

Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales asociadas a la perforación y producción en campos ubicados en los departamentos del Meta y Casanare durante los años 2015 al 2017, según la Resolución 0631 del 2015

Andrea Veronica Barrera Amorocho, Andrés Felipe Bermejo Peña

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director

Harving Díaz Consuegra

Especialista en Ingeniería Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2019

Dedicatoria:

A Dios porque con su infinita gracia y direccionamiento me mantuvo fuerte y enfocado, ayudándome a superar todas las pruebas que se presentaron durante el desarrollo de este proceso.

A mi familia quienes con su sacrificio, amor y comprensión me guiaron durante toda esta etapa de aprendizaje y me enseñaron la importancia de la disciplina y dedicación. Sin ellos nada de esto sería posible.

A mis amigos, colegas y compañeros que siempre tuvieron palabras de aliento y aportaron a mi crecimiento personal y profesional. Gracias también a las personas que por diferentes circunstancias no están, pero dejaron muchas enseñanzas grabadas en mi mente.

A Veronica, en quien encontré una gran amiga, compañera y colega, y a pesar de los obstáculos y la distancia ha sido un gran apoyo para sacar adelante esta investigación.

Felipe

Dedicatoria

A mis padres quienes con amor y comprensión infinita me acompañaron y guiaron en todo este proceso, me enseñaron el valor del trabajo, la disciplina y responsabilidad.

A mis hermanos, mis compañeros incondicionales de vida, mis amigos del alma, mis cómplices. Sin ellos mi vida no tendría el mismo sentido.

A Mateo quien viene en camino, mi ilusión más grande. Por quien daré lo mejor de mí para que siempre sea muy feliz y deje huella en su caminar.

A mis abuelitos, quienes son y serán el motor de mi vida. Mi gran ejemplo de lucha, amor y constancia.

A Felipe, el mejor compañero de tesis que pude tener, por su comprensión y paciencia, por que encontré en él un gran amigo y un excelente colega.

A todos los lugares donde la vida y Dios me pusieron. Siempre en el camino correcto, en el tiempo perfecto y con la gente precisa.

A Suncol Energy, proyecto de vida donde mis deseos de profesión se construyen.

A Javi, mi mejor casualidad. Con quien he vivido los momentos más indescritibles de mi vida. Por enseñarme siempre a dar lo mejor de mí, pero sobretodo, por el aprendizaje y crecimiento personal que hemos tenido a través del tiempo.

A mis amigos de toda la vida, algunos compañeros de viaje, quienes estarán siempre en mi corazón: Nestor Carvajal, Tania Noriega, Sebastian Bermudez, Julian Villabona, Elsa Amorocho y Sofia Bohorquez. Los adoro.

A mis amigos del alma que la universidad me deja, personas que hicieron parte de este sueño que hoy se cumple: Natalia Florez, Melissa Zabala, Katty Reyes, Sonia Sanchez, Carlos Berdugo, Felipe Leal y Nicolas Tellez. A todos ellos, gracias por llegar a mi vida, les deseo los éxitos del mundo.

Gracias a todos por ser parte de este nuevo logro para mí, por su cariño y apoyo. Los llevo en mi corazón.

Veronica

Agradecimientos

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

A nuestras familias por su apoyo incondicional, amor y motivación durante estos años de carrera. Todos nuestros logros son suyos.

A la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) por darnos las herramientas que necesitábamos para poder llevar a cabo nuestra investigación.

Al ingeniero Harving Diaz por aportar con su orientación, confianza y conocimiento en la elaboración y finalización de este proyecto de grado.

Al grupo de investigación ACIPET, por el aprendizaje compartido y los logros obtenidos.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos por sus infinitas enseñanzas, experiencias vividas y momentos inolvidables.

Contenido

	Pág.
Introducción	26
1. Marco Teórico.....	27
1.1 Agua de perforación.....	27
1.2 Agua Producida.....	28
1.3 Marco Legal Colombiano	30
1.3.1 Decreto 2811 de 1974.	32
1.3.2 Ley 9 de 1979.....	32
1.3.3 Decreto 1594 de 1984.	32
1.3.4 Decreto 3930 de 2010.	33
1.3.5 Resolución 0631 de 2015.....	33
1.4 Tratamientos	36
1.4.1 Tratamiento primario.	38
1.4.2 Tratamiento secundario.....	39
1.4.3 Tratamiento terciario.....	39
1.5 Métodos de disposición del agua residual	40
1.5.1 Vertimientos a cuerpos de aguas superficiales.	41
1.5.2 Evaporación.	41
1.5.3 Inyección en pozo poco profundo.	41
1.5.4 Inyección en pozo disposal.	41
1.5.5 Inyección para mantenimiento de presión, recuperación secundaria.....	41
1.5.6 Recarga de acuíferos.	42
1.5.7 Otros usos.....	42

2. Desarrollo de la Investigación	43
3. Comparación entre el Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 de 2015	46
4. Evaluación de cumplimiento de los parámetros asociados a aguas residuales industriales de los campos de Meta y Casanare de acuerdo a la Resolución 0631 de 2015	53
5. Análisis de resultados de los informes de cumplimiento ambiental	57
5.1 Campos en etapa de perforación	58
5.2 Campos en etapa de producción	66
6. Alternativas de solución a los parámetros críticos.....	72
6.1 pH.....	73
6.2 Temperatura	74
6.3 Fenoles	75
6.4 Cloruros.....	75
6.5 Sólidos suspendidos totales.....	78
6.6 DBO5 y DQO	80
6.7 Hidrocarburos totales	83
6.8 Grasas y aceites	83
7. Conclusiones	88
8. Recomendaciones	91
9. Referencias bibliográficas.....	92

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Por cada barril de petróleo producido se generan 12 barriles de agua	30
Figura 2. Línea del tiempo del marco legal Colombiano aplicado a los recursos hídricos	31
Figura 3. Complejidad del sistema de agua en un campo petrolero	37
Figura 4. Clasificación de tratamientos para aguas residuales.	38
Figura 5. Usos de aguas residuales de producción	43
Figura 6. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimientos en aguas superficiales (Temperatura, pH y cloruros) según la resolución 0631 de 2015.....	54
Figura 7. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimientos en aguas superficiales (Sulfatos, selenio, fenoles totales, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, DBO5, hierro y grasas y aceites) según la resolución 0631 de 2015.	55
Figura 8. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimientos en aguas superficiales (Cadmio, plomo, hidrocarburos totales, arsénico, cromo, DQO, mercurio y vanadio) según la resolución 0631 de 2015.	56
Figura 9. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimientos en aguas superficiales (Cianuro, cobre, níquel, nitrógeno total, zinc y sulfuros) según la resolución 0631 de 2015.	57
Figura 10. pH en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017	58
Figura 11. Cloruros en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017.....	59

Figura 12. Fenoles totales en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017.....	60
Figura 13. Sólidos suspendidos totales en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017	61
Figura 14. DBO5 en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017.....	62
Figura 15. Grasas y aceites en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017.....	63
Figura 16. Hidrocarburos totales en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017	64
Figura 17. DQO en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017	65
Figura 18. Temperatura en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017.....	66
Figura 19. Cloruros en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017.....	67
Figura 20. Sólidos suspendidos totales en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017	68
Figura 21. DBO5 en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017.....	69
Figura 22. Grasas y aceites en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017.....	70

Figura 23. Hidrocarburos totales en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017	71
Figura 24. DQO en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017	72
Figura 25. Esquema de los fenómenos de ósmosis y ósmosis inversa	78
Figura 26. Tipos de lagunas aireadas	81
Figura 27. Vista en sección de un filtro percolador	82
Figura 28. Tanque de flotación por aire disuelto sin recirculación.....	85
Figura 29. Tanque de flotación por aire disuelto con recirculación	86

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Generalidades de los campos evaluados.	45
Tabla 2. Cuadro comparativo entre el decreto 1594 de 1984 y la resolución 0631 de 2015	47

Glosario

Acidez Total: capacidad cuantitativa para reaccionar con una base fuerte hasta un pH designado (Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano., pág. 1)

Acuífero: unidad de roca o sedimento, capaz de almacenar y transmitir agua (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.).

Aguas Residuales Domésticas: son las procedentes de los hogares, así como de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a: descargas de los retretes y servicios sanitarios, descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes, pisos y lavado de ropa. (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial) (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2015, pág. 2).

Aguas Residuales No Domésticas: son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2015, pág. 2).

Alcalinidad Total: suma de todas las bases titulables y por consiguiente su capacidad de neutralizar ácidos (Lenntech, 2017)

Arsénico: metaloide encontrado en forma natural en pequeñas concentraciones generalmente en la superficie de las rocas combinado con azufre y/o metales (Lenntech, 2017).

Bario: metal alcalinotérreo, su naturaleza química es muy similar al calcio con la diferencia que presenta una mayor reactividad. Se oxida con facilidad al ser expuesto al aire y es altamente reactivo al agua (Lenntech, 2017).

BTEX: son productos producidos del petróleo, se encuentran en las pinturas, lacas, diluyentes, productos de caucho, adhesivos, tintas, cosméticos y productos farmacéuticos (department of Environment and Heritage Protection. , 2002).

Cadmio: metal pesado que naturalmente no se encuentra en estado puro, por afinidad química está asociado con metales como el zinc, plomo y cobre (Lenntech, 2017).

Cianuro Total: medida de concentración de cianuro que incluye todo el cianuro libre y los cianuros metálicos fuertes como el ferrocianuro, ferricianuro y segmentos del oro y platino. Los compuestos derivados del cianato y tiocianato se excluyen de la definición de cianuro total. (Instituto Internacional para el Manejo del Cianuro, 2012, pág. 3)

CINC: elemento situado en el grupo de metales de transición, no se encuentra libremente en la naturaleza, combinado se encuentra de manera abundante, principalmente en el mineral esfalerita o blenda (Lenntech, 2017).

Cloruros: son compuestos constituidos por uno o varios átomos de cloro, a los que unidos con átomos de elementos poco electronegativos o elementos metálicos pueden formar sales de carácter básico, ácidos y moléculas orgánicas complejas (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2007).

Cobre: uno de los metales más usados a nivel mundial, característico por su alta conductividad eléctrica y de calor.

Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles: son sustancias químicas orgánicas que contienen uno o varios átomos de un elemento halógeno, generalmente cloro (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2007).

Cromo: metal de transición que, caracterizado por su alta resistencia a la corrosión, en grandes concentraciones resulta tóxico para el ser humano (Real Academia Española, s.f.).

Cuerpo de Agua: sistema de origen natural o artificial localizado, sobre la superficie terrestre, conformado por elementos físicos-bióticos y masas o volúmenes de agua, contenidas o en movimiento (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.).

Demanda Bioquímica de Oxígeno: cantidad de oxígeno que precisan los microorganismos, para la eliminación de la materia orgánica biodegradable existente, a través de procesos bioquímicos, a una temperatura de 20 °C durante 5 días (Sainz Sastre, 2005, pág. 43)

Demanda Química de Oxígeno: cantidad de oxígeno que se precisaría para la oxidación de la materia orgánica y algún compuesto inorgánico, por medio de reactivos químicos (Sainz Sastre, 2005, pág. 45).

Dicloroetileno: líquido incoloro con un olor similar al del cloroformo. Se descompone progresivamente cuando se expone a la luz, el aire y la humedad, dando lugar a productos ácidos y corrosivos entre los que se encuentran el cloruro de hidrógeno. Insoluble en agua (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2013).

Dureza Total: corresponde a la suma de iones de calcio y magnesio presentes en el agua (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2013, págs. 10-12).

Fenoles: compuestos orgánicos aromáticos que contienen el grupo hidroxilo como su grupo funcional (Depetris, s.f.).

Fluoruros: compuestos inorgánicos formados por la unión de uno o varios átomos de flúor a otro elemento químico (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, s.f.).

Fósforo Total: elemento que se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, los cuales se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, y otros polifosfatos) y fosfatos orgánicos (IDEAM, 2004).

Grasas y Aceites: aquellos compuestos que estén en estado libre, no sean solubles en el agua y tengan menos densidad que ésta, independientemente de su composición química y de su origen animal, vegetal o mineral. De estos últimos, destacan por su importancia el petróleo y sus derivados (Sainz Sastre, 2005, pág. 35).

Hidrocarburos Totales de Petróleo: mezcla de productos químicos compuestos principalmente de hidrógeno y carbono, llamados hidrocarburos (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades., 2016)

Hierro: metal maleable y abundante, de alta densidad y fusibilidad. La presencia de éste en el agua provoca precipitación y coloración no deseada (Real Academia Española, s.f.).

Impacto Ambiental: cualquier alteración en el sistema ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.).

Informe de Cumplimiento Ambiental: documento elaborado y presentado por el beneficiario de la licencia ambiental para informar a la autoridad ambiental competente sobre el avance, efectividad y cumplimiento del plan de manejo ambiental, conforme a los términos definidos en el otorgamiento de la licencia ambiental, el establecimiento del plan de manejo ambiental y cualquier otro acto administrativo subsiguiente (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.).

Materia Flotante: objeto visible, sin importar su composición o forma, que se mantenga flotando libremente en la superficie y que se pueda retener en una malla de calibre de 3 mm. (Aguamarket, s.f.)

Mercurio: metal pesado, se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente. Insoluble en agua, compatible con el ácido nítrico concentrado, acetileno, amoníaco, cloro y otros metales. Altamente tóxico (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.).

Níquel: metal de transición, presente en pequeñas cantidades en el agua de mar, el petróleo y en la mayor parte del carbon (Real Academia Española., s.f.).

Nitratos: es producido cuando los organismos nitrificantes oxidan el nitrógeno amoniacal. (Boyd, 2002, pág. 1)

Nitrógeno Amoniacal: consiste de amoníaco no ionizado (NH_3) e ion amoníaco (NH_4). (Boyd, 2002, pág. 1)

Nitrógeno Total: es una medida de todas las varias formas de nitrógeno que se encuentran en una muestra de agua, es decir, corresponde a la suma de los valores de nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal.

Norma de Vertimiento: conjunto de parámetros y valores que debe cumplir el vertimiento en el momento de la descarga (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.).

Ortofosfatos: fósforo soluble.

Parámetro: variable que, en una familia de elementos, sirve para identificar cada uno de ellos mediante su valor numérico (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.).

PH: unidad de medida de alcalinidad o acidez. Mide la cantidad de iones de hidrógeno que contiene una solución.

Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos: se define como el mecanismo que promueve la reconversión tecnológica de los procesos productivos de los generadores de vertimientos que desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios.³⁷

Este plan debe ser presentado a la Autoridad Ambiental dentro del primer año a partir de la fecha de publicación de la norma de vertimientos.

Plata: metal dúctil y maleable con una alta conductividad térmica y conductividad eléctrica (Real Academia Española., s.f.).

Plomo: metal pesado que se caracteriza por su alta elasticidad molecular, la cual depende de la temperatura ambiente a la que este elemento se encuentre (Real Academia Española., s.f.).

Selenio: elemento químico insoluble en agua y alcohol, ligeramente soluble en sulfuro de carbono y soluble en éter (Real Academia Española, s.f.).

Sólidos Suspendidos Sedimentables: son todos los sólidos que se desplazan por arrastre en el agua y pueden ser: limos, arcillas, arena, entre otros, que tienen un tamaño mayor a 0.01 mm (IDEAM, 2007)

Sólidos Suspendidos Totales: son todos los sólidos que se desplazan por arrastre en el agua y pueden ser: limos, arcillas, arena, entre otros. (IDEAM, 2007, pág. 2)

Sulfatos: sales derivadas del ácido sulfúrico, son altamente solubles en disolventes polares como el agua debido a su naturaleza iónica, a excepción de unos pocos como lo es el sulfato de calcio (Lenntech, 2017).

Sulfuro de Carbono: compuesto obtenido por la reacción entre el carbono y el vapor de azufre en ausencia de aire entre 800 y 1000 °C, utilizado en procesos industriales, inflamable (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades., 1997).

Sulfuros: producidos por la reducción biológica de sulfatos y la descomposición de material orgánico. Significativamente tóxicos por inhalación o ingestión (Lenntech, 2017).

Tricloroetileno: sustancia química de síntesis, se presenta en forma de líquido incoloro, inflamable, de aroma y sabor dulce (AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y REGISTROS DE ENFERMEDADES, s.f.).

Vanadio: metal de transición que presenta una alta resistencia a las bases, al ácido sulfúrico y al ácido clorhídrico (Lenntech, 2017).

Vertimiento: descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.).

Nomenclaturas y Abreviaturas

ACP	:	Asociación Colombiana de Petróleo.
ANLA	:	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.
A.R	:	Análisis y Reporte.
ARD	:	Aguas Residuales Domesticas.
ARI	:	Aguas Residuales Industriales.
AOX	:	Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles.
BTEX	:	Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno.
DBO5	:	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DQO	:	Demanda Química de Oxígeno.
ECC	:	Extracto De Carbono-Cloroformo.
ED	:	Electrodialisis.
EDR	:	Electrodialisis Inversa.
HAP	:	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.
HTP	:	Hidrocarburos Totales de Petróleo.
ICA	:	Informe de Cumplimiento Ambiental.
Kg / d	:	Kilogramo por día.
KPa	:	Kilo Pascales.
mg / L	:	Miligramo por litro.
mg / L CaCO3	:	Miligramo por litro de carbonato de calcio.
mg / L O2	:	Miligramo por litro de oxígeno.

M	:	Mil.
MM	:	Millones.
m⁻¹	:	Unidad de número de ondas.
N. R.	:	No Reportado.
PRTLGV	:	Plan de Reconversión a Tecnologías en Gestión de Vertimientos.
PTAR	:	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
RO	:	Ósmosis Inversa.
SAAM	:	Sustancias Activas al Azul de Metileno.
SBR	:	Reactor Discontinuo Secuencial.
SSED	:	Sólidos Suspendidos Sedimentables.
SST	:	Sólidos Suspendidos Totales.
TDS	:	Sólidos Totales Disueltos.
°C	:	Grados Celsius.

Resumen

TÍTULO: ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LOS VERTIMIENTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES ASOCIADAS A LA PERFORACIÓN Y PRODUCCIÓN EN CAMPOS UBICADOS EN LOS DEPARTAMENTOS DEL META Y CASANARE DURANTE LOS AÑOS 2015 AL 2017, SEGÚN LA RESOLUCIÓN 0631 DEL 2015*

AUTOR: ANDREA VERONICA BARRERA AMOROCHO

ANDRES FELIPE BERMEJO PEÑA**

PALABRAS CLAVE: AGUAS, PERFORACIÓN, PRODUCCIÓN, VERTIMIENTOS, NORMATIVIDAD.

DESCRIPCIÓN:

Durante los últimos años la creciente contaminación ha despertado un mayor interés por parte de las entidades reguladoras hacia el cuidado del medio ambiente y la concientización de las compañías en estas prácticas, es por esto que cobra gran importancia el tratamiento de las aguas residuales de la industria petrolera, debido a su intrínseca e inevitable generación y posterior disposición final. En consecuencia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible instauró la Resolución 0631 del 2015 (Norma de Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Aguas Superficiales y a los Sistemas de Alcantarillado Público), donde busca controlar y reducir con mayor exigencia y rigurosidad, las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua naturales o artificiales de agua dulce, al sistema de alcantarillado público y finalmente al consumo humano.

Por consiguiente, en este proyecto de investigación se tiene como propósito llevar a cabo un análisis comparativo de los parámetros relacionados con vertimiento de aguas asociadas a la perforación y producción mediante la recopilación de informes de cumplimiento ambiental (ICAs) de los años 2015 al 2017 disponibles en la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) para determinar cuáles campos ubicados en los Departamentos del Meta y Casanare incumplirían, en caso de que la normativa estuviera actualmente vigente, con las concentraciones máximas permisibles establecidas para dicho proceso, y de esta manera proponer tratamientos que sirvan como alternativa de solución para aquellos campos que llegasen a sobrepasar los límites establecidos.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Harving Díaz Consuegra, Ingeniero de Petróleos, Especialista en Ingeniería Ambiental

Abstract

TITLE: FULFILLMENT ANALYSIS FOR THE DISCHARGES OF DRILLING AND PRODUCTION WASTEWATER IN THE DEPARTMENT OF META AND CASANARE FIELDS DURING THE YEARS 2015 TO 2017, ACCORDING TO RESOLUTION 0631 OF 2015*

AUTHORS: ANDREA VERONICA BARRERA AMOROCHO

ANDRES FELIPE BERMEJO PEÑA**

KEYWORDS: DISCHARGES, DRILLING, PRODUCTION, WASTEWATER, REGULATION, RESIDUAL, INDUSTRIAL

DESCRIPTION:

During the last years the increasing contamination has aroused a greater interest on the part of the regulating entities towards the care of the environment and the awareness of the companies in these practices. This is why the wastewater treatment of the oil and gas industry becomes quite important, due to its intrinsic, unavoidable generation and subsequent discharge. As a result, the Ministry of Environment and Sustainable Development established Resolution 0631 of 2015 (Regulation of Specific Discharges to Surface Water Bodies and Public Sewage Systems), where it seeks to control and reduce with greater exigency, the polluting substances reaching the rivers, lagoons, natural or artificial bodies of fresh water, the public sewage system and finally human consumption.

Therefore, this research project aims to carry out a shared analysis of the parameters related to water discharge associated with drilling and production through the compilation of environmental compliance reports (ICAs) during the years 2015 to the 2017 available in the National Authority of Environmental Licenses (ANLA) to determine which fields located in the Departments of Meta and Casanare would not comply, in case the regulation is currently in force, with the maximum permissible concentrations established, and in this way propose treatments that serve as an alternative solution for those fields that exceed the established limits.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Harving Díaz Consuegra, Ingeniero de Petróleos, Especialista en Ingeniería Ambiental

Introducción

El agua se ha consolidado como el medio indispensable para cualquier alternativa de futuro, puesto que en general no existe una actividad realizada por el hombre: económica, social, industrial o política que pueda prescindir de este preciado recurso.

Actualmente, en el mundo se está comenzando a prestar mayor atención a lo que concierne a cuestiones ambientales relacionadas con el consumo y uso del agua, debido a que, con el aumento en la contaminación, el tratamiento inadecuado de desechos y la insuficiencia de infraestructuras para la desinfección del agua, se plantean serias amenazas para el sostenimiento de los ecosistemas, la salud pública y el desarrollo económico y social de los países.

Esta conciencia ha hecho que los países establezcan planes de acción y leyes gubernamentales, con las cuales demuestran su interés y compromiso hacia la protección del medio ambiente. Por esto en Colombia, el 17 de marzo de 2015, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la Resolución 0631 de 2015, que modifica el Decreto 1594 de 1984, establece los parámetros objeto de análisis y fija límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y sistemas de alcantarillado público realizados por los ocho sectores económicos del país. Esta resolución al ser más restrictiva y exigente que el decreto anterior, podría afectar directamente la viabilidad operacional de las compañías que desarrollan actividades en el sector de los hidrocarburos, llegando a producir en algunos casos sanciones, multas, cierres de instalaciones e incluso pérdidas de producción.

En este momento la resolución se encuentra en régimen de transición y da la oportunidad a las empresas de implementar planes de reconversión a tecnologías limpias, con las que tendrían la

posibilidad de estar cumpliendo con la normatividad establecida una vez la norma de vertimientos se encuentre en vigencia. Por esta razón, mediante esta investigación se busca realizar el análisis del cumplimiento de los vertimientos de aguas residuales industriales asociadas a la perforación y producción de los campos ubicados en los departamentos del Meta y Casanare, durante los años 2015, 2016 y 2017, con el fin de establecer qué parámetros se estarían incumpliendo y posterior a esto plantear alternativas tecnológicas y de tratamiento que ayuden a minimizar las concentraciones para poder cumplir con lo planteado por el Ministerio.

1. Marco Teórico

1.1 Agua de perforación

Para el proceso de perforación es indispensable la utilización de fluidos que pueden ser de dos tipos: Base agua y base aceite (principalmente diesel). La composición química de estos varía de pozo a pozo, o aún dentro de un mismo pozo; entre los componentes más utilizados se incluyen: arcillas, baritina y aditivos químicos. Muchos de los aditivos pueden hallarse mezclados con el petróleo y sales provenientes de las formaciones que pueden ser sumamente alcalinos, otros son altamente tóxicos y pueden incluir biocidas, bactericidas, anticorrosivos, espesantes y sustancias químicas para controlar el PH.

Estudios realizados establecen que la composición química de los desechos de perforación normalmente contiene cantidades considerables de una variada gama de contaminantes tóxicos,

como aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, plomo, magnesio, mercurio, níquel, zinc, benceno, naftalina y otros hidrocarburos, así como niveles tóxicos de sodio y cloruros (CENSANT AGUA VIVA, 2002)

En esta etapa se generan grandes cantidades de residuos sólidos o cortes de perforación. En la región de la Orinoquia, más exactamente en el piedemonte donde por cuestiones geológicas la mayoría de los yacimientos se encuentran a profundidades considerables, es claro que la generación de estos residuos es un problema mayor. El inconveniente en este caso no se produce por el volumen de sólidos que se generan, sino por la toxicidad de estos, ya que estuvieron en continuo contacto con el fluido de perforación, por lo que es muy común tener cortes de agua con impregnaciones de aceites o cualquier otro contaminante (Navarro, 1995, págs. 65-72).

Según la ACP, en el año 2015 la cantidad de pozos perforados fue de 735, de los cuales 25 son exploratorios y 710 de desarrollo. En los pozos exploratorios se trataron y vertieron 1 M m³ y en los de desarrollo la cantidad llegó a ser de 52 M m³ correspondientes a aguas residuales industriales (ACP, 2015, pág. 20).

1.2 Agua Producida

Al agua se le ha llamado solvente universal, hasta cierto punto disuelve casi todos los compuestos inorgánicos, debido a esta característica al estar en contacto durante cientos de años con formaciones rocosas se ha generado la mayoría de los problemas presentes en el agua contaminada, llamada comúnmente en la industria petrolera “agua producida” (Guía Ambiental de ARPEL No.1).

La perforación de pozos petroleros da lugar a grandes cantidades de “agua producida”, la cual se obtiene en superficie (con o sin hidrocarburos) en los procesos de extracción de crudo o gas y proviene de dos fuentes: agua asociada al yacimiento (acuífero), esta se deposita debajo de los hidrocarburos; y el agua inyectada, usada para mantener la presión o como parte de proyectos de recuperación secundaria (Vival Water Technologies. Perú, s.f.) Esta suele ser salmuera, salobre o salada y en raras situaciones fresca, debe separarse de los hidrocarburos con métodos de tratamiento económico y ecológicamente amigable, para que pueda ser reutilizada o eliminada de forma segura, cumpliendo así con las normas gubernamentales y evitando sanciones para las compañías que operan los campos; de no ser así, la ley es clara en las sanciones y multas que se deben aplicar, tal como cierres de pozos y por ende pérdidas de producción, entre otros.

La composición y concentración de estas aguas puede variar entre campos e incluso entre diferentes zonas de producción dentro de un solo campo, además de hidrocarburos pueden contener sustancias como sólidos disueltos, sólidos precipitados, gases disueltos, emulsiones de aceite en agua, concentraciones de aceite disuelto, aceite dispersado, sustancias tóxicas, materiales radiactivos naturales y bacterias, influyendo estos en la complejidad de su tratamiento (Arnold & Stewart, 2008, págs. 482-498).

A nivel mundial las compañías petroleras producen un promedio de 3 barriles de agua contaminada por cada barril de petróleo, mientras que en Colombia se generan 12 barriles de agua por cada barril de petróleo puesto en superficie (ACP, 2015, pág. 25). (Ver figura 1).

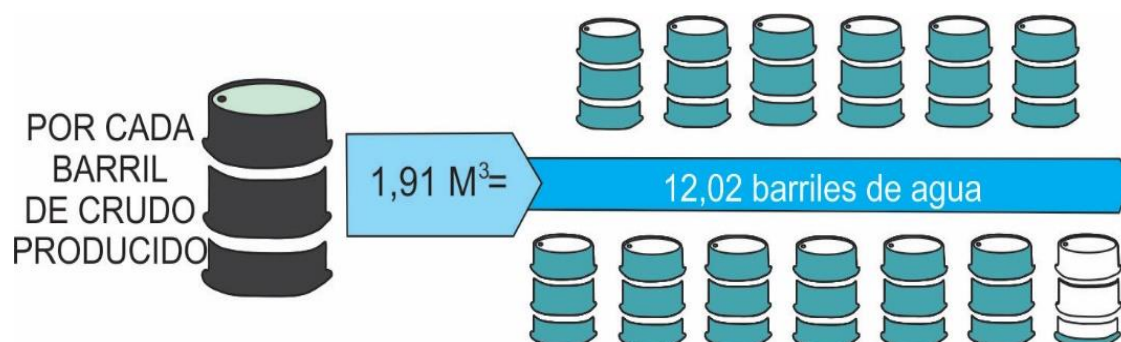


Figura 1. Por cada barril de petróleo producido se generan 12 barriles de agua. Adaptado de ACP. (2015) Informe de desempeño ambiental.

Dependiendo de las características del yacimiento y del tiempo de actividad del pozo, el agua puede aumentar al punto de representar más del 90% del líquido producido, es el caso del campo Rubiales, el cual es operado por Ecopetrol y se encuentra ubicado en el departamento del Meta. En este se manejan volúmenes de agua de alrededor del 96%, es decir, por cada barril de crudo que se produce, se generan unos 30 de agua (Vargas, 2016).

1.3 Marco Legal Colombiano

La facilidad de regeneración del agua y su aparente abundancia, hace que sea el vertedero habitual en el que se arrojan de manera indiscriminada los residuos producidos por las actividades realizadas por el hombre tales como: pesticidas, desechos químicos, metales pesados y residuos radiactivos, entre otros, causando que grandes volúmenes los cuales pueden llegar a ser peligrosos para la salud humana, y los ecosistemas.

Hoy en día, la escasez del agua, el aumento de la contaminación, el tratamiento inadecuado de los desechos y la falta de instalaciones para la purificación del agua para su posterior aprovechamiento, centran la atención de los gobiernos en el consumo y uso de esta, ya que los

problemas nombrados plantean serias amenazas para el sostenimiento de los ecosistemas, la salud pública y el desarrollo económico y social de los países (Frers, 2005). Debido a esta concientización, se hace necesario poner mayor atención a las actividades específicas de las compañías exploradoras y productoras, tanto privadas como estatales, exigiéndoles que demuestren su compromiso con la protección del medio ambiente mediante la adopción de políticas gubernamentales y corporativas, y la actuación concreta en los diferentes campos.

El seguimiento de estos requisitos puede traer beneficios significativos a las compañías y a la industria por medio del reconocimiento internacional y ahorros económicos importantes, incluso limitar la exposición a futuras demandas judiciales por daños y perjuicios y gastos de limpieza ambiental (Viana, s.f.).

Con el pasar de los años, en Colombia se han implementado leyes y decretos con la finalidad de controlar y reducir la contaminación causada por el uso del agua; estas se han ido modificando hasta llegar a lo que se tiene establecido hoy en día. (Ver Figura 2).

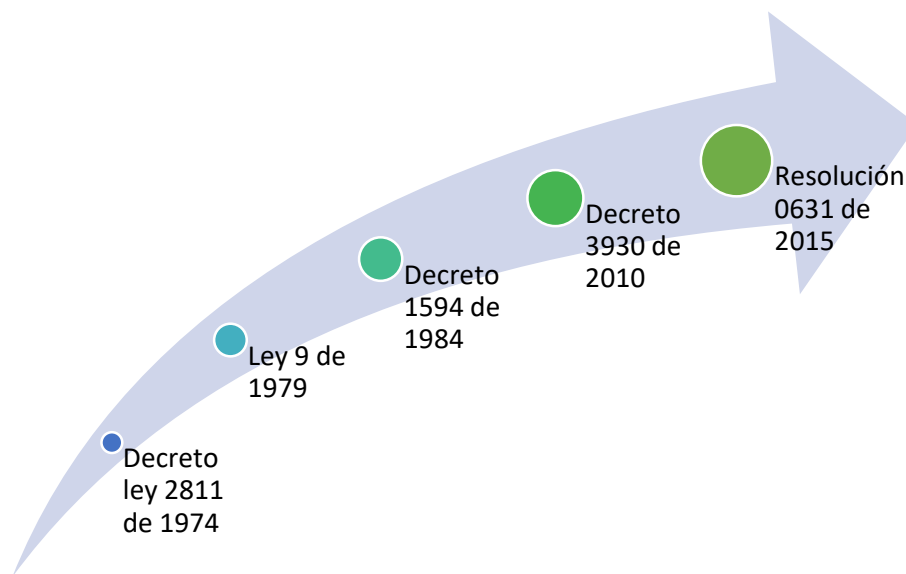


Figura 2. Línea del tiempo del marco legal colombiano aplicado a los recursos hídricos. Adaptado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

1.3.1 Decreto 2811 de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En el se establece que el ambiente es patrimonio común y que el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, y que la preservación y manejo de los recursos naturales renovables también son de utilidad pública e interés social (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2014, pág. 14).

Este código tiene por objeto lograr la preservación y restauración del medio ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad que aseguren el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de éstos y la máxima participación social, para beneficio de la salud y bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio nacional (Lizarazo & Orjuela, 2013, pág. 28)

1.3.2 Ley 9 de 1979. Recibe el nombre de Código Sanitario Nacional. Implanta medidas para el control y saneamiento, necesarias para preservar, restaurar y mejorar la salud humana. Asimismo, los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de la disposición de residuos y materiales que afecten o puedan afectar las condiciones sanitarias del ambiente (Rodriguez & Lopez, 2017, pág. 36).

1.3.3 Decreto 1594 de 1984. Establece los parámetros para los diversos tratamientos de aguas de acuerdo a su uso y disposición y que un agua residual debe haber tenido una remoción de la carga orgánica del 80% como mínimo para ser vertida a una fuente superficial.

El decreto estipula que ninguna actividad industrial, proyecto minero ni obra pública podrá comenzar sin haber presentado a las autoridades ambientales garantías suficientes de que su

operación o etapa de construcción tendrá un impacto mínimo sobre el medio ambiente con una remoción adecuada de la carga orgánica y que los monitoreos desarrollados por un laboratorio especializado deben demostrar que la calidad del vertimiento cumple con los requerimientos del Decreto en todos los parámetros que este plantea (pH, temperatura, remoción de grasas y aceites, remoción de sólidos suspendidos, remoción de demanda bioquímica de oxígeno, fenoles, metales pesados, entre otros) (Atcal, 2015).

1.3.4 Decreto 3930 de 2010. Deroga el Decreto 1594 de 1984 excepto el artículo 20 y 21 y fija un régimen de transición legal que deja vigente transitoriamente (artículo 76), además implanta las disposiciones, el ordenamiento y los vertimientos del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En este decreto no se especifican los valores permitidos para los vertimientos relacionados con actividades realizadas en el sector hidrocarburos.

1.3.5 Resolución 0631 de 2015. Conocida como Norma de Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Aguas Superficiales y Sistemas de Alcantarillado Público, establece los parámetros objeto de análisis y los valores límites máximos permisibles, que deben reportarse por todos aquellos que realicen actividades industriales, comerciales o de servicios, a la hora de hacer vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Algo a resaltar es que esta Resolución no incluye los vertimientos realizados a aguas marinas o suelos (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

La nueva norma de vertimientos reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 del 2010 y actualiza el decreto 1594 de 1984. Esta permite el control de las sustancias contaminantes, a partir de la

cantidad de sustancias descargadas que llegan a los cuerpos de agua vertidas por 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país:

- Agroindustria
- Ganadería
- Minería
- Hidrocarburos
- Elaboración
- Elaboración de productos alimenticios y bebidas
- Fabricación y manufactura de bienes
- Actividades industriales, comerciales o de servicio que generan ARD y los préstamos de servicio público de alcantarillado
- Actividades relacionadas con servicios y otras actividades

Para el sector hidrocarburos se definen 40 parámetros que deberán ser reportados por los responsables de actividades relacionadas con petróleo crudo, gas natural y derivados, ante la Autoridad Ambiental competente, quienes a su vez reportarán la información al Sistema de Información de Recurso Hídrico. Cada etapa de la cadena tiene sus valores específicos dependiendo del área de Upstream o Downstream a partir de la que se realice la entrega de los resultados de las caracterizaciones realizadas a las aguas (exploración, producción, refino, ventas y distribución o transporte y almacenamiento).

Con los resultados de los estudios efectuados, la empresa debe analizar el grado de cumplimiento de los parámetros medidos de acuerdo a su actividad económica y establecer planes de acción para asegurar que se cumpla cada uno de ellos, y a su vez consignarlos en sus programas

de gestión ambiental correspondientes (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

El tiempo de implementación y el régimen de transición para la aplicación de la norma comienzan desde el 18 de abril del 2015. El Ministerio de Ambiente establece un tiempo de transición para la aplicación de la presente normativa de la siguiente forma:

1. Si la empresa cuenta con el permiso de vertimientos actualmente y cumple con todos los parámetros exigidos a la fecha, se otorgan 2 años para efectuar la transición; por lo cual el plazo vence en el 2017.
2. Para aquellas empresas que actualmente cuentan con los permisos de vertimientos, cumplen con la normatividad actual y adicionalmente optan por implementar un plan de reconversión a tecnologías limpias antes del primer año de entrada en vigencia de norma, se otorgan en total 5 años para efectuar la transición; por lo cual el plazo vence en abril de 2020.
3. Si la empresa cuenta con el permiso de vertimientos actualmente pero no cumple con todos los parámetros exigidos a la fecha, se otorgan 18 meses para efectuar la transición; por lo cual el plazo vencía en octubre de 2016.
4. Para aquellas empresas que actualmente cuentan con los permisos de vertimientos, aunque no cumplen con toda la normatividad actual, pero optan por implementar un plan de reconversión a tecnologías limpias se otorgan en total 4 años y 6 meses para efectuar la transición; por lo cual el plazo vence en octubre de 2019.
5. Las empresas que no cuentan con el permiso de vertimientos y por ende no presentan un plan de reconversión a tecnologías limpias, deberán entrar a cumplir con los parámetros establecidos en la nueva resolución.

Una vez cumplido el plazo, las empresas que no cumplan con los límites máximos permisibles en los vertimientos de las aguas residuales, podrán hacerse acreedores de sanciones, penalidades y/o comparendos ambientales (Atcal, 2015)

1.4 Tratamientos

Hoy en día los ingenieros aplican un proceso de pasos múltiples, sustentado por un sofisticado arreglo de técnicas y herramientas utilizadas para diagnosticar y disminuir las concentraciones de elementos que se encuentran asociadas a la presencia de agua, ya que si las aguas son vertidas directamente sin el debido procesamiento, es bastante probable que se introduzcan sustancias que acaben produciendo daños ecológicos y enfermedades que afecten a las personas y comunidades que entren en contacto con los efluentes. El diseño y construcción del sistema es complejo y varía de acuerdo a las propiedades del agua, el espacio disponible y los costos estos implican (ver Figura 3).

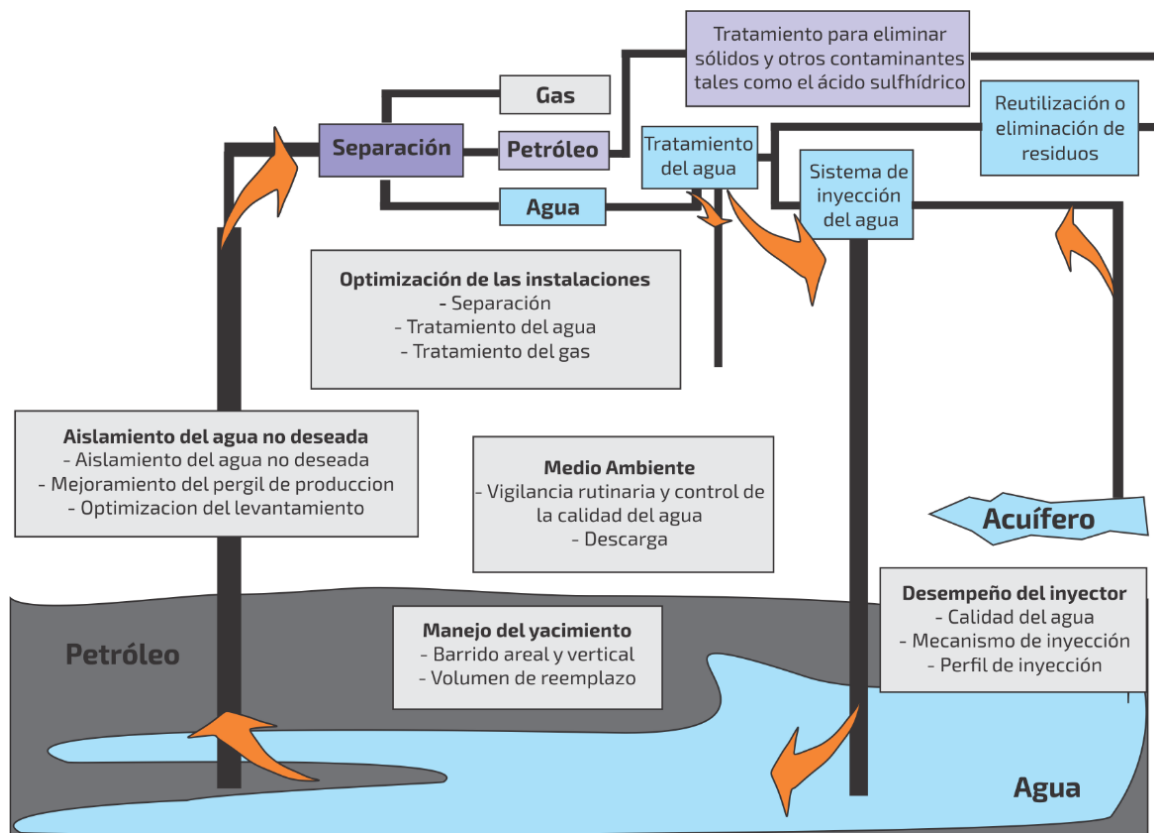


Figura 3. Complejidad del sistema de agua en un campo petrolero. Adaptado de Arnold, Richard. Manejo de la producción de agua: De Residuo a Recurso. Oilfield Review Schlumberger, 2010.

Debido a la complejidad del sistema de tratamientos de aguas residuales, existe una gran variedad de tratamientos físicos, químicos o biológicos, con diferentes grados de efectividad, cuya finalidad es la eliminación o reducción de las características no deseables, los cuales están en función de las propiedades de las aguas y de su destino final, haciéndose necesario un minucioso estudio para caracterizarla y posteriormente elegir la técnica y los equipos adecuados. (Ver Figura 4).

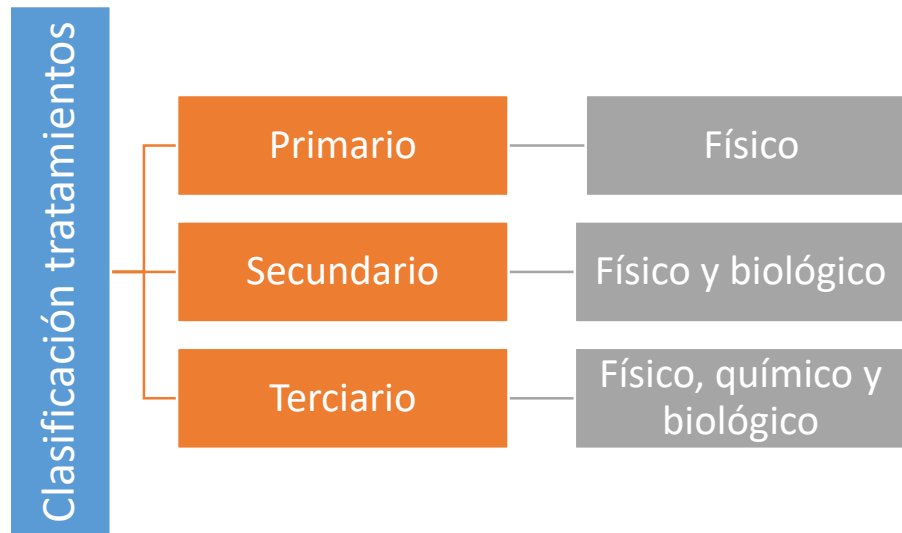


Figura 4. Clasificación de tratamientos para aguas residuales.

1.4.1 Tratamiento primario. Se emplea para la reducción de sólidos en suspensión, materiales flotantes y compuestos que requieren principalmente de procesos físicos o mecánicos sin afectar la composición química del agua a tratar, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario (Ramalho S., s.f., pág. 91) Por lo regular, el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual y un 35 a 40% de la DBO5 (Romero Rojas, 1999, págs. 129-131). Entre los tipos de tratamiento primario se encuentran:

Sedimentación primaria.

Flotación.

Precipitación química.

Filtros gruesos.

Oxidación química.

Coagulación, flotación, sedimentación y filtración.

1.4.2 Tratamiento secundario. Esta técnica reduce o convierte la materia orgánica residual o disuelta en sólidos sedimentables que puedan ser separados por sedimentación en tanques de decantación, sin llegar necesariamente a disminuir los cloruros del agua, es decir, buscan principalmente la remoción de hierro, bajar la dureza del agua (Remoción de calcio y magnesio) y eliminar orgánicos solubles y componentes biológicos. Los tratamientos biológicos de esta categoría tienen una eficiencia remocional de la DBO entre 85% al 95% (Rojas, 2002, pág. 13) y están compuestos por:

Lodos activados.

Lagunas de estabilización y aireadas.

Filtración bilógica.

Radiación UV.

1.4.3 Tratamiento terciario. Es el método adicional de carácter físico, químico o biológico, que tiene como objetivo fundamental la eliminación sólidos suspendidos, sustancias disueltas como la materia orgánica y contaminantes que no desaparecen después de tratamientos secundarios (Hammeken Arana & Romero García, s.f., pág. 47), especialmente cloruros y eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes, con el fin de lograr efluentes puros, con menor carga contaminante y que puedan ser utilizados en diferentes usos (Arnold & Stewart, 2008).

Las sustancias o compuestos comúnmente removidos son:

- a. Fosfatos y nitratos
- b. Huevos y quistes de parásitos
- c. Sustancias tenso activas.

- d. Algas
- e. Bacterias y virus
- f. Sólidos totales y disueltos.

Estos tratamientos pueden ser físicos, químicos y biológicos, y entre ellos se encuentran:

Filtración

Absorción

Adsorción de carbón activado

Evaporación térmica

Condensación

Nanofiltración

Osmosis inversa

1.5 Métodos de disposición del agua residual

Anteriormente, se disponía del agua salada o producida de forma tal que causaba serios problemas ambientales. Los efectos de muchos de los problemas no fueron notados rápidamente debido a la naturaleza de la descarga del producto (agua) y porque muchas de las descargas ocurrieron en zonas remotas y de poca población. A continuación, se enumeran algunos de los métodos de disposición empleados sin considerar su efecto sobre el medio ambiente, y no debe interpretarse como una recomendación de los mismos:

1.5.1 Vertimientos a cuerpos de aguas superficiales. La descarga de agua producida residual se mezcla con arroyos, ríos y lagos o cualquier otro cuerpo superficial en un punto autorizado por la autoridad ambiental (Lopez & Rodriguez, 2015).

1.5.2 Evaporación. En las zonas áridas donde por aumento de la temperatura, el agua que se encuentra en fase líquida pasa a fase gaseosa y se regresa al ambiente.

1.5.3 Inyección en pozo poco profundo. La inyección en pozos poco profundos es popular en algunas zonas del país. El riesgo de contaminación de las capas freáticas poco profundas y del agua potable subterránea aumenta a medida que disminuye la profundidad de inyección.

1.5.4 Inyección en pozo disposal. Pozos mediante los cuales se realiza la inyección de las aguas de producción a una formación subterránea profunda diferente y aislada de la formación productora. El propósito de un pozo disposal es servir de canal para disponer las aguas en el acuífero confinado. Además de garantizar que el fluido de inyección no entre en contacto con otras zonas de interés como acuíferos someros o la formación productora.

1.5.5 Inyección para mantenimiento de presión, recuperación secundaria. Los fluidos son reinyectados para apoyar la recuperación adicional de petróleo del campo.

Cuando la disposición produce daño al medio ambiente, se exigen programas correctivos a la industria. Estos programas probablemente requerirán altos niveles de desembolso, multas y otras medidas punitivas, la demostración de que los métodos de tratamiento para disposición propuestos evitarán problemas adicionales y que las opciones de tratamiento para la corrección de los

problemas causados serán las más adecuadas. El Programa de Acción Correctiva* de los Estados Unidos de Norte América proporciona detalles de estos programas.

1.5.6 Recarga de acuíferos. En 1962, en Whitter Narrows (Los Angeles County), California, se abordó el primer proyecto de gran alcance de recarga de acuíferos con agua residual, después de evaluar los impactos que estas podrían producir sobre la salud pública, llegando a la conclusión de que no se producía ningún impacto negativo apreciable sobre el agua subterránea de la zona, ni sobre la población que la consumía.

Este método se realiza mediante balas de infiltración, o por inyección directa en acuíferos subterráneos y se usa para: (1) reducir, detener, o incluso invertir, los fenómenos de descenso del nivel del agua subterránea, (2) proteger el agua dulce de acuíferos cercanos a la costa frente a la intrusión de aguas saladas marinas, y (3) almacenar agua residual recuperada y agua superficial, incluyendo aguas procedentes de inundaciones, para su uso futuro.

1.5.7 Otros usos. Hoy en día, la falta de fuentes de suministro alternativas, los grandes volúmenes de aguas residuales y los tratamientos aplicados a estas aguas, hace que la mayoría de las industrias implanten planes de reutilización doble, para que de esta manera, puedan ser dispuestas en terrenos, contribuyendo a la evacuación de los vertidos, ayudando a la producción de cultivos y otros usos beneficiosos, tales como: recuperación silvopastoril, riego de campos de golf, parques, cementerios, zonas residenciales y espacios verdes y reciclaje y reutilización industrial, como por ejemplo, enfriamiento de metales primarios y procesado de aceros, como en

* Corrective Action: Technologies and Application, US Environmental Protection Agency, Seminar Publication, September 1989, Centre for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio, 45268. Presented at the First International Symposium on Oil and Gas Exploration and Production Waster Management Practices, September 10-13, 1990, New Orleans, Louisiana, Sponsored by U.S. EPA.

el caso de Bethlehem Steel Company (Metcalf & Eddy, 1995, pág. 1288). La resolución 1207 de 2014 ofrece información asociada a los usos que le pueden dar a las aguas residuales tratadas.

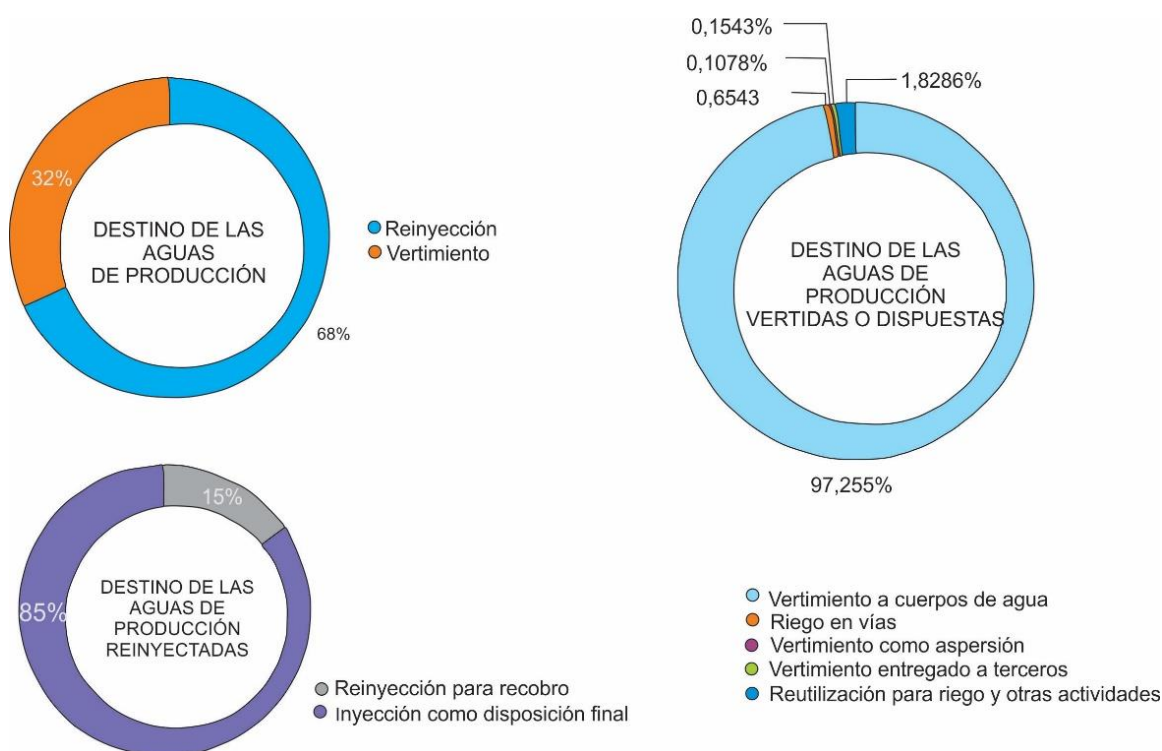


Figura 5. Usos de aguas residuales de producción. Modificado de ACP. Informe de desempeño ambiental. 2015

2. Desarrollo de la Investigación

La realización de este proyecto tiene como objeto realizar una evaluación de los cumplimientos de los parámetros asociados a las aguas de perforación y producción, en campos ubicados en los departamentos del Meta y Casanare, para de esta forma determinar cuáles son los parámetros

críticos que se estarían incumpliendo, suponiendo que la resolución 0631 de 2015 ya se encontrara en vigencia.

Para obtener la información, primero enviamos un derecho de petición vía correo electrónico, a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), solicitando información de campos que estuviesen en etapa de exploración y de desarrollo en los departamentos del Meta y Casanare que realizaran vertimientos de aguas residuales industriales (ARI) a cuerpos de aguas superficiales desde el año 2015. Luego de 15 días hábiles, obtuvimos respuesta de algunos datos previos tales como: tipo de proyecto, número de radicado, departamento y campo. En el mes de Julio, programamos una visita a la ANLA, en la que nos permitieron revisar en su base de datos cuales eran los campos de interés para nuestra investigación, luego de ello, realizamos la entrega de una copia del recibo de consignación, un disco duro y una carta en la cual se especificaban los números de los expedientes, radicados, ICAS y número de CD's, esto con el propósito de recibir los soportes y la documentación. Luego de 1 mes, nos facilitaron la información haciéndola llegar hasta la dirección de residencia.

De los 20 informes solicitados a la ANLA, solo se usaron 13 debido a que algunos se encontraban en mal estado y otros solo contaban con información de los reportes de parámetros de aguas residuales domésticas, superficiales, subterráneas o aguas residuales industriales (ARI) que eran usadas para inyección, por consiguiente, hubo limitaciones en la información recopilada.

Una vez recopilada la información, se clasificó y se prosiguió a evaluar el cumplimiento de cada parámetro según el límite máximo permitido por la nueva normatividad, estableciendo así cuáles propiedades tendrían una tendencia a incumplir si hiciéramos la suposición de que la Resolución 0631 del 2015 se encontrara vigente al momento de la generación de los ICA correspondientes a cada campo, esto con el fin de identificar los parámetros críticos en los cuales

la industria petrolera va a tener que enfocar recursos para inversión de tecnologías y mejoras en los sistemas de tratamientos de las aguas producidas en sus actividades.

A continuación, en la Tabla 1 se presentan generalidades de los campos en los que se centrará este estudio.

Tabla 1.

Generalidades de los campos evaluados.

Proyecto	Campo	Ubicación	Empresa Operadora	Fluido Producido
Área de desarrollo Pauto	CFP Floreña	Yopal-Casanare	Equion Energía Limited	
Área de Desarrollo Dorotea	Dorotea	Puerto Gaitán- Meta	New Granada Energy Corporation	Crudo y gas
Campo de Explotación Rancho Hermoso	Rancho Hermoso	Orocué-Casanare	Canacol Energy Colombia S.A	Crudo y gas
Campo de Producción Casimena	Casimena	Maní/Orocué-Casanare	Pacific Rubiales	Crudo y gas
Bloque de Producción Jilguero	Jilguero Sur	Maní/Tauramena-Casanare	Cepsa Colombia S.A (CEPCOLSA)	Crudo
Área de Explotación de hidrocarburos Quifa	Quifa	Puerto Gaitán-Meta	Meta Petroleum CORP	Crudo
Campo de Explotación Ocelote Guarrojo	Ocelote	Puerto Gaitán- Meta	Hocol	Crudo y gas
	Rubiales	Puerto Gaitán- Meta	Ecopetrol S.A	
Operación y Desarrollo de proyectos campo Castilla	Castilla	Castilla La Nueva-Meta	Ecopetrol S.A	Crudo y agua
Operación y Desarrollo de	Chichimene	Villavicencio-Meta	Ecopetrol S.A	Crudo y agua

Proyecto	Campo	Ubicación	Empresa Operadora	Fluido Producido
proyectos campo Chichimene				
Explotación y Desarrollo campo Canacabe	Canacabe	Orocué-Casanare	Colombia Energy Development CP (CEDCO)	Crudo y gas
Área de Desarrollo Caracara	Peguita	Puerto Gaitán-Meta	Cepsa Colombia S.A	Crudo
Desarrollo de actividades de producción en el Bloque Cravoviejo		Orocué-Casanare	C&C Energía (Barbados) Sucursal Colombia	Crudo

3. Comparación entre el Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 de 2015

En la tabla 2, se pueden observar los parámetros que eran objeto de análisis y reporte en el capítulo VI, específicamente en los artículo 72 y 74 del decreto 1594 de 1984, los cuales establecen lineamientos y concentraciones que no se debían exceder cuando se realizaban vertimientos a cuerpos de agua, los indicadores fisicoquímicos de aguas residuales no domésticas (ARND) y sus límites máximos permisibles, enunciados en el capítulo VI, artículo 11, del sector hidrocarburos de la resolución 0631 de 2015. Esto se hace con la finalidad de presentar los cambios, modificaciones y los factores que fueron añadidos.

Tabla 2.

Cuadro comparativo entre el decreto 1594 de 1984 y la resolución 0631 de 2015

Parámetro	Decreto 1594 de 1984				Resolución 0631 de 2015			
	Usuario nuevo		Usuario existente		Perforación		Explotación	
	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor
pH	Unidades	5-9	Unidades	5-9	Unidades	6-9	Unidades	6-9
Temperatura	°C	<40	°C	<40	°C	40	°C	40
Grasas y aceites	Kg/d	R>80% en carga	Kg/d	R>80% en carga	mg/L	15	mg/L	15
Sólidos suspendidos (SST)	Kg/d	R>50% en carga	Kg/d	R>80% en carga	mg/L	50	mg/L	50
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	Kg/d	R>20% en carga	Kg/d	R>80% en carga	mg/L	200	mg/L	60
Arsénico	mg/L	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,1	mg/L	0,1
Bario (Ba)	mg/L	5	mg/L	5	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Cadmio (Cd)	mg/L	0,1	mg/L	0,1	mg/L	0,1	mg/L	0,1
Cobre (Cu)	mg/L	3	mg/L	3	mg/L	1	mg/L	1
Cromo (Cr)	mg/L	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,5
Fenoles	mg/L	0,2	mg/L	0,2	mg/L	0,2	mg/L	0,2
Mercurio (Hg)	mg/L	0,02	mg/L	0,02	mg/L	0,01	mg/L	0,01
Níquel (Ni)	mg/L	2	mg/L	2	mg/L	0,5	mg/L	0,5
Plata (Ag)	mg/L	0,5	mg/L	0,5	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Plomo (Pb)	mg/L	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,2	mg/L	0,2
Cianuro (CN-)	mg/L	1	mg/L	1	mg/L	1	mg/L	1
Difenil policlorados	mg/L	N.D.	mg/L	N.D.	-	-	-	-
Mercurio orgánico (Hg)	mg/L	N.D.	mg/L	N.D.	-	-	-	-

Parámetro	Decreto 1594 de 1984				Resolución 0631 de 2015			
	Usuario nuevo		Usuario existente		Perforación		Explotación	
	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor
Tricloroetileno	mg/L	1	mg/L	1	-	-	-	-
Cloroformo	mg/L	1	mg/L	1	-	-	-	-
Tetracloruro de carbono	mg/L	1	mg/L	1	-	-	-	-
Dicloroetileno	mg/L	1	mg/L	1	-	-	-	-
Sulfuro de carbono	mg/L	1	mg/L	1	-	-	-	-
Sólidos								
Sedimentables (SSED)	-	-	-	-	mL/L	1	mL/L	1
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Hidrocarburos Totales (HTP)	-	-	-	-	mg/L	10	mg/L	10
Hidrocarburos Aromáticos Policrílicos (HAP)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Fósforo Total (P)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.

Parámetro	Decreto 1594 de 1984				Resolución 0631 de 2015			
	Usuario nuevo		Usuario existente		Perforación		Explotación	
	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor
Nitratos (N-NO3)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Ortofosfatos (P-PO43-)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Nitrógeno Total (N)	-	-	-	-	mg/L	10	mg/L	10
Cloruros (Cl-)	-	-	-	-	mg/L	1200	mg/L	1200
Sulfatos (SO42-)	-	-	-	-	mg/L	300	mg/L	300
Sulfuros	-	-	-	-	mg/L	1	mg/L	1
Zinc (Zn)	-	-	-	-	mg/L	3	mg/L	3
Hierro (Fe)	-	-	-	-	mg/L	3	mg/L	3
Selenio (Se)	-	-	-	-	mg/L	0,2	mg/L	0,2
Vanadio (V)	-	-	-	-	mg/L	1	mg/L	1
Acidez Total	-	-	-	-	mg/L CaCO3	A.R.	mg/L CaCO3	A.R.
Alcalinidad Total	-	-	-	-	mg/L CaCO3	A.R.	mg/L CaCO3	A.R.
Dureza Total	-	-	-	-	mg/L CaCO3	A.R.	mg/L CaCO3	A.R.

Parámetro	Decreto 1594 de 1984				Resolución 0631 de 2015			
	Usuario nuevo		Usuario existente		Perforación		Explotación	
	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor
Dureza	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Cálcica	-	-	-	-	CaCO ₃	A.R.	CaCO ₃	A.R.
Fluoruros (F)	-	-	-	-	mg/L	A.R.	mg/L	A.R.
Color Real	-	-	-	-	m-1	A.R.	m-1	A.R.

El cambio más sustancial que se hizo en la Resolución 0631 de 2015 fue el pasar de realizar una medición del porcentaje de remoción de carga contaminante a hacer una medición de la cantidad de sustancias descargadas, que es lo que impacta en la calidad del agua. La revisión de los valores a partir de la concentración va a permitir tener un parámetro fijo a cumplir según la actividad productiva que se esté implementando, logrando una mayor exigencia en el control de lo que se está depositando en las arterias fluviales del país.

Por consiguiente, se modificaron 3 parámetros que en el decreto 1594 se encontraban como remoción y se medían en kg/d, y ahora en la nueva resolución están en mg/L, estos son:

- Grasas y aceites.
- Sólidos Suspendidos Totales (SST).
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

Adicionalmente, se modificaron 6 parámetros, en donde a cada uno se le cambió su límite máximo permisible en la resolución vigente actualmente:

- Arsénico (As)
- Cobre (Cu)
- Mercurio (Hg)
- Níquel (Ni)

- Plomo (Pb)
- pH

Por otra parte, se excluyeron 11 parámetros, que anteriormente se encontraban en el decreto 1594 de 1984:

- Difenil policlorados
- Mercurio orgánico (Hg)
- Tricloroetileno
- Cloroformo
- Tetracloruro de carbono
- Dicloroetileno
- Sulfuro de carbono
- Otros compuestos organoclorados, cada variedad
- Compuestos organofosforados, cada variedad
- Carbamatos
- Material Flotante

Se modificaron 2 parámetros, cambiándolos de un valor límite máximo a análisis y reporte:

- Plata (Ag)
- Bario (Ba)

Los 14 parámetros que no se encontraban en el decreto 1594 de 1984 y ahora se consideran en la Resolución 0631 de 2015 son:

- Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)
- Hidrocarburos Aromáticos Policríticos (HAP)
- BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)

- Fósforo Total (P)
- Nitratos (N-NO₃)
- Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)
- Ortofosfatos (P-PO₄³⁻)
- Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃)
- Acidez Total
- Alcalinidad Total
- Dureza Total
- Dureza Cálcica
- Color Real
- Fluoruros

Los 11 parámetros que fueron objeto de inclusión en la nueva resolución y ahora cuentan con un valor límite máximo, son:

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Sólidos Sedimentables (SSED)
- Hidrocarburos Totales (HTP)
- Nitrógeno Total (N)
- Cinc (Zn)
- Hierro (Fe)
- Selenio (Se)
- Vanadio (V)
- Cloruros (Cl⁻)
- Sulfatos (SO₄²⁻)

- Sulfuros (S2-)

La adición de estos indicadores favorece al cuidado medio ambiental, ya que ahora la inspección se hará teniendo en cuenta componentes que se ven involucrados en las operaciones ejecutadas por las compañías petroleras, como por ejemplo los hidrocarburos totales y los hidrocarburos aromáticos, generando un mayor control en los vertimientos realizados.

4. Evaluación de cumplimiento de los parámetros asociados a aguas residuales industriales de los campos de Meta y Casanare de acuerdo a la Resolución 0631 de 2015

De acuerdo a la información suministrada por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), usada en el desarrollo de este proyecto de grado, en las figuras 6,7,8 y 9 se muestran los parámetros de cada campo que tienen un límite máximo permisible, establecido en la resolución 0631 de 2015. Algunos de los datos que se mencionan a continuación son de muestras de aguas residuales que fueron tomadas en el mismo lugar, pero en diferente fecha, mientras que otros corresponden a muestras ARI que fueron tomadas en diferentes lugares, pero en el mismo campo.

Los parámetros que aparecen con la convención de “parámetros de incertidumbre”, fueron denominados de esta manera debido a que los laboratorios certificados que se encargan de hacer los estudios de las aguas no cuentan con las instalaciones o tecnologías necesarias para hacer un análisis más detallado, y por este motivo reportan rangos y no un valor específico. Motivo por el cual, estos valores no serán tomados en cuenta.

Aquellos que se encuentran con color rojo, exceden el límite de las concentraciones máximas estipuladas en la norma de vertimientos actual. Al ser un indicador de un incumplimiento hipotético, debido a que la norma aún no se encuentra en vigencia, serán tomados en cuenta y se propondrán alternativas de tratamiento que permitan disminuir estos valores, con el fin de evitar futuras sanciones en el momento en el que acabe el plazo dado para la entrada en vigencia de la resolución. Los espacios en los que se encuentra el símbolo (-) no presentan datos reportados en la emisión de resultados de los informes.

INDICATIVO	CAMPO	LUGAR DE MUESTREO	FECHA DE MUESTREO	FECHA EMISIÓN RESULTADOS	ACTIVIDAD	TEMPERATURA (°C)	PH (Unidades)	CLORUROS (mg/L Cl-)
A	CPF Floreña	Eluente separador API fase I	11/09/2017	05/10/2017	Producción	-	-	-
B	Dorotea	Locación Dorotea B1	15/03/2016	07/04/2016	Producción	49	6,74	2110
C	Dorotea	Locación Dorotea B2	28/09/2016	oct-16	Producción	-	7	2324,7
D	Dorotea	Area de desarrollo Dorotea	09/12/2016	21/12/2016	Producción	58,3	8,04	2450
E	Dorotea	Locación Leona B1-B4	28/09/2016	30/09/2016	Producción	-	7	2324,7
F	Rancho Hermoso	Separador (Vasija 101)	20/06/2016	05/06/2016	Producción	68,05	6,7	553,76
G	Rancho Hermoso	Separador (vasija 101)	10/05/2017	21/06/2017	Producción	62,2	6,74	182,7
H	Casimena	STAR1 pozo Yenac	-	Abril	Producción	70,9	7,47	47,3
J	Jilguero	Pozo Jilguero 4	14/08/2015	07/03/2015	Perforación	27,5	5	186
L	Jilguero	Pozo Jilguero 1	26/01/2016	11/02/2016	Producción	72,6	7,39	40
M	Quifa	Pozo QF 523H	08/11/2016	22/11/2016	Perforación	26	8,51	225
N	Quifa	Pozo QF 503 H	15/03/2017	12/04/2017	Perforación	-	8,13	<9,9
O	Ocelote	STAR1 campo Ocelote	27/01/2016	15/02/2016	Producción	70,1	7,88	214
P	Ocelote	Pozo Ocelote 42	18/01/2016	04/02/2016	Perforación	34,2	6,84	107
Q	Ocelote	Pozo Ocelote 69H	19/01/2016	04/02/2016	Perforación	29,9	8,84	198
R	Ocelote	Pozo Ocelote 89	28/01/2016	29/02/2016	Perforación	30,5	8,47	196
S	Ocelote	Pozo Ocelote 84H	12/12/2016	23/01/2017	Perforación	31,5	7,03	133
T	Rubiales	Cluster RB 019- RB 1410 H	27/08/2017	19/09/2017	Perforación	-	7,89	30,7
U	Rubiales	Cluster RB 019- RB 1412 H	15/09/2017	10/10/2017	Perforación	-	7,68	82,4
V	Rubiales	Cluster RB 019- RB 1413 H	25/09/2017	07/11/2017	Perforación	-	8,15	98,7
W	Castilla Norte 237	Estacion Castilla II	-	26/05/2018	Perforación	25,8	7,7	1200
X	Castilla 416	Cluster 94	-	18/10/2017	Perforación	24	7,5	1800
Y	Chichimene 213	Cluster 11	-	26/09/2017	Perforación	24	7	800
Z	Canacabe	Pozo Canacabe 2	10/04/2017	12/05/2017	Perforación	-	7	89,2
AA	Peguita	Estacion Jaguar	20/08/2016	21/08/2016	Producción	-	-	16,4
AB	CPF Carrizales	Estacion bastidas a CPF Carrizales	28/11/2016	29/11/2016	Producción	47,3	8,625	122
Valores máx. Res. 0631 del 2015 (Producción)						40	6,0-9,0	1200
Valores máx. Res. 0631 del 2015 (Perforación)						40	6,0-9,0	1200
Campos en estado de producción que exceden las concentraciones de la resolución								
Campos en estado de perforación que exceden las concentraciones de la resolución								
Parámetros críticos								
Parámetros de incertidumbre								
No hay datos en el informe (-)								

Figura 6. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimientos en aguas superficiales (Temperatura, pH y cloruros) según la resolución 0631 de 2015.

INDICATIVO	SULFATOS (mg/L SO4-2)	SELENIO (mg/L)	FENOLES TOTALES (mg/L)	SÓLIDOS SEDIMENTABLES	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)	DBO5 (mg/L O2)	HIERRO (mg/L)	GRASAS Y ACEITES (mg/L)
A	-	-	<0,1	-	<10	-	-	<15
B	<5	-	-	-	14	27	0,966	15,2
C	<5	-	-	-	18	17	0,35	7,62
D	74	-	-	-	20	<5	0,835	1,62
E	<5	-	-	-	18	17	0,35	7,62
F	16,2	-	-	-	33	-	-	813
G	19,3	-	-	-	58	-	-	98,12
H	60,8	-	0,198	-	25	134	0,754	22,7
I	34,7	-	<0,002	-	9	22	0,512	2
J	278	0,00047	<0,1	-	<8	60	<0,073	<0,67
K	18	-	0,166	-	-	<5	<0,073	1,33
L	19	0,00022	<0,1	-	<8	<5	0,492	1,61
M	61,9	<0,0025	1,18	-	14	26	0,551	0,55
N	<0,63	<0,0025	<0,1	-	<10	<5	0,206	<0,2
O	-	-	<0,002	-	10	27	0,51	110
P	223	<0,005	<0,010	-	14	492	<0,2	17,4
Q	207	<0,005	<0,01	-	67,5	201	<0,2	14,7
R	58,8	<0,005	<0,01	-	16	273	0,496	3,31
S	39,1	<0,0025	0,16	-	52,5	117	0,773	0,419
T	-	<0,0025	<0,1	-	<10	<5	-	<0,2
U	-	<0,0025	<0,1	-	12,5	<5	-	<0,2
V	-	<0,0025	<0,1	-	<10	<5	-	<0,2
W	60	-	-	-	15	-	-	-
X	80	-	-	-	12	-	-	-
Y	10	-	-	-	10	-	-	-
Z	-	<0,0025	<0,1	-	<10	7,41	0,38	<0,2
AA	19,11	<0,005	0,09	-	15	31	1,38	31
AB	-	-	<0,002	-	<2	<2	<0,10	14,5
	300	0,2	0,2	1	50	60	3	15
	300	0,2	0,2	1	50	200	3	15

Figura 7. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimientos en aguas superficiales (Sulfatos, selenio, fenoles totales, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, DBO5, hierro y grasas y aceites) según la resolución 0631 de 2015.

INDICATIVO	CADMIO (mg/L)	PLOMO (mg/L)	HIDROCARBUROS TOTALES (mg/L)	ARSÉNICO (mg/L)	CRÓMO (mg/L O ₂)	DQO (mg/L)	MERCURIO (mg/L)	VANADIO (mg/L)
A	-	-	-	-	-	-	-	-
B	-	-	14,2	0,00056	-	52	-	-
C	-	-	5,18	-	-	40	-	-
D	-	-	1,17	<0,010	-	<20	-	-
E	-	-	5,18	<0,010	-	40	-	-
F	<0,01	<0,05	626	-	-	<0,103	<0,0019	-
G	<0,003	<0,006	65,31	-	<0,005	-	<0,001	-
H	<0,015	<0,052	19,8	-	<0,01	224	-	-
I	<0,010	<0,5	1,44	-	<0,1	34	-	-
J	<0,015	<0,052	<0,67	-	<0,103	101	-	-
K	<0,015	<0,052	1,11	-	<0,103	-	<0,0023	-
L	<0,015	<0,052	1,41	-	<0,103	<20	-	-
M	<0,010	<0,1	0,394	<0,0025	<0,04	56,7	<0,001	<2
N	<0,01	<0,1	<0,2	<0,0025	<0,04	16,2	<0,001	<2
O	<0,010	<0,050	80,5	-	<0,010	45	-	-
P	<0,01	<0,05	12,1	<0,01	<0,040	617	0,003	<0,1
Q	<0,01	<0,05	9,33	<0,01	<0,040	1793	0,003	<0,1
R	<0,05	<0,05	1,38	<0,01	<0,4	654	<0,002	<0,1
S	<0,01	<0,1	<0,2	<0,0025	<0,4	475	<0,001	<2
T	<0,00025	<0,1	<0,2	<0,0025	<0,04	38,2	<0,001	-
U	<0,00025	<0,1	<0,2	<0,0025	<0,04	38,8	<0,001	-
V	<0,00025	<0,1	<0,2	<0,0025	<0,04	19	<0,001	-
W	-	-	-	-	-	-	-	-
X	-	-	0,01	-	-	-	-	-
Y	-	-	0,01	-	-	-	-	-
Z	<0,00025	-	<0,2	<0,0025	<0,1	19,4	<0,001	<0,01
AA	<0,0048	0,12	21	<0,005	0,11	45	<0,002	0,007
AB	<0,1	<0,05	11,2	<0,1	<0,10	<30	-	-
	0,1	0,2	10	0,1	0,5	180	0,01	1
	0,1	0,2	10	0,1	0,5	400	0,01	1

Figura 8. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimientos en aguas superficiales (Cadmio, plomo, hidrocarburos totales, arsénico, cromo, DQO, mercurio y vanadio) según la resolución 0631 de 2015.

INDICATIVO	CIANURO (mg/L)	COBRE (mg/L)	NÍQUEL (mg/L)	NITRÓGENO TOTAL (mg/L)	ZINC (mg/L)	SULFUROS (mg/L)
A	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-
D	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-
G	-	-	-	-	-	-
H	-	-	<0,085	-	-	-
I	-	-	<0,2	-	-	-
J	-	-	<0,085	-	-	-
K	-	-	<0,085	-	<0,014	-
L	-	-	-	-	-	-
M	-	<0,1	-	-	<0,05	-
N	-	<0,1	<0,2	-	<0,05	-
O	-	-	-	-	<0,085	-
P	-	<0,1	<0,2	0,72	<0,05	-
Q	-	<0,1	<0,2	0,175	<0,05	-
R	-	<0,1	<0,2	3,7	<0,05	-
S	-	<0,1	<0,2	0,685	0,06	-
T	<0,011	<0,1	<0,2	-	-	-
U	<0,011	<0,1	<0,2	-	-	-
V	<0,011	<0,1	<0,2	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-
X	-	-	-	-	-	-
Y	-	-	-	-	-	-
Z	<0,011	<0,1	<0,2	-	<0,05	-
AA	<0,02	0,03	0,14	-	0,13	-
AB	-	-	-	-	<0,014	-
	1	1	0,5	10	3	1
	1	1	0,5	10	3	1

Figura 9. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimientos en aguas superficiales (Cianuro, cobre, níquel, nitrógeno total, zinc y sulfuros) según la resolución 0631 de 2015.

5. Análisis de resultados de los informes de cumplimiento ambiental

Mediante la revisión de los informes proporcionados por la ANLA, se obtuvieron resultados que permiten observar el estado del cumplimiento de los campos del Meta y Casanare, que generan vertimientos de ARI a cuerpos de aguas superficiales; esta información es representada en las Figuras de la 10 a la 24.

Debido a que en los informes suministrados se presentaban reportes de un mismo lugar de muestreo pero en diferente fecha, se seleccionó el informe más reciente con el objetivo de no

generar confusiones en el momento de hacer el análisis de los parámetros ya que se podrían repetir aquellos que no cumplirían con lo establecido en la norma, teniendo en cuenta que serían de la misma locación.

5.1 Campos en etapa de perforación

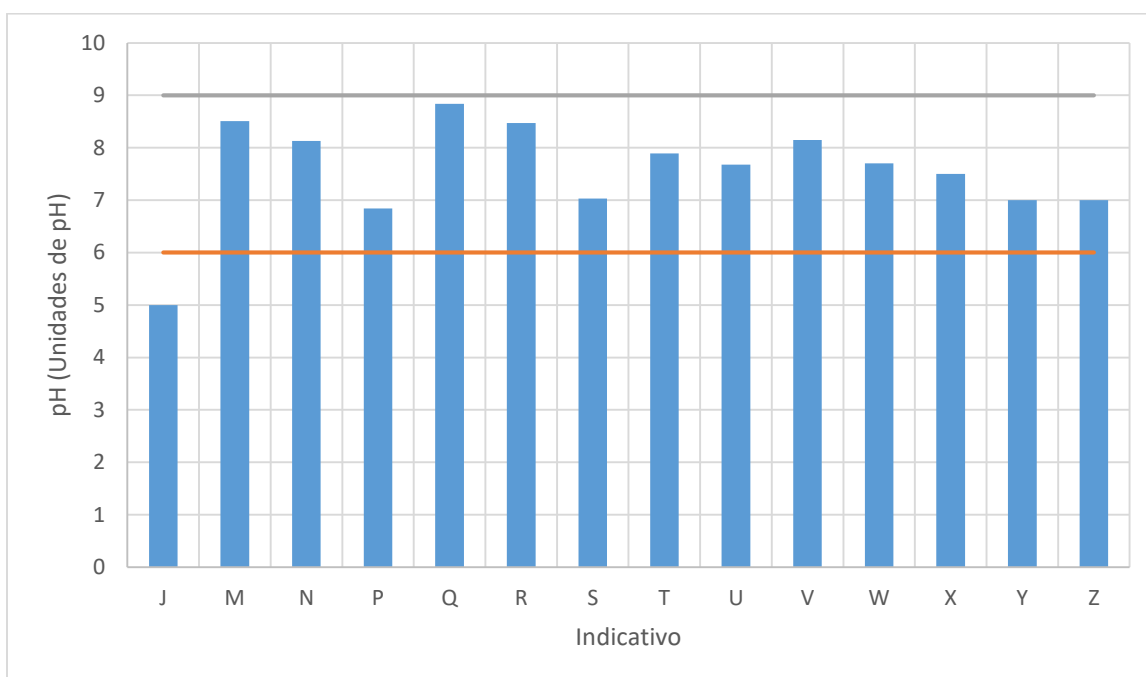


Figura 10. pH en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Teniendo en cuenta que los límites para el pH son entre 6 y 9 unidades de pH, de la Figura 10 se puede concluir que 1 de los 14 informes que reportan este parámetro estaría incumpliendo con la norma, es decir, el 7,14% no se encontraría dentro del rango permisible, establecido por la Resolución 0631 de 2015, capítulo VI, artículo 11, etapa de perforación.

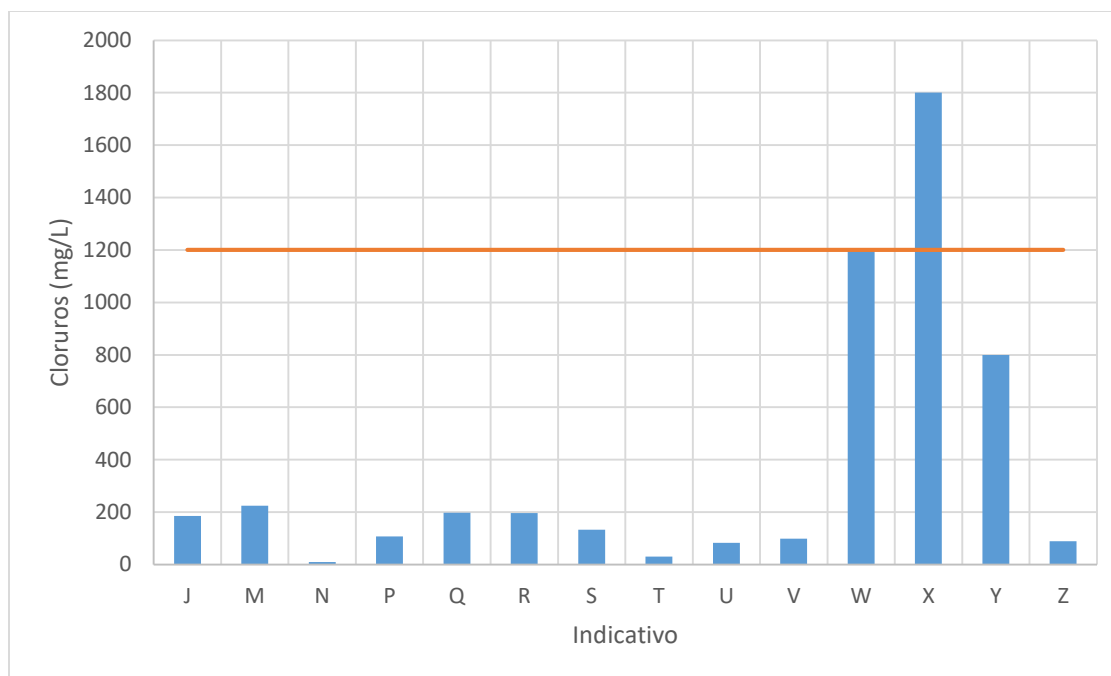


Figura 11. Cloruros en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Observando la Figura 11, se puede deducir que 1 de los 14 informes que reportan este parámetro y que representan aproximadamente el 7,14%, estarían sobrepasando el límite máximo permisible para cloruros de 1200 mg/L, establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de perforación de la Resolución 0631 de 2015.

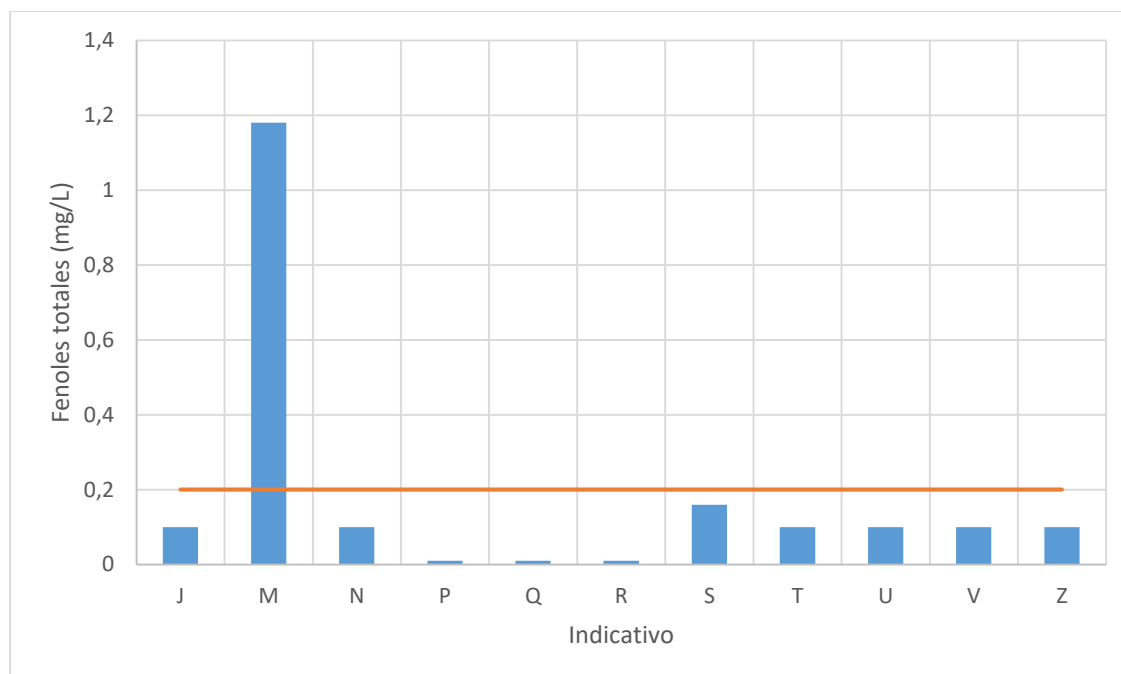


Figura 12. Fenoles totales en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Observando la Figura 12, se puede determinar que un informe de los 11 que reportan este parámetro, es decir, el 9,09% incumpliría con la normatividad establecida al exceder el límite máximo permisible para fenoles totales de 0,2 mg/L del capítulo VI, artículo 11, etapa de perforación de la Resolución 0631 de 2015.

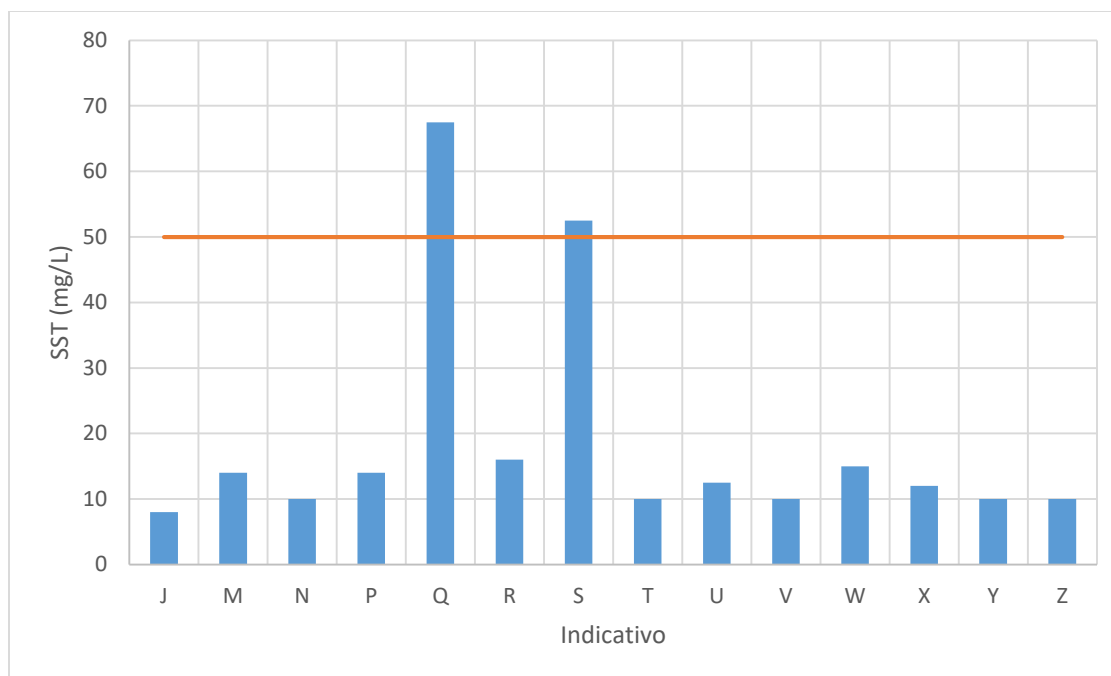


Figura 13. Sólidos suspendidos totales en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Analizando la Figura 13, se puede determinar que 2 de los 14 campos, es decir, aproximadamente 14,28% exceden el límite máximo permisible, establecido para sólidos suspendidos totales de 50 mg/L en el capítulo VI, artículo 11, en la etapa de perforación, en la Resolución 0631 de 2015.

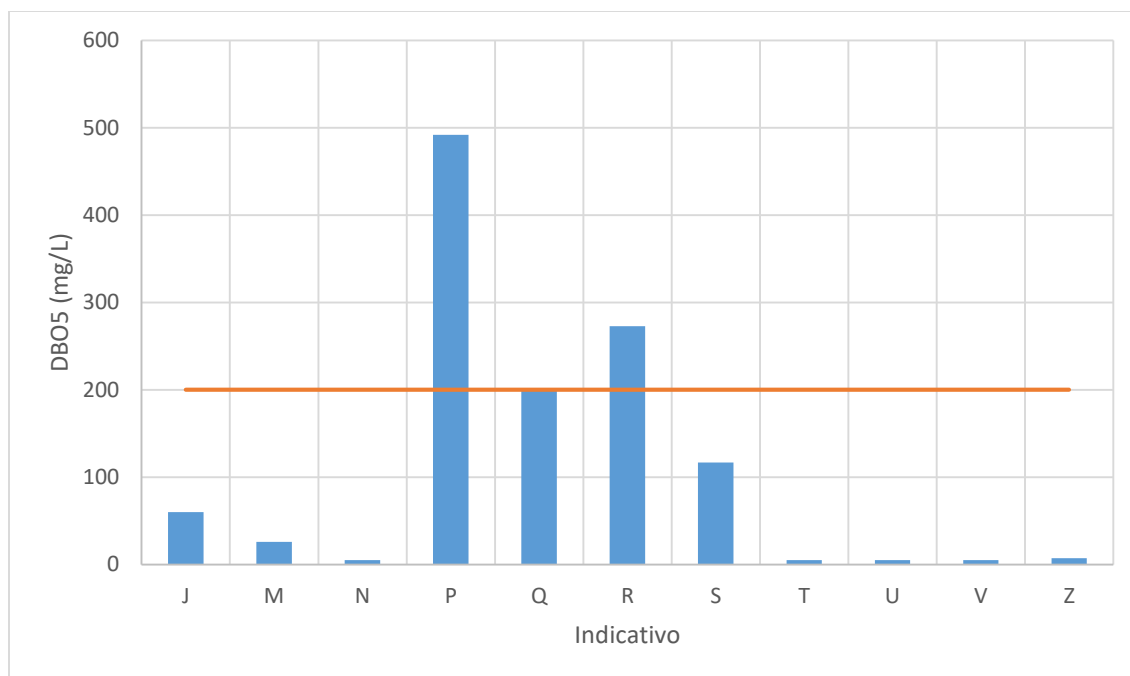


Figura 14. DBO5 en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

De la Figura 14, se observa que 3 de los 11 informes que reportaron concentraciones de DBO5, es decir, el 27,27% estarían sobrepasando el valor límite para DBO5 de 200 mg/L, establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de perforación, de la Resolución 0631 de 2015.

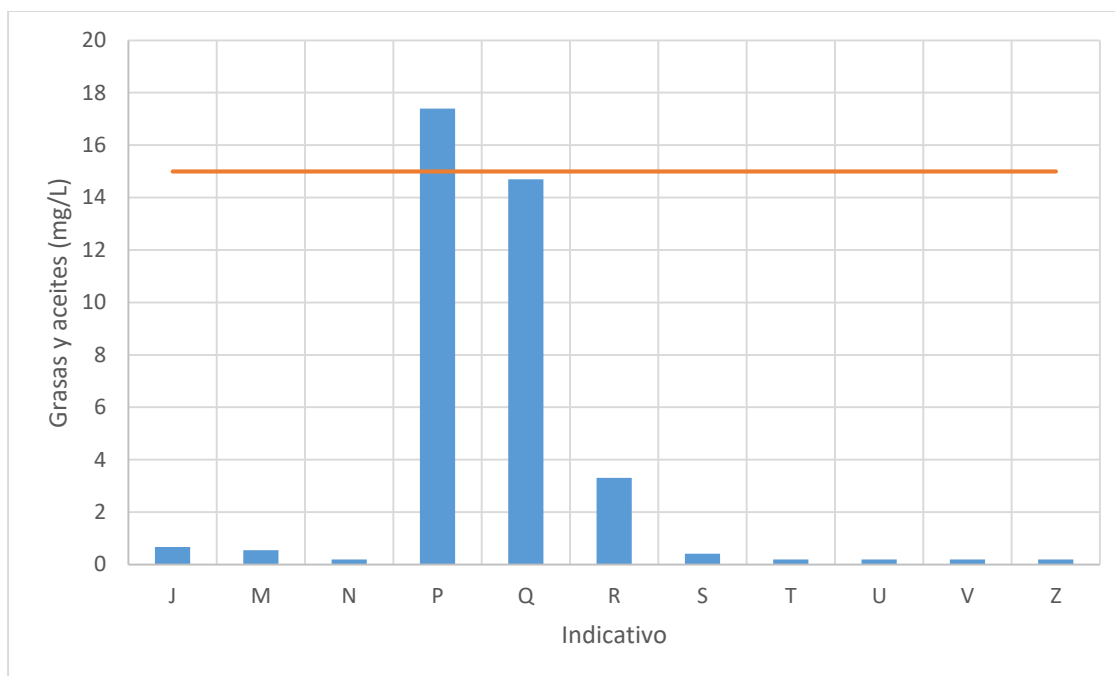


Figura 15. Grasas y aceites en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

De acuerdo a la Figura 15, 1 de los 11 campos que reportaron concentraciones de grasas y aceites, es decir, el 9,09 % excede el límite máximo permisible de 10 mg/L, establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de perforación de la Resolución 0631 de 2015.

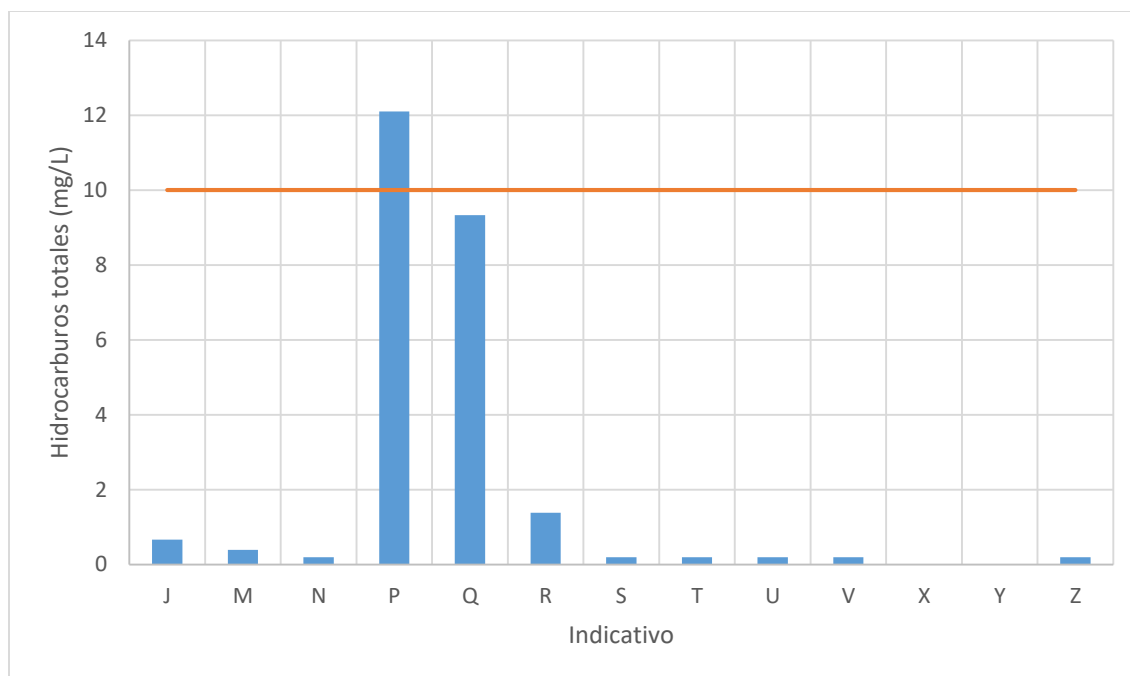


Figura 16. Hidrocarburos totales en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Teniendo en cuenta que el límite para los hidrocarburos totales es de 10 mg/L, de la Figura 16 se puede concluir que 1 de los 11 informes que reportan este parámetro estaría incumpliendo con la norma, es decir, el 9,09% no se encontraría dentro del rango permisible, establecido por la Resolución 0631 de 2015, capítulo VI, artículo 11, etapa de perforación.

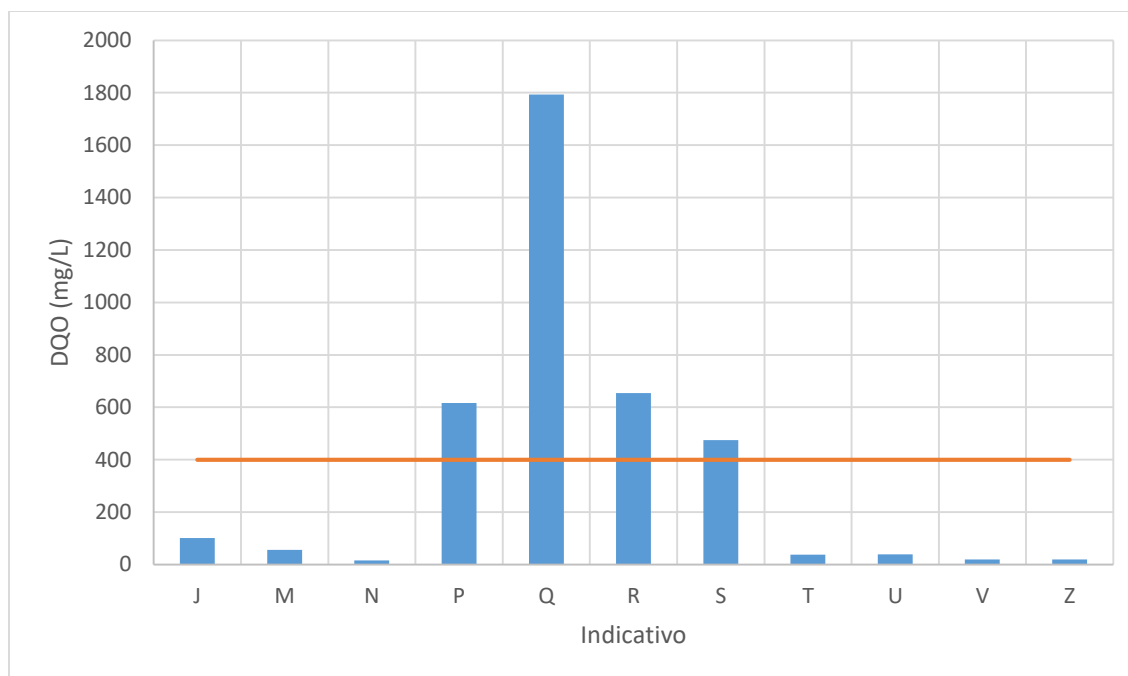


Figura 17. DQO en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Teniendo en cuenta que el límite para la DQO es de 400 mg/L, de la Figura 17 se puede concluir que 4 de los 11 informes que reportan este parámetro estaría incumpliendo con la norma, es decir, el 36,36% no se encontraría dentro del rango permisible, establecido por la Resolución 0631 de 2015, capítulo VI, artículo 11, etapa de perforación.

5.2 Campos en etapa de producción

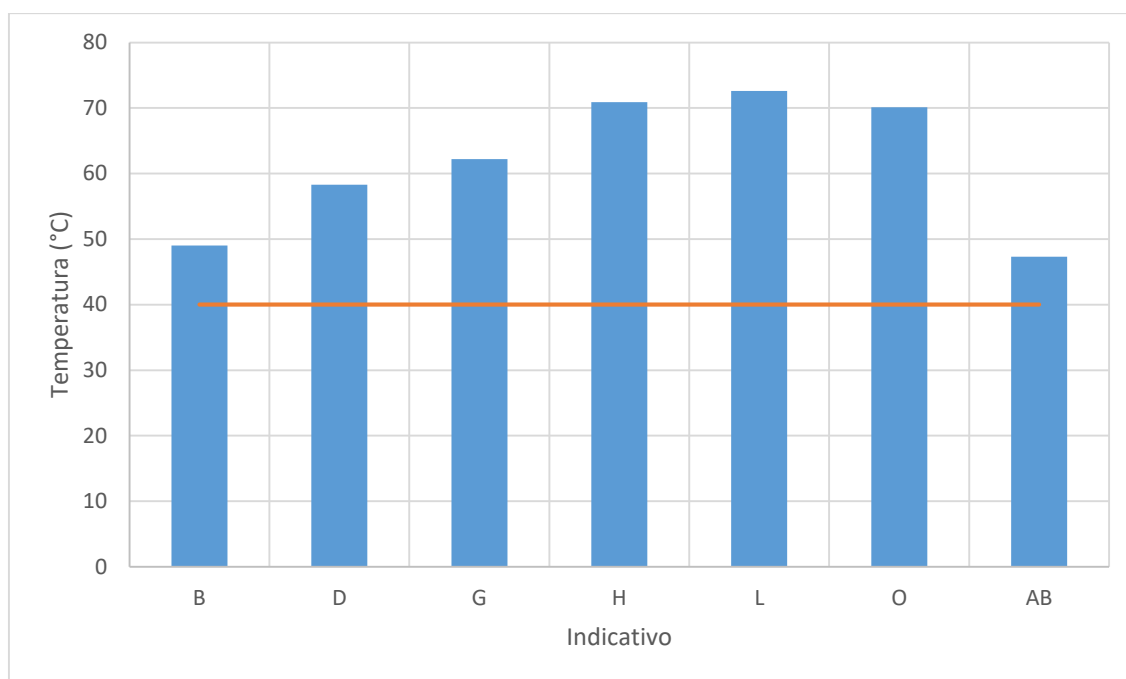


Figura 18. Temperatura en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Teniendo en cuenta que el límite para la Temperatura es de 40 °C, de la Figura 18 se puede concluir que 7 de los 7 informes que reportan este parámetro estarían incumpliendo con la norma, es decir, el 100% no se encontraría dentro del rango permisible, establecido por la Resolución 0631 de 2015, capítulo VI, artículo 11, etapa de producción.

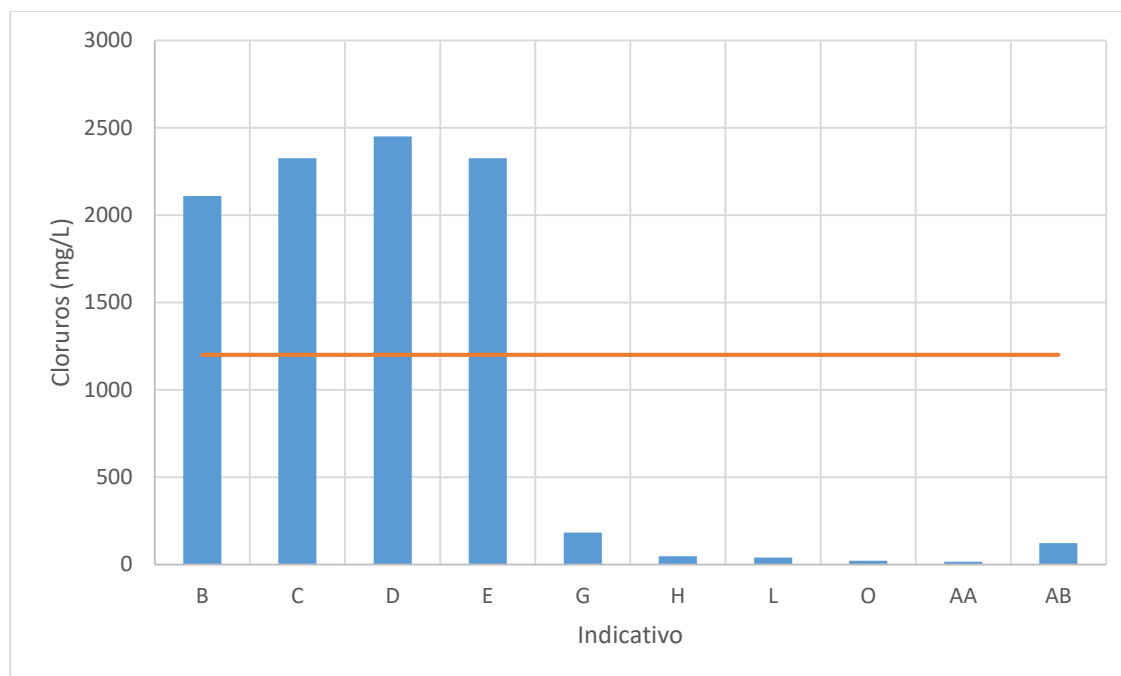


Figura 19. Cloruros en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Observando la Figura 19, se puede deducir que 4 de los 10 informes que reportan este parámetro y que representan aproximadamente 40%, estarían sobrepasando el límite máximo permisible para los cloruros de 1200 mg/L, establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015.

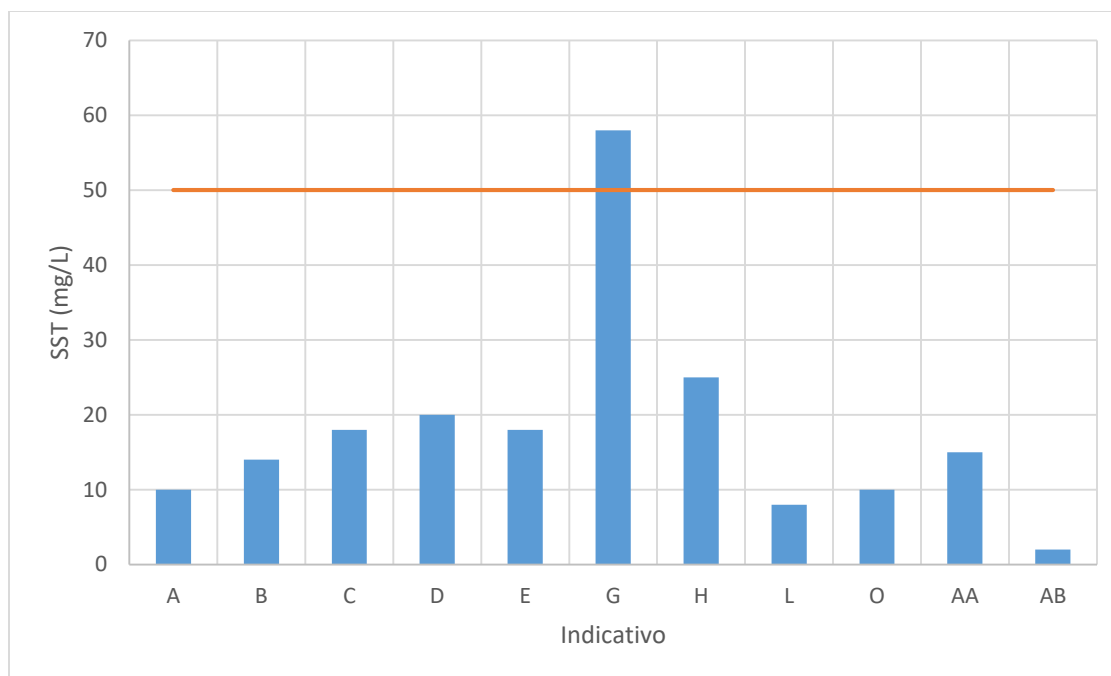


Figura 20. Sólidos suspendidos totales en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Analizando la Figura 20, se puede determinar que 1 de los 11 campos, es decir, aproximadamente 9,09% exceden el límite máximo permisible, establecido para sólidos suspendidos totales de 50 mg/L en el capítulo VI, artículo 11, en la etapa de producción, en la Resolución 0631 de 2015.

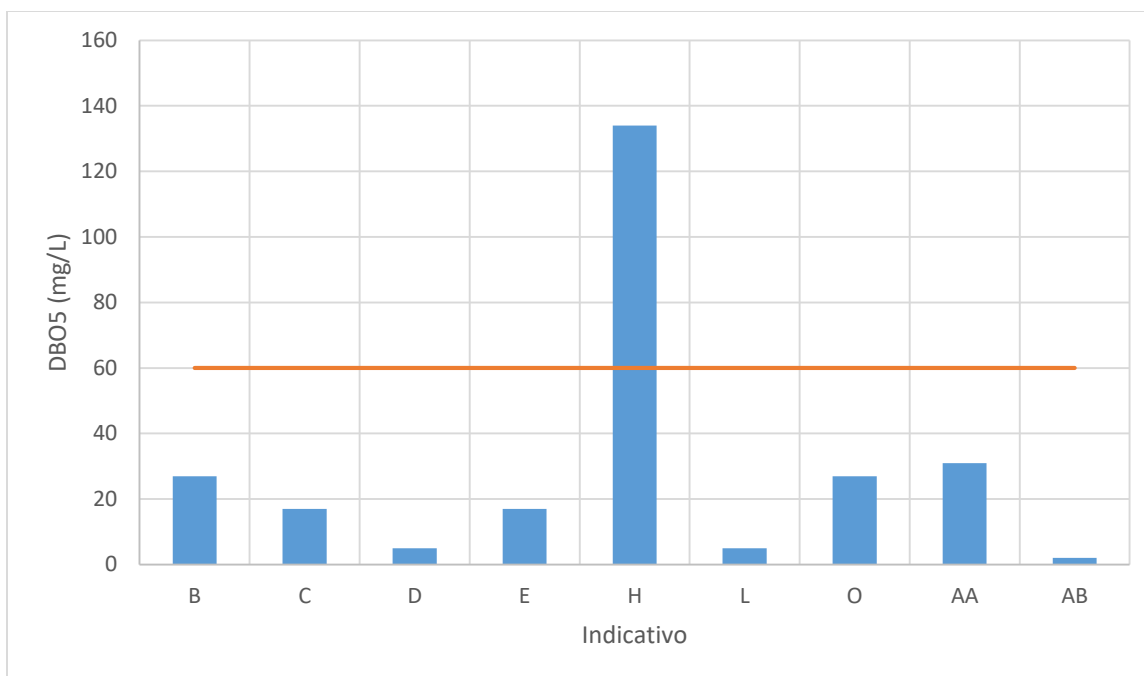


Figura 21. DBO5 en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

De la Figura 21, se observa que 1 de los 9 informes reportaron concentraciones de DBO5, es decir, 11,11% estarían sobrepasando el valor límite de 60 mg/L, establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción, de la Resolución 0631 de 2015.

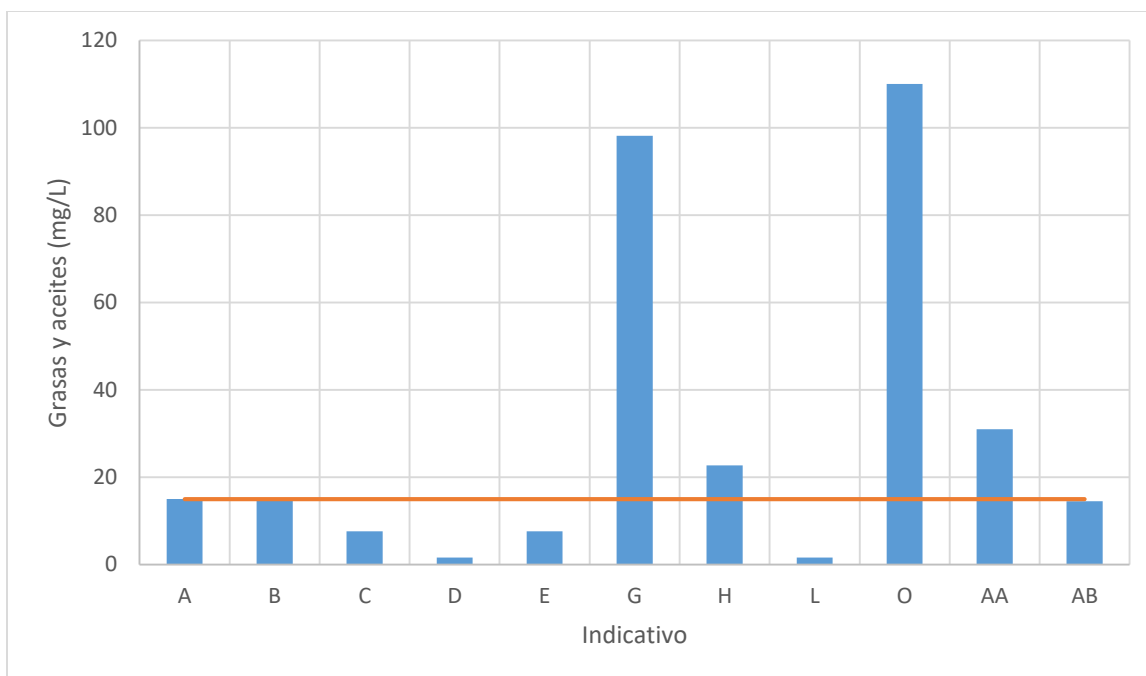


Figura 22. Grasas y aceites en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

De acuerdo a la Figura 22, 5 de los 11 campos reportaron concentraciones de grasas y aceites, es decir, el 45,45 % excede el límite máximo permisible de 15 mg/L, establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015.

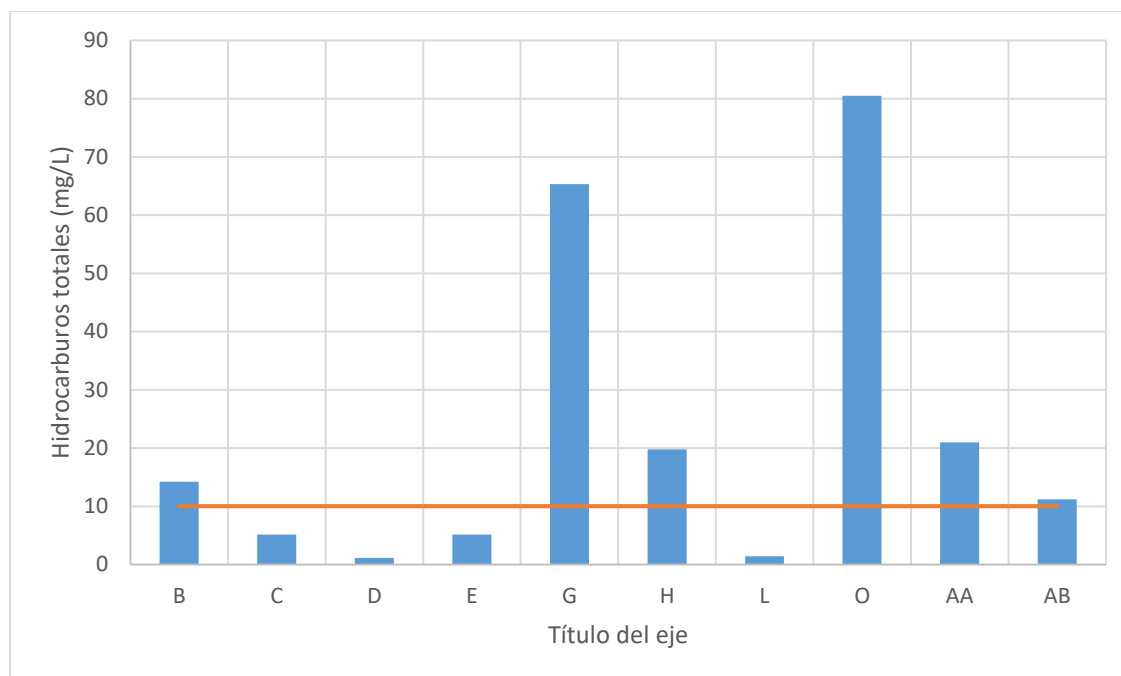


Figura 23. Hidrocarburos totales en la etapa de producción en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Teniendo en cuenta que el límite para los hidrocarburos totales es de 10 mg/L, de la Figura 23 se puede concluir que 6 de los 10 informes que reportan este parámetro estaría incumpliendo con la norma, es decir, el 60% no se encontraría dentro del rango permisible, establecido por la Resolución 0631 de 2015, capítulo VI, artículo 11, etapa de producción.

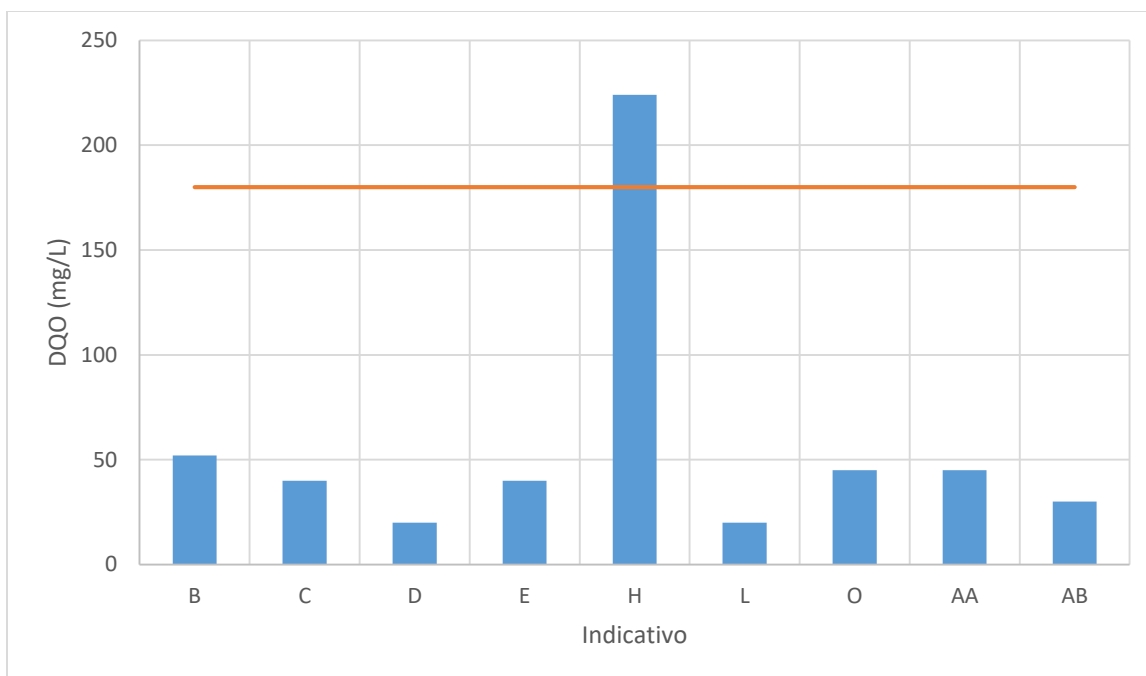


Figura 24. DQO en la etapa de exploración en campos de los departamentos de Meta y Casanare, según informes del 2015 al 2017

Teniendo en cuenta que el límite para la DQO es de 180 mg/L, de la Figura 24 se puede concluir que 1 de los 9 informes que reportan este parámetro estaría incumpliendo con la norma, es decir, el 11,11% no se encontraría dentro del rango permisible, establecido por la Resolución 0631 de 2015, capítulo VI, artículo 11, etapa de producción.

6. Alternativas de solución a los parámetros críticos

A continuación, se presentan algunas soluciones tecnológicas que podrían ser usadas por las compañías operadoras de los campos petroleros para disminuir las concentraciones de los

parámetros que exceden los límites máximos permisibles establecidos por la resolución 0631 del 2015.

6.1 pH

La neutralización o ajuste de pH, es la adición de un alcalí o un ácido a un residuo, para obtener un rango de pH cercano a 7. Este método se usa para proteger fuentes receptoras de descargas alcalinas o ácidas fuertes, o para disminuir el postratamiento de dichos residuos.

El tratamiento de aguas ácidas se puede hacer agregando cal, óxido de cal, óxido o hidróxido de magnesio, o hidróxido de sodio. El método de la cal a pesar de ser el más usado, presenta un problema considerable en el momento de su utilización, el cual es la producción de una gran cantidad de lodo. El hidróxido de sodio, aunque costoso, es una forma química muy conveniente para neutralizar residuos ácidos en plantas pequeñas y minimizar la cantidad de lodo producido. Se consigue en forma líquida, en concentración del 50%, la cual cristaliza a 12°C y en concentración del 73%, que comienza a cristalizar a 63°C; por esto importante que tenga un almacenamiento apropiado y sea diluido antes de ser usado. En la presentación granulada (100% en concentración), la tasa de dilución y el método de enfriamiento se deben controlar apropiadamente para que no haya ebullición o salpicamiento (Romero Rojas, 1999, págs. 321-324).

6.2 Temperatura

A continuación, se explica el sistema de manejo de aguas a través de piscinas, donde se realiza un proceso de oxigenación, enfriamiento y sedimentación, haciendo un ajuste a los parámetros para el posterior vertimiento. Esta técnica es ampliamente utilizada en el sector de hidrocarburos debido a su economía.

- **Piscina de enfriamiento:** Tiene una capacidad de almacenamiento que depende de cada campo y está conformada por una serie de aspersores donde se inicia la reducción de la temperatura del agua. Generalmente se ubica previo al sistema de tratamiento.
- **Piscina contra-incendio:** En esta piscina se realiza un segundo enfriamiento del agua mediante aspersores y la sedimentación de los sólidos suspendidos por medio de reposo. De ser necesario, el agua de esta piscina pasa a la piscina facultativa para el ajuste final y posterior disposición mediante las alternativas autorizadas por la licencia ambiental del campo.
- **Piscina facultativa:** Es una estructura donde se realiza el ajuste final de parámetros del agua, para su posterior final. A esta se le pueden instalar baffles o pantallas, lo que permite aumentar el tiempo de retención, disminuir la temperatura del agua y disminuir el paso de sólidos suspendidos (Geoingeniería S.A – hupecol LL.C., s.f.).
- **Piscina de oxidación:** Se basa en la separación gravitacional y, al igual que en algunos sistemas de tratamiento primario, se encuentran expuestas a la atmósfera para reducir la concentración de aceite soluble por efecto de la presión, disminuir la temperatura y eliminar el H₂S y CO₂ al permitirse la aireación del agua. En ellas también se produce la biodegradación de compuestos orgánicos disueltos y la sedimentación de sólidos.

Cuando la oxigenación no es adecuada se recomienda el uso de aireadores mecánicos o biofiltros (Jaimes & Pico, 2009, pág. 62).

6.3 Fenoles

Estudios realizados en el área de los tratamientos biológicos para la disminución de compuestos fenólicos e hidrocarburos saturados presentes en aguas residuales, han dado como resultado importantes avances. En 1996, Bazaldúa y col. usaron la biodegradación de compuestos fenólicos en un reactor discontinuo secuencial (SBR) con adición de carbón activado granular, logrando obtener remociones superiores al 94%. También en 1996, Claros y col. emplearon un reactor anaerobio de lecho fluidizado, para tratar aguas preparadas en el laboratorio, obteniendo disminuciones del 97% en la DQO y 99,99% en fenoles totales (Vacca, y otros, s.f.).

En la investigación realizada por Rincón y col. se evaluó la biodegradación aerobia en reactores secuenciales por carga- SBR, de fenoles totales presentes en las aguas de producción petroleras del patio de tanques Ulé, Tía Juana, estado Zulia, Venezuela, consiguiendo valores de degradación entre 82,8-96,8%, demostrando que el sistema de tratamiento aeróbico en reactores SBR es efectivo para la remoción de la materia orgánica (Díaz, Rincón, Fernandez, & Marín, s.f.).

6.4 Cloruros

Los procedimientos que se recomiendan para la remoción de los cloruros son:

- **Electrodiálisis (ED) y electrodiálisis inversa (EDR):** ED es un proceso de separación electroquímica en el cual se usa una fuerza impulsora, generada por medio de voltaje de

corriente continua, para transferir especies iónicas del agua fuente a una corriente de aguas residuales de concentrado al pasar a través de una membrana de intercambio iónico, creando una corriente más diluida.

La EDS es una variación de la ED, que utiliza la inversión de la polaridad del electrodo para limpiar automáticamente las superficies de la membrana.

La separación del agua de alimentación resulta en: (1) agua de producto, que tiene una baja conductividad y niveles aceptables de TDS, (2) salmuera, o concentrado, que es el agua que recibe los iones de agua salobre y (3) agua de alimentación del electrodo, que es la que pasa directamente sobre los electrodos que crean el potencial eléctrico.

Estas técnicas están limitadas por la gran cantidad de energía que consumen para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema y por la dificultad que se presenta para el cambio de las membranas y resinas. Es por esto, que no son recomendables para aguas con más de 5000 mg/L.

- **Evaporación:** Consiste en la vaporización del líquido contenido en una solución para retener la concentración del material sólido, aplicando una potente fuente generadora de calor. Esta tecnología se utiliza para concentrar los componentes no volátiles.
- **Ósmosis inversa (RO):** Proceso que se basa en la ósmosis, un fenómeno natural que ocurre cuando el agua fluye desde la solución de menor salinidad hasta la otra de mayor salinidad gracias a una fuerza natural llamada presión osmótica, pasando a través de una membrana semipermeable, es decir, una membrana que selectivamente permite que el agua la atraviese a una velocidad mucho más alta que la velocidad de transferencia de cualquier componente contenido en el agua. El flujo del solvente se da espontáneamente hasta que se alcance un equilibrio entre ambas concentraciones.

En el tratamiento de ósmosis inversa, el agua que contiene sales inorgánicas, sólidos suspendidos, compuestos orgánicos solubles e insolubles, microorganismos acuáticos y gases disueltos se somete a presión a través de una membrana semipermeable. Dependiendo de su tamaño y carga eléctrica, la mayoría de los constituyentes del agua son retenidos en el lado de alimentación de la membrana mientras que el agua purificada pasa por la membrana. Las membranas RO pueden rechazar sólidos mayores que 1 (Angstrom), es decir, más del 90% de los componentes que acompañan al agua, pero no rechazan bien los gases, debido a su pequeño tamaño molecular.

En la Figura 25 se puede observar como en el proceso de ósmosis, la solución diluida ejerce una fuerza natural sobre el sistema cuando el solvente intenta pasar por la membrana semipermeable hacia la solución de mayor concentración salina; también se aprecia el método de la ósmosis inversa, que en pocas palabras sería el procedimiento contrario, ya que en él se aplica una presión controlada a la solución concentrada y se hace pasar el solvente hacia la solución diluida.

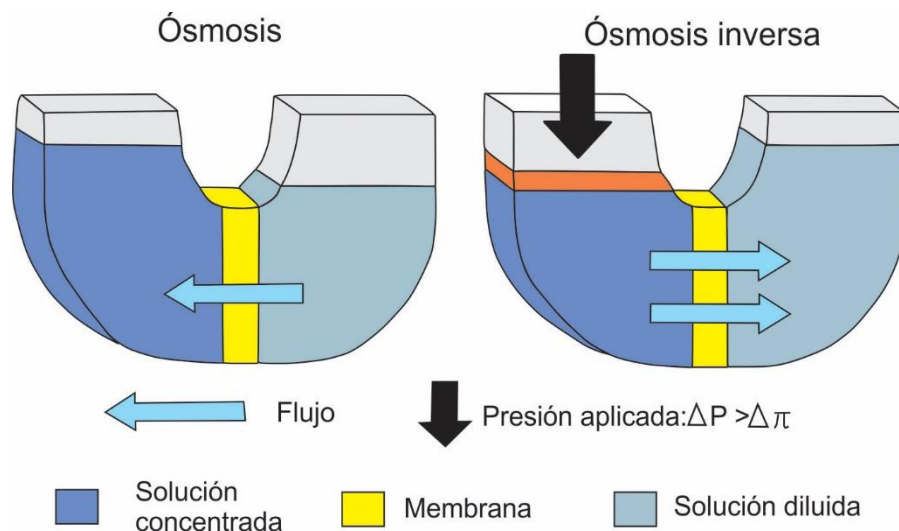


Figura 25. Esquema de los fenómenos de ósmosis y ósmosis inversa. Adaptado de Jarava, R & Planeta, I (2017). Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A. Tesis de pregrado. UNAD, Valledupar. P. 47

El tratamiento por ósmosis inversa reduce la concentración de sólidos disueltos, incluyendo una variedad de iones, metales y partículas en suspensión; también remueve contaminantes orgánicos, detergentes y pesticidas. La ósmosis inversa es un tratamiento adecuado para la remoción de cloruros, ya que ofrece un porcentaje de remoción de sólidos disueltos de 90 a 95% (Jarava & Planeta, 2017, págs. 40-53).

6.5 Sólidos suspendidos totales

Para la disminución de este parámetro se pueden usar las siguientes técnicas:

- **Cribado:** De acuerdo a la eficiencia de la separación que se desea, se pueden usar tamices que cuentan con aberturas de diferente dimensión. Las rejillas de finos tienen aberturas de 5mm o menos, generalmente se usan en tanques de sedimentación. Sin embargo, aunque en

ellas puede llegar a eliminarse entre un 5 y un 25% de sólidos en suspensión, de un 40 a 60% se eliminan por sedimentación; por esta razón y por el atascamiento, los tamices finos no se usan con tanta frecuencia.

Las cribas de gruesos tienen aberturas que oscilan entre 4 y 9 cm. Se usan como elementos de protección para evitar que sólidos de grandes dimensiones dañen las bombas y otros equipos mecánicos.

Los productos recogidos se pueden incinerar, tratar por procesos de digestión anaeróbica, o dirigirse directamente al vertedero.

- **Sedimentación:** La eliminación de las materias se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran. La sedimentación puede producirse en una o varias etapas, o en varios de los puntos del proceso de tratamiento (R.S. Ramalho , 2003, pág. 92).
- **Flotación:** Método para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una fase líquida. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas, generando que los sólidos en suspensión o las partículas líquidas (por ej.: aceites o petróleo) floten hasta la superficie. Los sólidos suspendidos pueden retirarse en la superficie por sistemas mecánicos y el líquido clarificado puede separarse cerca del fondo, y parte del mismo puede reciclarse (R.S. Ramalho , 2003, págs. 146-147).

6.6 DBO5 y DQO

Como alternativas de tratamiento se recomiendan:

- **Lagunas aireadas:** Son un estanque de 2 a 5 m de profundidad, en el cual se usa un equipo de aireación mecánica con el objeto de suministrar oxígeno a las bacterias y proporcionar mezcla al contenido del estanque. Las lagunas suelen clasificarse en aerobias o aerobias-anaerobias, también llamadas facultativas. (Ver figura 26).

En una laguna aerobia se tiene una introducción de potencia, lo cual hace que todo esté totalmente mezclado y no se sedimenten ni los sólidos entrantes, ni los biológicos producidos a partir del agua residual. Según el tiempo de retención el efluente contendrá de un tercio a un medio del valor de la DBO5 entrante. Sin embargo, antes de que el efluente pueda descargarse, los sólidos deben eliminarse por sedimentación.

En el caso de una laguna facultativa, el nivel de potencia es apenas suficiente para crear la turbulencia requerida para dispersar el oxígeno, razón por la que el estanque no está totalmente mezclado y se genera la sedimentación de los sólidos. Estas lagunas son las más utilizadas porque producen un buen efluente (remociones de DBO5 entre 90 a 95% y 70 a 80% para la DQO), los niveles de potencia son inferiores, requieren control mínimo y la remoción de lodos se realiza cada diez años o más. Las lagunas aerobias se utilizan bastante para aguas residuales industriales de concentración alta (Romero Rojas, 1999, págs. 327-528).

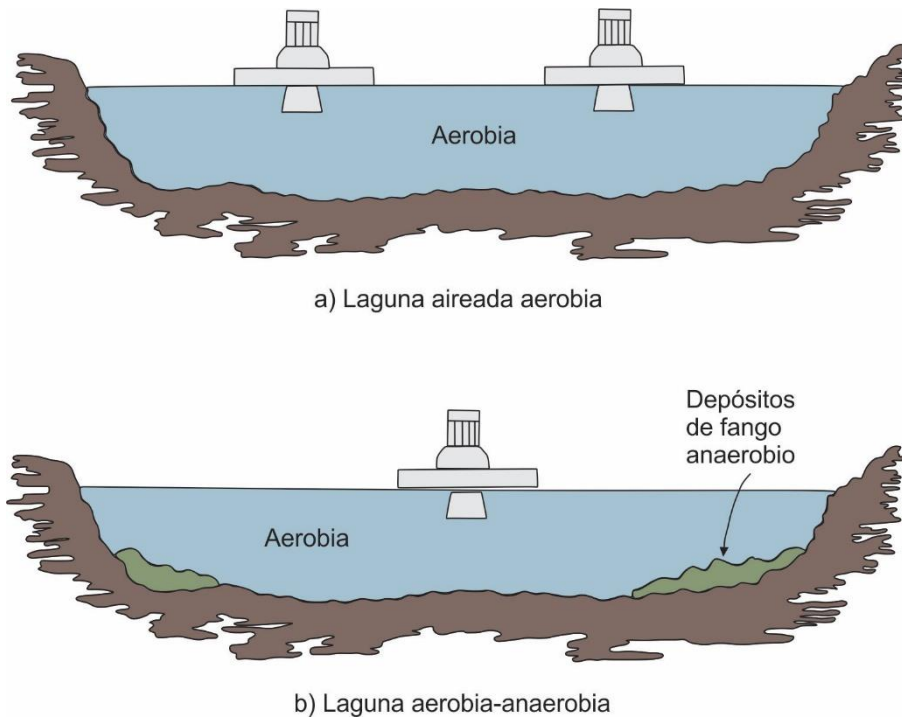


Figura 26. Tipos de lagunas aireadas. Adaptado de Metcalf & Eddy (1977). Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales. España: Editorial Labor, S. A. p. 574

- Filtro percolador: Consiste en un lecho de piedras, u otro medio natural o sintético sobre el que se adhieren microorganismos, lamas o películas microbiales y a través del cual se filtra el agua residual. Cada filtro tiene un sistema de drenaje inferior, a través del que circula aire y es usado para recoger las aguas tratadas y los sólidos biológicos que se desprenden del medio, que serán degradados por una población de microorganismos adheridos al medio filtrante. (Ver figura 27).

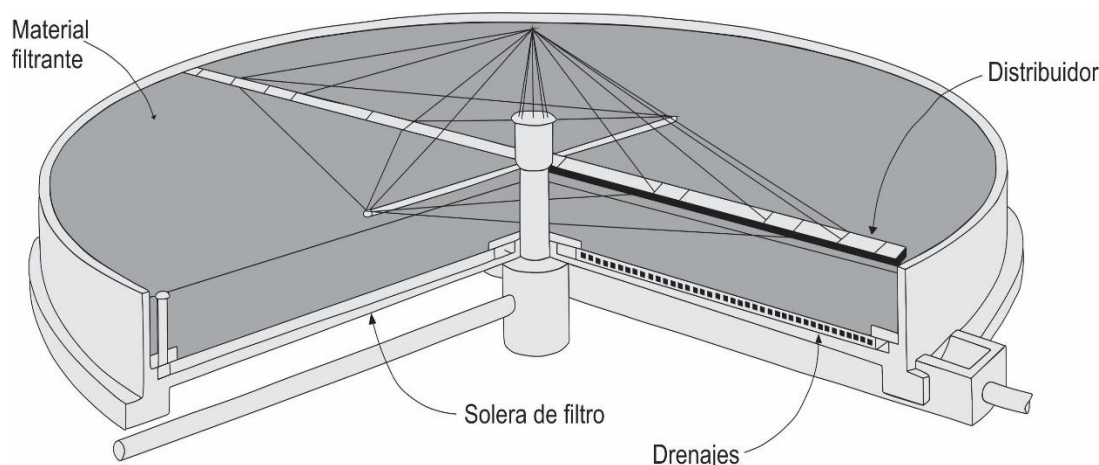


Figura 27. Vista en sección de un filtro percolador. Adaptado de METCALF & EDDY (1977). Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales. España: Editorial Labor, S, A. p. 433

La eficiencia de remoción de DBO₅ que ofrece este proceso va del 50 al 95% y para la DQO de 50 a 80%; estos porcentajes aumentan con el uso de recirculación debido a que: (1) la materia orgánica del efluente recirculado tiene contacto más de una vez con la biomasa, (2) la recirculación mejora la distribución sobre la superficie del filtro, reduce la tendencia al taponamiento y ayuda a controlar moscas y (3) cuando el caudal recirculado pasa a través del tanque de sedimentación, se amortiguan las variaciones de carga orgánica y se disminuye la concentración de agua residual afluente, mejorando las condiciones de variación de carga.

- Biodiscos: El proceso es muy similar al de filtros percoladores, con la diferencia de que acá las películas biológicas crecen sobre discos que se encuentran en rotación dentro del agua residual y la atmósfera para proveer oxígeno a los organismos, que mediante oxidación biológica extraerán el sustrato de las aguas. Por lo general, en este sistema no se usa recirculación debido a que no contribuye apreciablemente a incrementar la eficiencia del proceso.

Los sistemas de Biodiscos ofrecen una purificación de afluentes (DBO5 y DQO) de 80 a 85%, que se maximiza cuando se utilizan biodiscos de más de cuatro etapas (Romero Rojas, 1999, págs. 609-612).

6.7 Hidrocarburos totales

Como alternativa de solución se propone un tratamiento químico usando coagulantes y/o floculantes. Los coagulantes son rompedores inversos que permiten que las gotas de crudo presentes en la emulsión puedan llegar a coalescer más fácilmente; la coagulación usando sulfuro de aluminio es una de las más usadas por su bajo costo, manejo relativamente sencillo y una remoción teórica alta de 95%. Por otra parte, los floculantes se encuentran constituidos por polímeros que, al ser agregados a la emulsión, se despliegan a la manera de una gran red, atrapando las gotas de crudo que se encuentran dispersas en el agua; en el momento en que lleguen a superficie pueden ser retiradas de forma mecánica.

Aunque los polímeros tienen la capacidad de retirar una gran cantidad de aceite, debe considerarse otra opción antes de su uso, ya que no es muy recomendable su uso debido a que cuando el polímero se mezcla con el crudo forma una sustancia muy viscosa que no puede ser aprovechada para extraer crudo de allí (Montes Páez, 2010, págs. 56-57).

6.8 Grasas y aceites

Para disminuir las concentraciones de grasas y aceites presentes en las aguas residuales se aconseja el uso del método de la flotación, el cual se emplea para la separación de partículas sólidas o

líquidas de una fase líquida, mediante la introducción de burbujas de gas. Dichas burbujas se adhieren a las partículas, y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido, en donde podrán ser removidas por métodos mecánicos. Este proceso es útil para hacer ascender partículas de densidad mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de las partículas cuya densidad es menor, como en el caso del aceite en agua.

La implementación de esta técnica se puede llevar a cabo usando los siguientes métodos:

- Flotación por aire disuelto (FAD): Es uno de los más económicos y efectivos métodos de recuperación-remoción de sólidos, grasas, aceites, fibras y otros materiales de baja densidad. Presenta una remoción de grasas y aceites de hasta 95%.

Se consigue introduciendo el agua residual en un tanque de retención cerrado, al cual se le agrega aire para presurizar a varias atmósferas y a continuación se libera la presión hasta el nivel atmosférico.

La Figura 28 muestra una instalación de pequeño tamaño, en la que se presuriza a 275-230 KPa mediante una bomba la totalidad del caudal a tratar, añadiéndose el aire comprimido en la tubería de aspiración de la bomba. El caudal se mantiene bajo presión en un calderín durante algunos minutos, para permitir que el aire se disuelva. A continuación, el líquido presurizado se introduce en el tanque de flotación a través de una válvula reductora de presión, lo cual provoca que el aire deje de estar en disolución y que se formen diminutas burbujas distribuidas por todo el volumen de líquido, reduciendo la densidad de los materiales en suspensión, principalmente la de materiales grasosos.

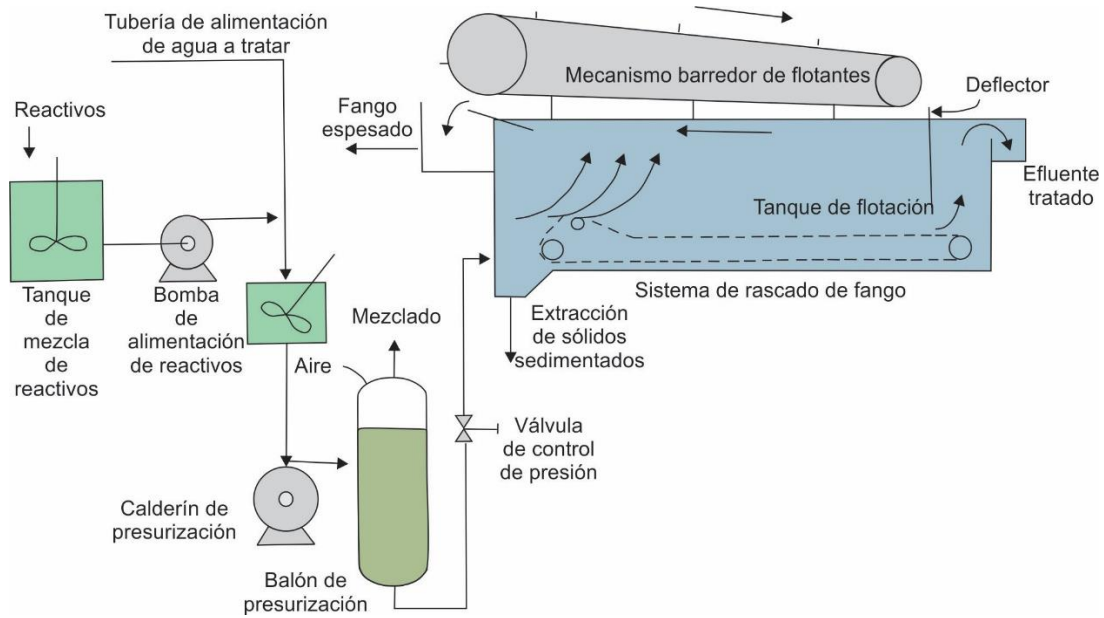


Figura 28. Tanque de flotación por aire disuelto sin recirculación. Adaptado de Metcalf & Eddy (1995). Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización. España: Editorial McGraw-Hill. p. 279

En las instalaciones de mayor tamaño mostradas en la Figura 29, se recircula parte del efluente (entre el 15 y 120%), el cual se presuriza, y se suministra con aire. El caudal recirculado se mezcla con la corriente principal sin presurizar antes de la entrada al tanque de flotación, lo que provoca que el aire deje de estar en disolución y entre en contacto con las partículas sólidas a la entrada del tanque.

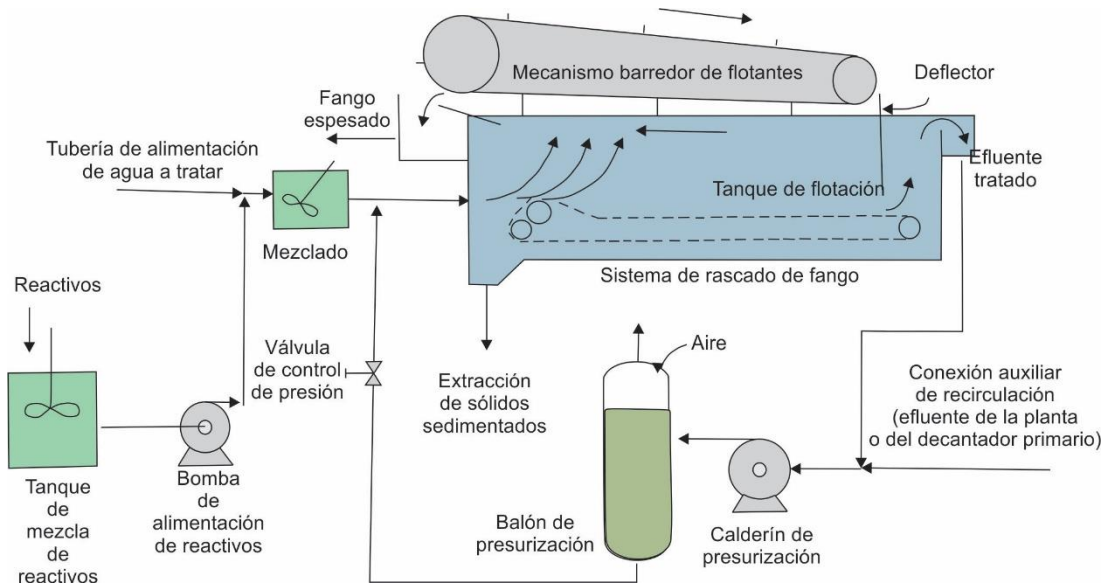


Figura 29. Tanque de flotación por aire disuelto con recirculación. Adaptado de Metcalf & Eddy (1995). Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización. España: Editorial McGraw-Hill. p. 279

- Flotación por vacío: Consiste en saturar de aire el agua residual directamente en el tanque de aireación, o permitiendo que el aire penetre en el conducto de aspiración de una bomba. Al aplicar vacío parcial, el aire disuelto abandona la solución en forma de burbujas diminutas. Las burbujas y las partículas sólidas a las que se adhieren ascienden a la superficie para formar una capa de espuma que se elimina mediante un mecanismo de rascado superficial. La arena y demás sólidos pesados, que se depositan en el fondo, se extraen por medio de bombeo (Metcalf & Eddy, 1995, págs. 277-280).
- Flotación inducida por gas (IGF): El gas es inducido, directamente en una corriente aceitosa de agua, por medio de difusores o turbinas sumergidas para acelerar la separación de las gotas del aceite de la fase de agua (Romero Rojas, 1999, págs. 345-346).
Las pequeñas burbujas se adhieren a las gotas de aceite, disminuyendo la gravedad específica de estas, y generando como consecuencia una subida rápida a la superficie. El

aceite y el gas se acumulan sobre la superficie en forma de una espuma aceitosa que es desnatada por procesos mecánicos (Serteagua , 2013).

7. Conclusiones

De acuerdo con el análisis realizado en el presente proyecto de investigación, se concluye que:

En la comparación entre el Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 del 2015, se evidencia la inclusión de 11 parámetros nuevos que presentan valores máximos permisibles además del cambio en el nivel de exigencia dado que el decreto exigía una remoción en carga mientras que la resolución es mucho más estricta y rigurosa donde establece concentraciones máximas permisibles en los diferentes parámetros de interés tales como: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos sedimentables (SSED), hidrocarburos totales (HTP), nitrógeno total (N), entre otros. Así mismo, en la normatividad que está entrando en vigencia, no están definidos los valores límite para 14 parámetros, entre algunos de ellos tenemos: dureza total, fluoruros (F), fósforo total (P) y nitratos (N-NO₃), razón por la cual solamente se exige realizar su respectivo análisis y posterior reporte, trayendo consigo potenciales problemas cuando se encuentren en altas concentraciones.

La resolución establece unos lineamientos en el artículo 11 para el reporte de los parámetros fisicoquímicos y sus valores límite en los vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos, que dependen del tipo de operación, bien sea perforación o explotación para interés de este proyecto de investigación. A pesar de esto, se presenta una ambigüedad, ya que haciendo el análisis de los ICAs hallamos campos que generan aguas de perforación y se encuentran en áreas de explotación.

De los 13 informes evaluados, solo 5 campos que reportaron aguas residuales industriales cumplirían con la resolución, en el caso hipotético de que esta se encontrara vigente; los demás campos incumplen al menos con un parámetro.

Los parámetros críticos que no cumplen con la normatividad son: (1) cloruros, representando el 40% del incumplimiento en campos en etapa de producción, (2) la temperatura, en el caso de campos que se encuentran en la etapa de explotación, ya que el 100% de estos incumplen con los límites permisibles; (3) las grasas y aceites, reportando que el 9,09% de los campos en estado de explotación y el 45,45% de los que se encuentran en producción sobrepasarían las concentraciones máximas establecidas; (4) los hidrocarburos totales, mostrando que el 9,09% de los campos en etapa de exploración y el 60% de los que se encuentran en desarrollo excederían los valores máximos permisibles estipulados en la resolución.

Se encontraron campos que reportan aguas residuales ya sean de perforación o de producción, y que no reportan parámetros tales como: fenoles, sólidos sedimentables, selenio, cadmio, plomo, mercurio, arsénico y vanadio. Algunos informes en los que, si se cuenta con datos, no especifican los valores precisos, sino los mencionan como rangos, debido a que los laboratorios que realizan el análisis y reporte de los componentes no cuentan con la tecnología necesaria para proporcionar datos exactos, ocasionando que no se pueda determinar a cabalidad el cumplimiento de la norma de vertimientos.

Analizando los reportes suministrados por la ANLA, se pudo observar que existe una relación entre las concentraciones de grasas y aceites con el contenido de hidrocarburos totales presentes en las aguas de producción, debido a que estas grasas son de origen petrogénico. Removiendo uno de estos componentes con tratamientos como flotación por aire disuelto, flotación por vacío, flotación inducida por gas y/o usando tratamientos químicos que involucren coagulantes y/o floculantes, se hará que el otro también disminuya.

Con base en las alternativas tecnológicas propuestas y las eficiencias de remoción teóricas de algunas de ellas, se determinó que en ciertos casos se hace necesario la implementación de dos o

más alternativas para poder llegar a cumplir con los límites máximos establecidos por la resolución, ya que teóricamente un solo tratamiento no sería suficiente para realizar la depuración de las aguas. Esto hace que se considere la opción de utilizar un tratamiento avanzado en reemplazo a la utilización de uno o varios tratamientos primarios y/o secundarios. Sin embargo, es necesario constatar el costo operativo, la viabilidad económica y el espacio físico disponible en campo para la instalación de cada tecnología.

8. Recomendaciones

Para estudios posteriores y con el objetivo de continuar en la mejora del desarrollo de este proyecto de investigación, se propone:

Hacer una aclaración en la norma que permita determinar cuándo utilizar adecuadamente lo establecido en el artículo 11 para campos en exploración y producción, ya que en algunos casos se generan aguas de perforación en campos que están en etapa de producción.

Revisar el umbral de reporte para metales pesados por parte de los laboratorios dado que este se encuentra por debajo del umbral de la norma, y debido a esto no se pudo determinar si los metales pesados cumplen o no con la resolución, ya que el mecanismo utilizado es ambiguo.

Las compañías petroleras que realizan vertimientos en cuerpos de aguas superficiales deberían tener un control riguroso en cuanto a la calidad del análisis de las concentraciones y el posterior tratamiento de los componentes asociados a las aguas, a través de alternativas tecnológicas secundarias o terciarias (que sean viables técnico-económicamente), debido a que el incumplimiento de algún parámetro presente en la resolución puede llegar a crear sanciones o comparendos ambientales generando así, retroceso en las diferentes operaciones.

Con el fin de complementar el análisis realizado en esta investigación, se recomienda realizar estudios de laboratorio o desarrollo de pruebas piloto con las diferentes alternativas y/o tecnologías propuestas que puedan brindar una solución viable y económicamente factible a los parámetros críticos de acuerdo a las necesidades de cada campo/pozo.

9. Referencias bibliográficas

ACP. (2015). *Informe de desempeño ambiental*.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (Septiembre de 1997). *Sulfuro de Carbono*. Obtenido de <http://www.cvs.saude.sp.gov.br/pdf/toxfaq162.pdf>

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (6 de Mayo de 2016). *Hidrocarburos Totales de Petróleo*. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts123.html

Agencia para Sustancias Tóxicas y Registros de Enfermedades. (s.f.). *Tricloroetileno*. . Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs19.html

Aguamarket. (s.f.). *Diccionario*. Obtenido de <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3286>

Arnold, K., & Stewart, M. (2008). *Surface Production Operations*. Houston, Texas: GPP, Third Edition. United States of America. Elsevier.

Atcal. (2015). *Resolucion 631, aliado en tecnología y calidad*. Obtenido de <http://www.atcalsas.com/normatividad/page/norma/norma/resolucion-631-de-2015>

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (s.f.). *Glosario*. Obtenido de <http://www.anla.gov.co/subdireccion-evaluacion-y-seguimiento>

Boyd, C. E. (2002). *Estándares de la calidad del agua: amoniaco de nitrógeno total*. Boletín *Nicovita Camarón de mar*. Edición 1. Volumen 7. Diciembre .

CENSANT AGUA VIVA. (2002). *Impacto ambiental de la industria petrolera: La perforación (OILWATCH MANUAL DE MONITOREO AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA PETROLERA” 2007)*.

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 063. (17, marzo)*.

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015 (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado publico . Bogotá D. C. .*

department of Environment and Heritage Protection. . (Marzo de 2002). *BTEX Chemicals. Queensland, Australia*. Obtenido de <https://www.ehp.qld.gov.au/management/non-mining/btex-chemicals.html>

Depetris, P. (s.f.). *Fenoles*. Obtenido de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Fenoles.htm>

Díaz, A., Rincón, N., Fernandez, N., & Marín, J. (s.f.). Degradación de fenoles totales mediante reactores SBR en aguas de producción petroleras. . *Rev Ciencia* 13(1), 281-291.

Frers, C. (30 de mayo de 2005). *Los Problemas de las Aguas Contaminadas. ECOPORTAL .* Obtenido de https://www.ecoport.net/temas-especiales/contaminacion/los_problemas_de_las_aguas_contaminadas

Geingenieria S.A – hupecol LL.C. (s.f.). *Modificación Resolución 608 del 05 de Abril de 2006 (Art. 3) que autoriza el vertimiento de las aguas de producción tratadas al río Manacacías*.

Hammeken Arana, A. M., & Romero García, E. (s.f.). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Chol*.

IDEAM. (2004). *Fósforo total en agua por digestión ácida, método del ácido ascórbico*.

- IDEAM. (2007). *Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103-105°C.* .
- Instituto Internacional para el Manejo del Cianuro. (2012). *Definiciones y siglas para el Código Internacional para el Manejo de Cianuro.*
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2013). *Documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional de 1,2-Dicloroetileno.* España.
- Jaimes, M., & Pico, M. (2009). *Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras- Aplicación campo Colorado.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Jarava, R., & Planeta, I. (2017). *Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A.* Tesis de pregrado. UNAD, Valledupar. .
- Lenntech. (Septiembre de 2017). *Tratamiento y purificación del agua: Tabla periódica.* Obtenido de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos.htm>
- Lizarazo, J., & Orjuela, M. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Lopez, K., & Rodriguez, V. (2015). *Analisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales de perforación y producción en los campos de Santander durante el 2014-2016, según la resolución 0631 del 2015.* . Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización.* España: McGrawHill.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (2007). *Cloruros (CL TOTAL).* España. Obtenido de <http://www.prtr-es.es/Cloruros-Cl-total,15666,11,2007.html>

- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (2007). *Compuestos orgánicos halogenados (AOX)*. España. Obtenido de <http://www.prtr-es.es/Compuestos-OrganicosHalogenados-AOX,15627,11,2007.html>
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (s.f.). *Fluoruros (Como F TOTAL)*. España. Obtenido de <http://www.prtr-es.es/Fluoruros-como-total-694112007.html>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Obtenido de . 2014. P. 14
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Decreto 3930. Artículo 1*.
- Montes Páez, E. G. (2010). *Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros*. . Universidad Industrial de Santander.
- Navarro, A. (1995). *“Environmenatly Safe Drilling Practices”*. Cap 8.
- R.S. Ramalho . (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. España: Reverté, S. A. .
- Ramalho S., R. (s.f.). *Tratamiento de aguas residuales*. Canadá: Reverté.
- Real Academia Española. (s.f.). *Cromo*. Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=BL1dx7W|BL2nfP8>
- Real Academia Española. (s.f.). *Hierro*. Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=KNC9a9J>
- Real Academia Española. (s.f.). *Selenio*. Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=XUUEoRj>
- Real Academia Española. (s.f.). *Niquel*. Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=QWTCFY4>
- Real Academia Española. (s.f.). *Plata*. Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=TM1dBxX>
- Rodriguez, V., & Lopez, K. (2017). *Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales de perforación y producción en los campos de Santander durante el 2014-2016, según la Resolución 0631 del 2015*. Universidad Industrial de Santander,: Bucaramanga.

- Rojas, R. (2002). *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales: Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales* .
- Romero Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*. ISBN 958-8060-13-3. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sainz Sastre, J. A. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Primera Edición*. ISBN: 978-84-88723-58-1. Madrid, España: Fundación EOI.
- Serteagua . (2013). *Flotación inducida por gas (IGF)*. Obtenido de www.serteagua.com/index.php/equipos-de-flotación-tipos-daf-igf
- Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. (s.f.). *Laboratorio química analítica 502503*. Obtenido de . p.1.
- Vacca, V., Rincón, N., Colina, G., Marín, J., Díaz, A., Belhing, E., & Fernandez, N. (s.f.). Tratamiento anaerobio para la remoción de compuestos fenólicos e hidrocarburos saturados. . *Rev Ciencia*.
- Vargas, P. (2016). *Portafolio. rubiales el campo mas productor de crudo en el pais abre puertas*. Obtenido de <http://www.portafolio.co/negocios/empresas/rubiales-el-campo-mas-productor-de-crudo-en-el-pais-abre-sus-puertas-498303>
- Viana, J. (s.f.). *Disposición y tratamiento del agua producida. ARPEL*. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf>
- Vival Water Technologies. Perú. (s.f.). *Agua pozo petrolero*. Obtenido de <https://vwt.jimdo.com/folleto-general/membranas-vibratorias-vsep/agua-pozo-petrolero/>