentes en el agua inyectada, la cual, así haya sido tratada y se encuentre bajo los límites permisibles de concentración impuestos por la ley para avalar su inyección, continúa teniendo en su composición elementos contaminantes perjudiciales para las fuentes hídricas. Efectos geológicos y tectónicos tales como fallas no sellantes presentes en la formación, también pueden facilitar la

comunicación y la migración del agua inyectada a formaciones cercanas causando este mismo impacto<sup>30</sup>.

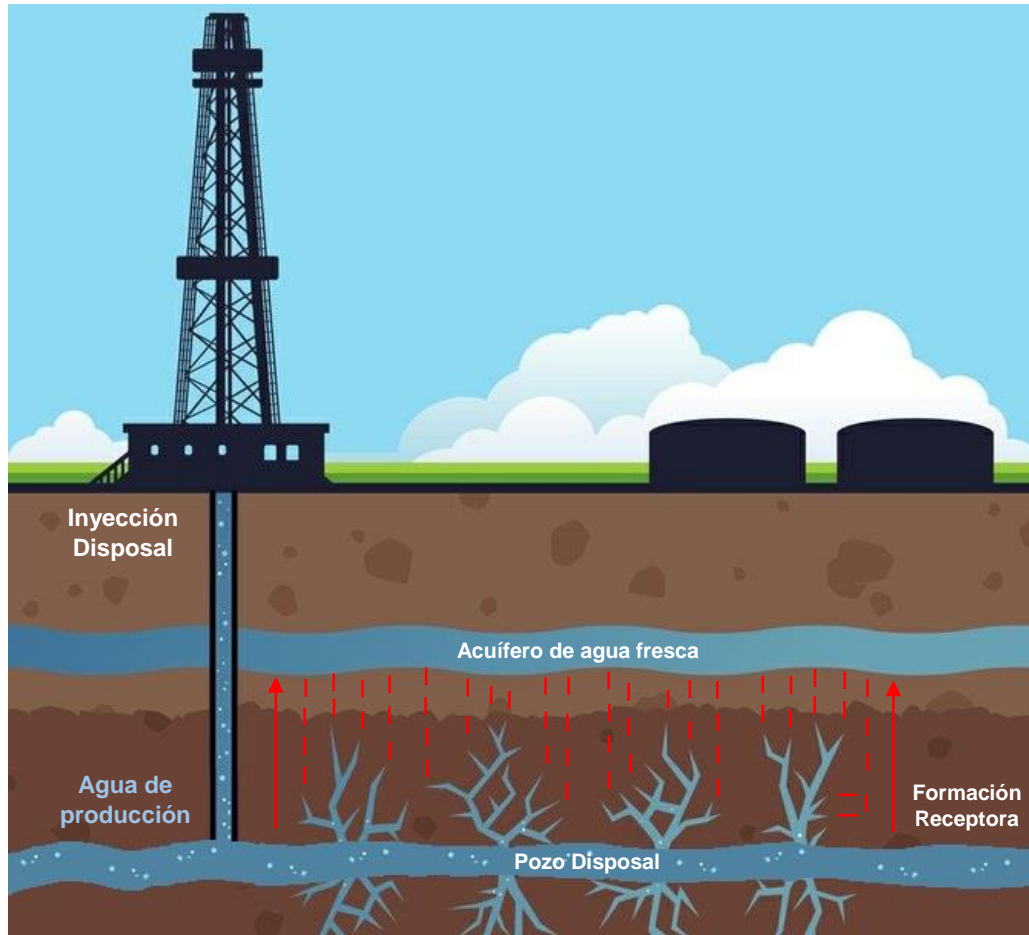
Los pozos para disposición final del agua producida, pueden originar problemas si el líquido inyectado no se encuentra correctamente filtrado, conteniendo partículas tan grandes que provoquen el taponamiento de la matriz. Por otra parte, si el agua no recibe un tratamiento adecuado con químicos de producción como bactericidas y secuestradores de oxígeno, el daño hacia la formación receptora puede aumentar. Estos factores provocan un aumento en la presión de inyección hasta que se genera una fractura, que en un principio es corta, pero luego crece en longitud y altura para mantener la inyectividad a medida que las caras de la misma se taponan.

Cuando las fracturas inducidas se extienden en forma vertical a través de varias capas de la formación, se pierde el control sobre el barrido vertical y resulta difícil recuperar el perfil de inyección; produciendo así, la posible filtración del fluido hacia fuentes hídricas cercanas causando un impacto negativo en estas. Las fracturas generadas por una mala aplicación del proceso de pozos disposal y un mal tratamiento del agua dispuesta a inyectarse, se observan con frecuencia en pozos verticales donde la disposición de este líquido ocurre, comúnmente, a través de fallas conductoras o fracturas que interceptan a un acuífero. (Ver **Figura 11**)

---

<sup>30</sup> Pabel Imar Lema Copa, Pozos Disposal, 2012. p. 9.

**Figura 11. Contaminación de acuífero de agua fresca por filtración de fluidos inyectados debido al fracturamiento de la formación receptora.**



El Bario es uno de los componentes químicos presentes en el agua de producción. Su contacto con aguas frescas pertenecientes a acuíferos cercanos a la formación receptora del pozo disposal puede contaminarla, deteriorando las posibilidades de considerarla apta para el consumo humano y animal. La ingestión durante un período breve de cantidades relativamente altas de bario puede producir vómitos, calambres estomacales, diarrea, dificultad para respirar, aumento o disminución de la presión sanguínea, adormecimiento de la cara y debilidad muscular. La ingestión de cantidades muy altas de este compuesto puede alterar el ritmo del corazón y

producir parálisis y posiblemente la muerte. Algunos animales que ingirieron bario durante mucho tiempo sufrieron daño del riñón, pérdida de peso y otros fallecieron<sup>31</sup>.

Niveles bajos de Cloruros, Minerales disueltos en el agua de producción inyectada, pueden producir irritación de la nariz, la garganta y los ojos. Niveles más altos puede producir tos, alteraciones del ritmo respiratorio y daño de los pulmones. También irrita la piel y el sistema respiratorio. En animales es especialmente dañino para organismos que viven en el agua y el suelo<sup>32</sup>.

Para controlar y minimizar los riesgo mencionados se debe realizar un estudio previo de los parámetros de inyección considerados para la disposición del agua de producción, con el fin de no sobrepasar los límites de presión. El bombeo de un fluido gelificado puede servir para solucionar problemas de fracturamiento; ya que éste, resulta especialmente efectivo en casos en que las fracturas no contribuyen a la producción de petróleo. También se deben revisar los registros de cementación de los pozos productores cercanos a los pozos inyectores, para así poder monitorear el proceso de reinyección y tener un control del mismo. Además es necesario un análisis geológico de la zona donde se realizará el proyecto; esto con el propósito de conocer la posible existencia de eventos tectónicos como los indicados anteriormente y así, tomar medidas de prevención al momento de reinyectar el fluido a las formaciones confinantes.

---

<sup>31</sup> MORALES RINCÓN, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Desempeño técnico y ambiental de las tecnologías convencionales y modernas de tratamiento de agua producida. Tesis de pregrado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2016. p. 33.

<sup>32</sup> *Ibíd.*, p. 37.

**4.2.2 Alteración de la formación receptora.** Como ha sido establecido en un principio de este documento, un gran número de empresas operadoras que adoptan por emplear el sistema de pozos disposal para la reinyección del agua de formación, reacondicionan pozos que dejaron de ser económicamente viables y productivos; o algunas veces, optan por utilizar otros que fueron abandonados por problemas mecánicos. La formación receptora usada para este tipo de procedimiento puede sufrir un daño en su geología causado por la incompatibilidad del fluido inyectado con la formación y tipos de roca presentes en esta.

Al momento de evaluar este impacto se debe tener en cuenta que la profundidad a la cual se encuentra el pozo sea mayor que la última fuente de agua potencialmente aprovechable. Si hay presencia de líquido en la formación receptora, ésta debe ser no apta para el consumo humano ni para la agricultura, por lo tanto, el acuífero receptor no puede considerarse productor de agua. La incompatibilidad de las aguas presentes en el pozo receptor con las inyectadas, genera el taponamiento del área de aplicación de la inyección disposal; lo que conlleva a reacciones fisicoquímicas perjudiciales para el proceso, y en consecuencia desencadenen diversos problemas operativos. De ocurrir este tipo de impacto o daño en la formación receptora, el agua inyectada podría migrar hacia la superficie y alcanzar acuíferos superiores, ocasionando el consecuente daño ecológico<sup>33</sup>.

Se estima que la capacidad de almacenamiento del pozo disposal o receptor, sea mucho mayor que el volumen de agua a inyectarse durante el periodo que dure el proyecto; ésto con el objetivo de minimizar el impacto inicial que se pueda generar alrededor del pozo a medida que avance el frente de agua inyectada. El caudal y la presión del líquido inyectado, así como la calidad del fluido a disponerse en la formación receptora, deberán ser controlados permanentemente, a fin de prevenir el taponamiento del área donde se dispone el agua de producción<sup>34</sup>.

---

<sup>33</sup> Pabel Imar Lema Copa, Pozos Disposal, 2012. p. 10

<sup>34</sup> *Ibíd.*, p. 11

### **4.3 OTROS TIPOS DE IMPACTOS VINCULADOS A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE POZOS DISPOSAL**

**4.3.1 Calidad del agua de producción.** En el proceso de reinyección del agua producida se debe realizar un monitoreo y control de la misma lo que contribuirá a conocer la calidad del agua que se dispone en el subsuelo y tener una evaluación del posible grado de afectación que pueda ocasionar al agua subterránea presente en el pozo receptor. Si bien es cierto, la calidad del agua a inyectar no es un factor influyente en este tipo de proceso de disposición final, mas sin embargo, es un elemento que se debe tomar en cuenta al evaluar la clase de impacto que puede generar hacia la zona receptora. Si el agua inyectada contiene sólidos en una cantidad suficientemente grande para taponar la formación o al menos una fracción del tamaño del medio poroso, la inyectividad declinará, generando una reducción del volumen promedio de líquido inyectado en el pozo disposal. Adicionalmente, una calidad pobre del agua dispuesta a inyectarse, puede generar problemas en los pozos; los cuales requerirán de constantes trabajos con costos elevados, de reacondicionamiento tales como: achicamiento, limpieza, acidificación y fracturamiento, con el fin de mantener un nivel aceptable de inyectividad.

Una determinación del grado y tipo de tratamiento requerido para mantener la inyectividad se basada en un análisis de todos los datos acerca de la caracterización del agua producida y de la formación donde será inyectada, incluyendo datos de la calidad del agua, datos de núcleos y resultados de pruebas de pozo<sup>35</sup>.

---

<sup>35</sup> Pabel Imar Lema Copa, Pozos Disposal, 2012. p. 12

Con el fin de evitar el riesgo de taponamiento y la reducción de la tasa de inyección de líquido promedio que pueda generar la calidad del agua de producción dispuesta a almacenarse en la formación receptora por presencia de sólidos, se deben tomar las siguientes medidas de regulación:

- Obtener información inicial a través de la recolección y análisis de muestras de agua producida proveniente de los pozos en explotación, antes de ser tratada y luego de tratada, previo al inicio de las operaciones de reinyección. Estos datos serán tomados como línea base, cuyos valores servirán de referencia para próximos monitoreos<sup>36</sup>.
- Monitorear la calidad del agua producida a inyectar con el propósito de comparar los datos e información obtenida a través de los análisis de las muestras realizados y los estándares adoptados al momento de su reinyección<sup>37</sup>.

**4.3.2 Actividades sísmicas.** Un estudio publicado el 19 de Junio del año 2015 por la Escuela de la Tierra, Energía y Ciencias Ambientales de la Universidad de Stanford en California, Estados Unidos; relaciona un aumento en la actividad sísmica presentada en el estado de Oklahoma debido al incremento del número de perforaciones realizadas para pozos disposal, los cuales tienen el objetivo de almacenar el agua de producción obtenida de la explotación de yacimientos de petróleo y gas de la zona.

El profesor de Stanford, Mark Zoback y su alumno de doctorado Rall Walsh, demuestran en esta investigación que el creciente número de terremotos y/o temblores presentados en el estado, coincidió con un incremento dramático en la disposición de aguas residuales en la formación Arbuckle; formación sedimentaria profunda ubicada a 7.000 ft bajo Oklahoma. Además de esto, comprobaron que la

---

<sup>36</sup> *Ibíd.*, p. 13

<sup>37</sup> *Ibíd.*

fuente primaria de las aguas residuales causantes de la actividad sísmica no es la llamada "*Flowback Water*" o *Agua de Retorno*, la cual es generada después de las operaciones de fracturamiento hidráulico o *Fracking*; sino más bien el agua producida que reinyectan, en cantidades masivas, a pozos de disposición final más profundos<sup>38</sup>.

El Servicio Geológico de Oklahoma declaró que era "muy probable" que la mayoría de los terremotos presentados en el estado se debieran a la inyección de agua producida en pozos de disposición final que se extienden hasta, o incluso más allá, de la formación Arbuckle; esto, basándose en los resultados del estudio realizado por la Universidad de Stanford, el cual fue un factor fundamental para la emisión de dicha declaración<sup>39</sup>.

Antes del año 2008, Oklahoma experimentó uno o dos terremotos de magnitud 4 por década, pero sólo en 2014, el estado experimentó 24 eventos sísmicos de este tipo. Aunque los terremotos pudieron sentirse en gran parte del estado, representaron poco peligro para el público, pero los científicos indicaron que no se puede descartar la posibilidad de desencadenar terremotos más grandes y potencialmente dañinos<sup>40</sup>.

En la investigación, Zoback y Walsh examinaron tres áreas de estudio en Oklahoma, centradas alrededor de las ciudades de Cherokee, Perry y Jones, que han experimentado el mayor número de terremotos en los últimos años. Estas áreas mostraron claros aumentos en terremotos luego de un crecimiento de la disposición de aguas residuales. Caso contrario se presentó, en tres zonas de control cercanas

---

<sup>38</sup> ZOBACK, Mark. WALSH, Rall. Oklahoma Earthquakes Linked to Oil and Gas Wastewater Disposal Wells. Revista virtual Universidad de Stanford [Online], Junio 2015. [Citado, 18, junio, 2015]. Disponible en: <<http://news.stanford.edu/2015/06/18/okla-quake-drilling-061815/>>

<sup>39</sup> *Ibid.*, p. 1

<sup>40</sup> *Ibid.*

a éstas; en las cuales no hubo actividades sísmicas debido a que no poseían un número elevado de pozos disposal.

Las tres áreas de estudio en Oklahoma que Zoback y Walsh observaron, mostraron un retraso entre la tasa máxima de inyección y el inicio de la sismicidad. De acuerdo con este modelo, la eliminación de aguas residuales por medio de pozos de disposición final, está aumentando la presión de poro en la formación Arbuckle. Esta formación receptora y la capa de roca que la compone, se encuentran bajo unas fallas sísmicas. La presión de poro es la presión de los fluidos dentro de las fracturas y espacios de poros de las rocas en profundidad. El esfuerzo cortante se acumula lentamente en estas fallas durante el transcurso del tiempo geológico, hasta que finalmente supera la fuerza de fricción que mantiene los dos lados de una falla sujetos entre sí. Cuando esto sucede, la falla se desliza, y la energía se libera como un terremoto. Los eventos sísmicos en Oklahoma hubiesen podido ocurrir eventualmente, pero al inyectar grandes volúmenes de agua en las fallas y presurizarlas, se presentaron más pronto de lo esperado<sup>41</sup>.

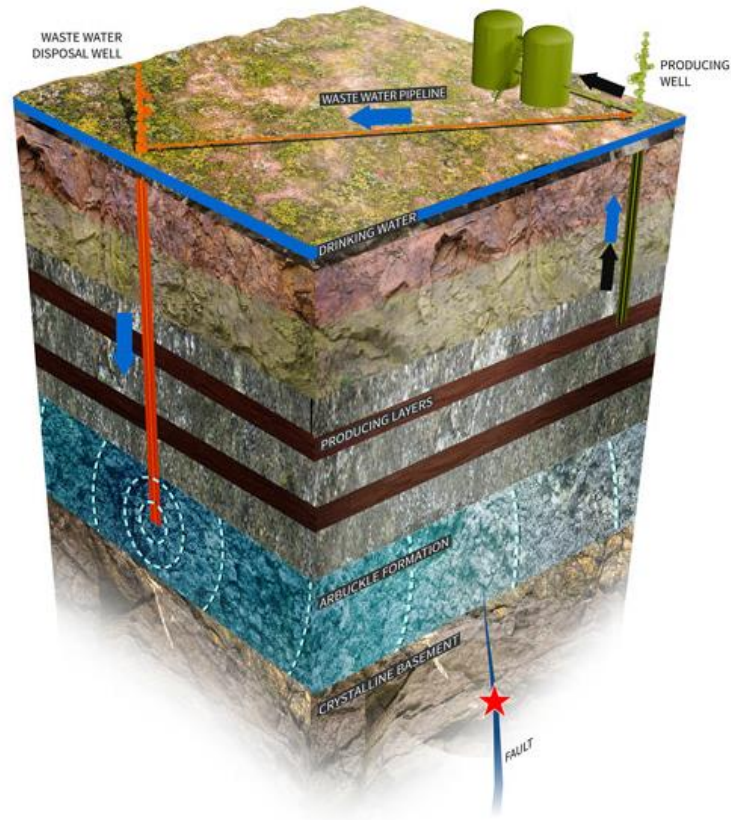
Para concluir con el estudio realizado, el profesor y su alumno determinaron que grandes volúmenes de agua altamente salina, proveniente de la producción de petróleo o gas, que se inyectan en una zona de disposición profunda como la formación de Arbuckle, conducen a una presión de poro creciente que puede penetrar fallas ya estresadas y provocar actividades sísmicas que se manifiestan como terremotos en la zona<sup>42</sup>. (Ver **Figura 8**).

---

<sup>41</sup> *Ibíd.*, p. 1

<sup>42</sup> ZOBACK, WALSH, *Op. Cit.*

**Figura 12. Inyección masiva de agua en la formación Arbuckle, Oklahoma.**



Fuente: Oklahoma Earthquakes Linked to Oil and Gas Wastewater Disposal Wells, Universidad de Stanford, 2015.

La investigación realizada, dio la oportunidad de conocer la fuente de los terremotos sucedidos en Oklahoma en los años 2014 y 2015. A partir de esto, los científicos y los reguladores pueden trabajar en diferentes maneras de detenerlos. Como una medida de solución a este problema, Zoback y Walsh, recomiendan dejar de inyectar agua de producción en la formación Arbuckle por completo; ya que han almacenado tanto líquido en ésta, que la presión se está extendiendo a lo largo de la formación receptora. También sugieren que las compañías encargadas de reinyectar el agua producida a pozos disposal en la formación, adopten campañas de otras empresas, las cuales inyectan el agua como método de recobro mejorado

para desplazar el petróleo hacia la superficie y así, aumentar la tasa de producción del hidrocarburo; técnica que según el estudio de la Universidad de Stanford no da lugar a actividades sísmicas crecientes<sup>43</sup>.

#### **4.4 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES EN LOS CAMPOS ESTUDIO**

La siguiente información identifica los impactos ambientales, riesgos ecológicos y daños ocurridos en los Campos Rubiales y Castilla, los cuales han sido escogidos en el presente proyecto como estudio y ejemplo de la utilización del método disposal como almacenamiento final para el manejo de sus aguas producidas.

**4.4.1 Daños asociados a las operaciones de inyección de agua en Campo Rubiales.** El 20 de Julio del 2016, el periódico *El Espectador* publicó un artículo referente a un informe realizado por la Federación Internacional de Derechos Humanos (FIDH) con colaboración de la Red Sismológica Nacional y el Servicio Geológico Colombiano, en el cual se alerta sobre un aumento de actividades sísmicas en el área de ubicación del campo Rubiales. Desde el año 1999 hasta 2013 el municipio de Puerto Gaitán, Meta; sufrió 11 temblores. En contraste, entre el 2 de abril del 2013 y el 28 de junio del 2016 se produjeron 976 sismos. Esto, dice el informe de la FIDH, podría ser resultado de técnicas de reinyección bajo tierra de aguas residuales con las que operan las empresas en este campo.<sup>44</sup>

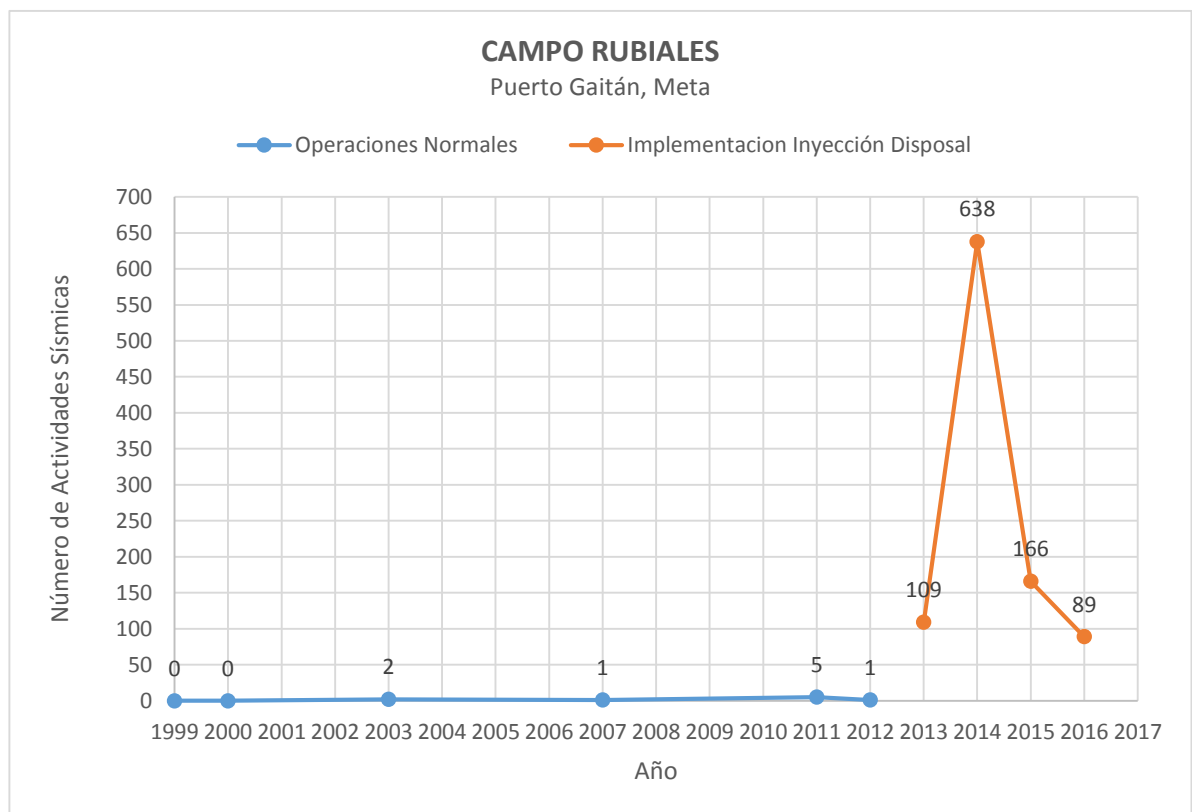
---

<sup>43</sup> ZOBACK, WALSH, Óp. Cit.

<sup>44</sup> NOGUERA MONTOYA, Susana. El costo humano del petróleo en Puerto Gaitán. En: *El Espectador*. [En Línea]. (20, julio, 2016). Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/el-costo-humano-del-petroleo-puerto-gaitan-articulo-644426>

El estudio explica que, debido a la alta cantidad de agua presente en los yacimientos donde se encuentra el petróleo en campo Rubiales, cada día se producen por cada barril de crudo extraído cerca de 20 barriles de agua residual, lo que equivale aproximadamente a 1'250.000 barriles del líquido, que se reinyectan en pozos para su disposición final. Esto podría causar alteraciones en el subsuelo y por ende el aumento de actividades sísmicas en la zona.<sup>45</sup>

**Figura 13. Actividades Sísmicas presentadas en el municipio de Puerto Gaitán, Meta; área de ubicación del Campo Rubiales.**



<sup>45</sup> Ibíd.

**4.4.1.1 Acción de mitigación al impacto presentado:** La actividad sísmica presentada en Campo Rubiales es un riesgo que puede clasificarse como alto, debido a que el número de temblores en la zona ha crecido considerablemente desde el año 2013 hasta el 2016, según informa el artículo expuesto. La acción de mitigación o tratamiento del riesgo es el proceso de identificación de opciones para minimizar los impactos que se pueden generar en el ambiente<sup>46</sup>.

Como ya ha sido documentado en este proyecto, volúmenes elevados de agua inyectada, podrían causar un almacenamiento excesivo del líquido en la formación receptora; por lo que la presión se extiende a lo largo de ésta y se produce una liberación de energía que se manifiesta como terremotos o temblores. También, numerosos proyectos de perforaciones para pozos disposal, conllevan a este tipo de daño ambiental.

Para evitar la exposición al peligro del municipio de Puerto Gaitán, Meta; zona donde se encuentra ubicado el Campo Rubiales, se recomienda no continuar con la actividad realizada debido a la clasificación dada al impacto presentado, pero, teniendo en cuenta que este método, es un proceso de disposición final de aguas residuales derivadas de la producción del petróleo y que tiene como fin reducir los daños generados al medio ambiente, se aconseja elegir una ubicación más adecuada para llevar a cabo esta técnica de una manera controlada, sin inyectar cantidades masivas de agua de producción a la formación, motivo por el cual se puede generar el aumento de actividades sísmicas en esta zona.

---

<sup>46</sup> MOLINA MALAGÓN, Yenny Paola; CAMACHO PARDO, Alexander. Diagnóstico ambiental de los pozos de producción activos e inactivos de un campo petrolero – caso práctico. Tesis de pregrado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2018. p. 120

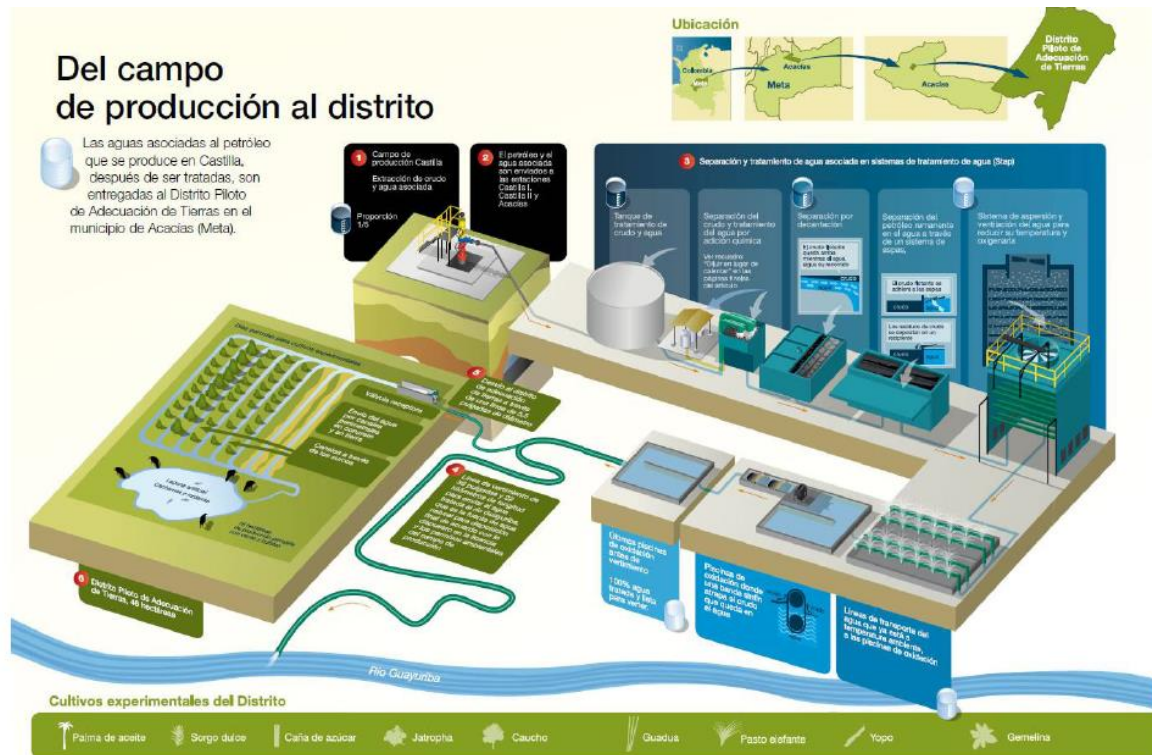
**4.4.2 Daños asociados al manejo y distribución del agua de producción en Campo Castilla.** El periódico *El Espectador* en su artículo *Eco de una Pesadilla de Petróleo*, expone los graves impactos ambientales registrados en el año 2013 por la explotación petrolera en el departamento del Meta<sup>47</sup>. La principal preocupación de los habitantes de la región era la contaminación de las fuentes hídricas que abastecen sus necesidades; como los ríos, debido al vertimiento de las aguas residuales derivadas del petróleo que se hacía en estos. La producción del campo Castilla, que para esa fecha, se realizaba por empuje, estaría utilizando las aguas del río Orotoy y los caños Grande, el Cacayal, Tres Ranchos y el Blanco, razón por la cual hubo una drástica disminución en los caudales de estas fuentes hídricas. También mostraban una gran inquietud con respecto a los impactos que generaría una línea de vertimiento del agua residual al río Guayuriba, ya que dentro de su composición se podían encontrar elementos tales como calcio, bario, níquel y nitratos, entre otros, que tienen efectos letales en la vida humana y animal. Por esto los habitantes y el alcalde de Castilla La Nueva, Fernando Amézquita, pidieron reinyectar el 100% del agua producida de los yacimientos de petróleo con el fin disminuir el deterioro de sus fuentes hídricas.<sup>48</sup>

---

<sup>47</sup> HERRERA DURÁN, Natalia. Eco de una pesadilla de petróleo. En: *El Espectador*. [En Línea]. (3, noviembre, 2013). Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/eco-de-una-pesadilla-de-petroleo-articulo-456409>

<sup>48</sup> *Ibíd.*

**Figura 14. Línea de vertimiento del Agua Residual del Campo Castilla al Rio Guayuriba.**



Fuente: “Disposición de aguas en Campo Castilla – Del campo de producción al distrito”, Ecopetrol, 2013.

**4.4.2.1 Acción de mitigación al impacto presentado:** La contaminación ambiental de una fuente hídrica se clasifica como un alto riesgo, más cuando ésta, abastece la necesidad de una comunidad, región o departamento. En el caso presentado del Campo Castilla, el daño ecológico generado trae como consecuencia una controversia socio-ambiental entre habitantes del municipio donde se ubica el campo y las empresas encargadas de las labores del mismo. La acción de mitigación a los daños que se producen por el vertimiento de las aguas derivadas de la producción del petróleo en ríos y la disminución en el volumen y caudal de estas fuentes hídricas por la utilización del líquido como método de recobro mejorado, es el de adoptar un proceso alterno que contribuya a un manejo adecuado de las aguas de producción generadas en Castilla.

Los pozos de inyección para disposición de aguas residuales tienen como propósito principal almacenar de una manera adecuada el agua producida en yacimientos de petróleo, disminuyendo problemas asociados a la cantidad de dicho líquido extraído evitando su descarga y vertimiento en superficie, buscando así, una solución favorable para con el medio ambiente. Por esta razón, para reducir y evitar la exposición de los ríos ubicados alrededor del Campo Castilla a impactos ambientales por mal manejo de las aguas residuales, en el año 2014 se optó por implementar la técnica de Pozos Disposal para lograr una adecuada gerencia del líquido. Alrededor de 60.000 BWPD se reinyectan en un acuífero confinado ubicado a 7000 ft de profundidad, lo cual ayudó a reducir de una manera significativa los riesgos asociados a la disposición del agua<sup>49</sup>. Hoy en día, no se conocen daños relacionados con la inyección del líquido en Campo Castilla, por lo que el proceso para controlar y minimizar el impacto presentado fue el adecuado.

#### **4.5 PLAN DE CIERRE TÉCNICO Y ABANDONO CON RESPECTO A POZOS INYECTORES**

Dentro de un proceso de almacenamiento final del agua producida en yacimientos de hidrocarburos por medio de pozos disposal, puede presentarse un número elevado de daños ambientales como consecuencia de un mal manejo y aplicación de la técnica. Ante este tipo de situación, se recomienda llevar a cabo un plan de cierre técnico o abandono del pozo, con el fin de mitigar los efectos negativos que podrían producirse en la formación receptora.

---

<sup>49</sup> Ecopetrol & Nalco (an Ecolab Company). Disposición de agua de producción mediante la reinyección a pozos disposal [Video]. Colombia: a Lapix, 2014. 3 min 17 seg

Antes de ejecutar un programa de abandono se debe realizar un análisis y evaluación de los posibles impactos causados por la elaboración del proyecto; donde se identifiquen los diferentes eventos amenazantes que se puedan presentar dentro de la zona de ubicación del campo. También, se debe determinar las áreas de posible afectación y los daños ambientales no previstos en éstas; los cuales estarían asociados al mal desarrollo de la técnica de disposición final para aguas producidas del petróleo, esto con el fin de justificar la implementación de un plan de cierre técnico para el pozo.

A continuación se presentan los pasos para la realización de un *Plan de Desmantelamiento y Abandono*<sup>50</sup> para pozos inyectores, establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA):

**4.5.1 Plan de desmantelamiento y abandono.** Para las áreas e infraestructura intervenidas de manera directa por el proyecto se deberá:

- Presentar la relación de las actividades y obras necesarias para realizar el abandono, desmantelamiento y restauración de las obras temporales en las diferentes fases del proyecto.
- Presentar una propuesta de uso final del suelo en armonía con el medio circundante.
- Señalar las medidas de manejo y reconfiguración morfológica que garanticen la estabilidad y restablecimiento de la cobertura vegetal y la reconfiguración

---

<sup>50</sup> MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). Colombia: Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos. Plan de Desmantelamiento y Abandono, 2014. p. 84

paisajística, según aplique, en concordancia con la propuesta del uso final del suelo.

- Presentar una estrategia de información a las comunidades y autoridades del área de influencia del componente o grupos de componentes, acerca de la finalización del proyecto y las medidas de manejo ambiental.
- Presentar los indicadores de los impactos acumulativos y sinérgicos así como los resultados alcanzados con el desarrollo del Plan de Manejo Ambiental.

## 5. CONCLUSIONES

- ✓ Una de las estrategias de manejo y control del agua producida más efectivas en yacimientos que originan hidrocarburos son los pozos de inyección para disposición de aguas residuales o también llamados Pozos Disposal. Cuando la producción de este líquido es excesiva y su tratamiento es costoso, debido a los procesos de deshidratación y separación de fluidos por los que pasa, se reinyecta a estas formaciones receptoras para su almacenamiento final, siendo ésta, una solución favorable en términos económicos y para con el medio ambiente, siempre y cuando, se tenga en cuenta las características mencionadas, las cuales permiten una mejor aplicación, desarrollo y resultados del proceso.
  
- ✓ Los Pozos Disposal tienen la función de garantizar que el fluido inyectado no entre en contacto con zonas de interés como acuíferos agua fresca que se utilizan o son potencialmente aprovechables para el consumo humano; también se debe controlar y monitorear la calidad del agua inyectada para así asegurar la integridad de los pozos. Es importante mencionar que en estas formaciones almacenadoras está descartada la reutilización del fluido inyectado en métodos de recobro secundario o reúso en superficie.
  
- ✓ La producción de petróleo en grandes volúmenes, conlleva a obtener altas cantidades de agua de producción; ésta, puede llegar a representar más del 80% de los residuos líquidos de un campo. En Colombia, se generaron 12,02 barriles de estas aguas por cada barril de crudo para el año 2015. El 56,3 % de la cantidad de agua producida fue destinada a métodos de inyección para disposición final, procedimiento conocido con el nombre de pozos disposal, por lo que de esta manera se considera la práctica con el mayor porcentaje de aplicación en el país.

- ✓ Antes de realizar un proceso de inyección de agua de producción en pozos para la disposición de aguas residuales, se debe cumplir con ciertos límites de cantidad o concentración en cuanto a los componentes fisicoquímicos presentes en su composición. En Colombia, la normatividad ambiental que tiene el objetivo de regular el uso y disposición de estas aguas, se rige por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS); el cual, a través de los años, ha evolucionado en cuanto a su legislación, con el fin de establecer parámetros que presenten una mejor calidad y condición del agua de producción al momento de su disposición.
  
- ✓ Conforme a los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad elaborado, se puede afirmar que una buena compatibilidad entre el agua de producción inyectada y el tipo de roca que compone la formación receptora del pozo disposal, influye de manera primordial en el buen desarrollo del procedimiento.
  
- ✓ Durante el proceso de inyección del agua producida a pozos para la disposición final de la misma, se recomienda estudiar el tipo de roca presente en la formación almacenadora; así como también su saturación y la presencia de acuíferos de agua fresca alrededor del pozo receptor. Puntos que determinan parámetros importantes tales como el volumen de inyección de agua, la capacidad de almacenamiento y prevención de problemas.
  
- ✓ Dentro de los daños asociados a la técnica de pozos disposal sobre acuíferos potencialmente aprovechables, el contacto entre fluidos ubicados en el subsuelo, es el de mayor prevención. Razones como el fracturamiento de la formación receptora debido a un sobrepaso en los límites de presión de inyección del líquido y la incompatibilidad del fluido inyectado con la formación, podrían generar un contacto entre el agua de producción inyectada y acuíferos aledaños, ocasionando un impacto ecológico sobre esta fuente hídrica.

- ✓ A medida que se desarrolla la técnica de inyección disposal, se recomienda monitorear la calidad del agua dispuesta a inyectarse debido a la clase de impacto que puede generar hacia la zona productora. Es de suma importancia conocer el índice del número de perforaciones realizadas para pozos disposal, así como también, el control de inyección del agua en cantidades masivas; ya que según el estudio publicado por la Universidad de Stanford en California, Estados Unidos; ésto podría relacionar un aumento representativo en las actividades sísmicas de la zona de realización del proyecto.

## 6. RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar un análisis económico que contraste los costos involucrados en el tratamiento y manejo del agua de producción (deshidratación, separación de fluidos, facilidades de superficie requeridas, personal de supervisión) inyectada a pozos de disposición para aguas residuales, con los ingresos del proyecto (producción, venta y precio internacional del crudo) con el fin de trazar estrategias de fondo para una adecuada gerencia del agua.
- ✓ Desarrollar una evaluación técnica profunda de los daños e impactos que puede ocasionar el método de pozos disposal en los diferentes tipos de yacimientos cercanos al área de inyección, teniendo como base un modelo que permita mostrar la incidencia del proceso en factores geológicos como buzamientos, fallas, discontinuidades, entre otros.
- ✓ Elaborar trabajos con base en los decretos y permisos necesarios para la disposición del agua de producción determinados por el Plan de Manejo Ambiental del Acuífero; así como también, la normatividad establecida con respecto a la infiltración de residuos líquidos en fuentes hídricas subterráneas y las condiciones de vulnerabilidad de las mismas.
- ✓ Estudiar detalladamente tanto las facilidades de superficie para la inyección del agua de producción, como el proceso de acondicionamiento del pozo o yacimiento receptor para su posterior almacenamiento final.
- ✓ Llevar a cabo un estudio donde se especifiquen las diferentes medidas de contingencia aplicadas a un posible caso de afloramiento o influjo de las aguas inyectadas en las formaciones receptoras.

## BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO. Informe de Desempeño Ambiental. (ACP), 2015.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO (ACP), Informe de Desempeño Ambiental. 2015. Disponible en: <[https://acp.com.co/web2017/images/pdf/publicaciones\\_e\\_informes/informe\\_ambiental/IGA%202016\\_WEB.pdf](https://acp.com.co/web2017/images/pdf/publicaciones_e_informes/informe_ambiental/IGA%202016_WEB.pdf)>

AZETSU-SCOTT, K. *et al.*, "Precipitation of heavy metals in produced water: influence on contaminant transport and toxicity," *Elsevier*, vol. 63, n.º 2, pp. 146–167, 2007.

BAILEY, Bill; CRABTREE, Mike; TYRIE, Jeb; ELPHICK, Jon; KUCHUK, Fikri; ROMANO, Christian; ROODHART, Leo. Control del Agua. **En:** Artículo en Línea de Schlumberger [online], no. 22. [citado verano, 2000]. Disponible en: <[https://www.slb.com/~//media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish00/sum00/p3\\_2\\_53.pdf](https://www.slb.com/~//media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/sum00/p3_2_53.pdf)>

ECOPETROL & NALCO (an Ecolab Company). Disposición de agua de producción mediante la reinyección a pozos disposal [Video]. Colombia: a Lapix, 2014. 3 min 17 seg.

ECOPETROL, Así funciona el Campo Rubiales, Campo Rubiales, 2016. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/documentos/Asi-funciona-rubiales.pdf>

ECOPETROL. Excelentes resultados tras un año de operación en Rubiales [Video]. Colombia: Ecopetrol Oficial, 2017. 5 min 5 seg.

FAKHURU'L-RAZI, A. *et al.*, "Review of technologies for oil and gas produced water treatment," *Elsevier*, vol. 170, n° 2–3, pp. 530-551, 2009.

FLÓREZ ANAYA, Y. ARAUJO PAZ, M. UZCATEGUI RIVAS, W. PARRA MORENO, R. Lavado Quiñones. Pacific Rubiales Energy. Improved Heavy Oil Recovery by Drilling Horizontal Wells in Rubiales Field, Colombia. En: SPE International. April 2012.

IFP Energies Nouvelles. "Water in fuel production Oil production and refining," [En línea], Disponible en: [http://www.ifpenergiesnouvelles.com/index.php/content/download/70601/1513892/version/2/file/Panorama2011\\_11-VA\\_Eau-Production-Carburants.pdf](http://www.ifpenergiesnouvelles.com/index.php/content/download/70601/1513892/version/2/file/Panorama2011_11-VA_Eau-Production-Carburants.pdf), 2011.

KAUR, G. *et al.*, "Control of sulfidogenic bacteria in produced water from the Kathloni oilfield in northeast India," *Elsevier* vol. 63, n.º 2, pp. 151–155, 2009.

MERCADO, Orlando. ECOPETROL. & VELEZ, Jorge. Halliburton. Multilateral Wells in the Castilla Field of Eastern Colombia: A Case History of the Guadalupe Reservoir. En: SPE International/IADC. March 2009. p. 1-3.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Minambiente presenta nueva Norma de Vertimientos que permitirá mejorar la calidad del agua del país. 2015 Recuperado de <https://goo.gl/o0nQ1b>.

MORALES RINCÓN, María Camila. REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Desempeño técnico y ambiental de las tecnologías convencionales y modernas de tratamiento de agua producida. Tesis de pregrado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2016. 80 p.

NIÑO FLÓREZ, Fredy; GÓMEZ, Jaime. Colombia: “Taller de Inyección de pozos – Generalidades sobre pozos Disposal”, Ecopetrol & Nalco (an Ecolab Company), 2014.

OKLAHOMA Earthquakes Linked to Oil and Gas Wastewater Disposal Wells, Universidad de Stanford, 2015.

PABEL IMAR Lema Copa, Pozos Disposal, 2012.

ROBINSON, D. “*Oil and gas: Treatment and discharge of produced waters offshore,*” 2013 [En línea], Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0015188213700740>,.

RODRÍGUEZ TORRES, Paula Alexandra. Evaluación del sistema pozo-yacimiento para los inyectores de agua tipo disposal en el campo Rubiales. Tesis de pregrado en Ingeniería de Petróleos. Bogotá: Fundación Universidad de América, facultad de Ingenierías. 2012. 198 p.

UNDERGROUND INJECTION CONTROL (UIC) – “Class II Oil and Gas Related Injection Wells”, Environmental Protection Agency (EPA), 2016. Disponible en: [<https://www.epa.gov/uic/class-ii-oil-and-gas-related-injection-wells>]

ZOBACK, Mark; WALSH, Rall. Oklahoma Earthquakes Linked to Oil and Gas Wastewater Disposal Wells. Revista virtual Universidad de Stanford [Online], Junio 2015. [Citado, 18, junio, 2015]. Disponible en: <<http://news.stanford.edu/2015/06/18/okla-quake-drilling-061815/>>