

**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**

**KAREN DANITZA LÓPEZ BARBA
VALENTINA RODRÍGUEZ ARIAS**

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

**KAREN DANITZA LÓPEZ BARBA
VALENTINA RODRÍGUEZ ARIAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
de Petróleos**

**Director
Harving Díaz Consuegra
Ingeniero de Petróleos
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2017**

DEDICATORIA

A Dios, a mi familia y amigos que me acompañaron durante mi carrera y la realización de esta investigación.

A mis papás, Jairo y Patricia, por apoyarme incondicionalmente y darme la oportunidad de seguir adelante y cumplir mis sueños. Sé que soy un motivo de orgullo para ustedes y espero no defraudarlos.

A mi abuela Leonor, por aconsejarme en cada momento y estar pendiente de mí.

A mi hermana, María Paula (Q.E.P.D), porque empezamos juntas a cumplir nuestros sueños, pero el camino no fue fácil y hoy lo estoy haciendo por las dos. Estarás siempre en cada paso que dé.

A mi novio, Carlos Felipe, por acompañarme, apoyarme, aconsejarme, ser incondicional y ayudarme siempre que lo necesité.

A mis amigos, colegas y compañeros que siempre tuvieron palabras de aliento y de una u otra forma aportaron a mi crecimiento personal y profesional.

Y por supuesto a Valentina, por ser mi amiga, compañera y colega, porque a pesar de los obstáculos y la distancia supimos complementarnos y sacar esta investigación adelante.

Karen D. López B.

DEDICATORIA

Esta investigación marca el final de mi etapa universitaria, la cual me permitió conocer personas extraordinarias, vivir momentos increíbles y crecer a partir de las experiencias.

Hoy agradezco a mis padres, quienes son mi orgullo y fuente de motivación para enfrentar cualquier reto de vida. De ellos aprendí el significado de la palabra perseverancia y por eso son lo primero en lo que pienso cuando necesito sentir que soy capaz de seguir adelante. Dedico también este logro a mis hermanos, compañeros únicos de esta aventura y a quienes amo incondicionalmente.

Este tiempo me crucé con personas maravillosas, como mis amigos y compañeros de universidad. Cada uno llenó mi corazón con su energía y compañía particular. Gracias también a las personas que por diferentes circunstancias y jugadas del destino ya no están, pero dejaron algo de sí en mi corazón. Todos somos algo de aquello que hemos perdido.

A mi familia, gracias

Y a ti Karen, gracias, porque esto no sería posible sin tu organización, amistad y apoyo.

Valentina Rodríguez Arias.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras se permiten brindar los más sinceros agradecimientos a:

El Ingeniero Harving Díaz Consuegra, por su dedicación, tiempo y esmero; porque nos acompañó de principio a fin y siempre tuvo palabras de aliento y consejos que ayudaron a que esta investigación saliera adelante.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por permitir que tuviéramos una formación excelente durante toda la carrera.

A la Universidad Industrial de Santander, por ofrecernos además de un espacio académico uno cultural, deportivo y social.

A la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, por la información brindada.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	26
1. MARCO TEÓRICO.....	27
1.1 AGUAS DE PERFORACIÓN	27
1.2 AGUAS DE PRODUCCIÓN	28
1.3 TRATAMIENTOS.....	30
1.3.1 Tratamiento primario.....	31
1.3.2 Tratamiento secundario	32
1.3.3 Tratamiento terciario	33
1.4 MARCO LEGAL COLOMBIANO.....	34
1.4.1 Decreto Ley 2811 de 1974.....	35
1.4.2 Ley 9 de 1979	35
1.4.3 Decreto 1594 de 1984.....	36
1.4.4 Decreto 3930 de 2010.....	36
1.4.5 Resolución 0631 de 2015	36
2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
3. COMPARACIÓN ENTRE EL DECRETO 1594 DE 1984 Y LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015.....	42

4. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS VERTIMIENTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS CAMPOS EN SANTANDER, SEGÚN LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015	49
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	53
5.1 ANÁLISIS DE PERFORACIÓN.....	53
5.2 ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN	61
6. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN A LOS PARÁMETROS CRÍTICOS	70
6.1 pH	70
6.2 Cloruros	70
6.3 Sulfatos.....	71
6.4 Fenoles totales.....	71
6.5 SST.....	72
6.6 DBO ₅ Y DQO	72
6.7 Hierro	73
6.8 Grasas y aceites	74
6.9 Hidrocarburos totales.....	75
6.10 Casos de estudio	77
6.10.1 Alternativa tratamiento primario: Coagulación	78
6.10.2 Alternativa tratamiento secundario: PAMLA.....	79
6.10.3 Alternativa tratamiento terciario: Ósmosis inversa	81
7. CONCLUSIONES.....	83
8. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA.....	89

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Un barril producido equivale a 12 barriles de agua.....	29
Figura 2. Distribución de las aguas residuales en la etapa de producción.....	29
Figura 3. Clasificación de tratamientos para aguas residuales según Antonio J. Mota de la Universidad de Granada	31
Figura 4. Línea del tiempo sobre el marco legal Colombiano de los recursos hídricos	35
Figura 5. Tiempo de transición estando cumpliendo el Decreto 1594 de 1984.....	38
Figura 6. Tiempo de transición sin estar cumpliendo el Decreto 1594 de 1984	38
Figura 7. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimiento (Temperatura, pH, cloruros, sulfatos, selenio, fenoles totales, sólidos totales y sedimentables, DBO5 y hierro) según la resolución 0631 del 2015 para los años 2014 – 2016.....	50
Figura 8. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimiento (Grasas totales, cadmio, plomo, HTP, arsénico, cromo, DQO, mercurio, vanadio, cianuro) según la resolución 0631 del 2015 para los años 2014 – 2016	51
Figura 9. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimiento (Cobre, níquel, nitrógeno total, zinc, sulfuros) según la resolución 0631 del 2015 para los años 2014 – 2016	52
Figura 10. pH en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015.....	53
Figura 11. Cloruros en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015.....	54
Figura 12. Sulfatos en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015.....	55

Figura 13. Fenoles totales en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015.....	56
Figura 14. Sólidos suspendidos totales en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015.....	57
Figura 15. DBO ₅ en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015.....	58
Figura 16. Hierro en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015.....	59
Figura 17. DQO en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015.....	60
Figura 18. Cloruros en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016	61
Figura 19. Sulfatos en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016	62
Figura 20. Fenoles totales en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016	63
Figura 21. Sólidos suspendidos en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016.....	64
Figura 22. DBO ₅ en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016	65
Figura 23. Hierro en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016	66
Figura 24. Grasas y Aceites en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016	67
Figura 25. HTP en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016	68
Figura 26. DQO en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Métodos más comunes según el tipo de tratamiento	34
Tabla 2. Generalidades de los campos evaluados	40
Tabla 3. Cuadro comparativo entre el Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 de 2015.....	42
Tabla 4. Alternativas de tratamiento a los parámetros críticos	75

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Proyecto Coyote.....	
ANEXO B: Campo Gala.....	
ANEXO C: Campo Llanito.....	
ANEXO D: Campo Yarigui Pozo 132.....	
ANEXO E: Campo Yarigui Pozo 133.....	
ANEXO F: Campo Yarigui Pozo 134.....	
ANEXO G: Campo Yarigui Pozo 135.....	
ANEXO H: Campo Yarigui Pozo 145.....	
ANEXO I: Campo Yarigui Pozo 146.....	
ANEXO J: Campo Yarigui Pozo 154.....	
ANEXO K: Pozo Cantagallo 144.....	
ANEXO L: Pozo Cantagallo 156.....	
ANEXO M: Pozo Cantagallo 157.....	
ANEXO N: Campo Pavas Cáchira.....	
ANEXO O: Campo Barranca Lebrija.....	
ANEXO P: Campo Opón.....	
ANEXO Q: Campo Ave Fénix.....	

GLOSARIO

ACIDEZ TOTAL: capacidad cuantitativa para reaccionar con una base fuerte hasta un pH designado.¹

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).²

AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS: son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas.³

ALCALINIDAD TOTAL: suma de todas las bases titulables y por consecuente su capacidad de neutralizar ácidos.⁴

ANÁLISIS Y REPORTE: cada empresa debe analizar y registrar los parámetros que se encuentren con esta especificación para poder monitorearlos, así no esté definido un límite máximo permisible para cada uno.

ARSÉNICO: metaloide encontrado en forma natural en pequeñas concentraciones generalmente en la superficie de las rocas combinado con azufre y/o metales.⁵

¹ UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO. Laboratorio química analítica 502503. p.1.

² COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. 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 público y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D.C. 2015. p. 2

³ Ibid. p. 2.

⁴ LENNTECH. Tratamiento y purificación del agua: Tabla periódica. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos.htm>

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.⁶

BTEX: son productos producidos del petróleo, se encuentran en las pinturas, lacas, diluyentes, productos de caucho, adhesivos, tintas, cosméticos y productos farmacéuticos.⁷

CADMIO: metal pesado que naturalmente no se encuentra en estado puro, por afinidad química está asociado con metales como el zinc, plomo y cobre.⁸

CARBAMATO: compuesto orgánico derivado del ácido carbámico utilizado como plaguicida.⁹

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.¹⁰

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.¹¹

CLORUROS: son compuestos constituidos por uno o varios átomos de cloro, a los que unidos con átomos de elementos poco electronegativos o elementos

⁵ *Ibíd.* [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/as.htm>

⁶ *Ibíd.* [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ba.htm>

⁷ DEPARTMENT OF ENVIRONMENT AND HERITAGE PROTECTION. BTEX Chemicals. Queensland, Australia. Marzo 2002. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: <https://www.ehp.qld.gov.au/management/non-mining/btex-chemicals.html>

⁸ LENNTECH. Op. Cit., [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>

⁹ DEPARTMENT OF ENVIRONMENT AND HERITAGE PROTECTION. Fact Sheet Population Health Branch: Carbamate insecticides. Queensland, Australia. Marzo 2002. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: https://www.health.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0027/422298/4174.pdf

¹⁰ INSTITUTO INTERNACIONAL PARA EL MANEJO DEL CIANURO. Definiciones y siglas para el Código Internacional para el Manejo de Cianuro. Junio 2012. p. 3.

¹¹ LENNTECH. Op. Cit., [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/zn.htm>

metálicos pueden formar sales de carácter básico, ácidos y moléculas orgánicas complejas.¹²

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

COLOR REAL: color de la muestra después de ser filtrada y los materiales suspendidos removidos.

COMPUESTOS ORGÁNICOS HALOGENADOS ADSORBIBLES: son sustancias químicas orgánicas que contienen uno o varios átomos de un elemento halógeno, generalmente cloro.¹³

CROMO: metal de transición que caracterizado por su alta resistencia a la corrosión, en grandes concentraciones resulta tóxico para el ser humano.¹⁴

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.¹⁵

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.¹⁶

DICLOROETILENO: líquido incoloro con un olor similar al del cloroformo. Se descompone progresivamente cuando se expone a la luz, el aire y la humedad,

¹² MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Cloruros (CL TOTAL). España. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Cloruros-Cl-total,15666,11,2007.html>

¹³ MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Compuestos orgánicos halogenados (AOX). España. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Compuestos-Organicos-Halogenados-AOX,15627,11,2007.html>

¹⁴ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=BL1dx7W|BL2nfP8>

¹⁵ SAINZ SASTRE, Juan Antonio. Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Primera Edición. Madrid, España: Fundación EOI, 2005. p. 43. ISBN: 978-84-88723-58-1

¹⁶ *Ibíd.*, p. 45

dando lugar a productos ácidos y corrosivos entre los que se encuentran el cloruro de hidrógeno. Insoluble en agua.¹⁷

DIFENIL POLICLORADOS: grupo de sustancias químicas sintéticas formadas por series de compuestos organoclorados. Constituyentes de la familia de congéneres, formada por la cloración de diferentes posiciones del bifenilo.¹⁸

DUREZA CÁLCICA: corresponde a la suma de iones de calcio presentes en el agua.¹⁹

DUREZA TOTAL: corresponde a la suma de iones de calcio y magnesio presentes en el agua.²⁰

EXTRACTO DE CARBONO-CLOROFORMO: prueba usada para medir el contenido orgánico en el agua.²¹

FENOLES: compuestos orgánicos aromáticos que contienen el grupo hidroxilo como su grupo funcional.²²

FLUORUROS: compuestos inorgánicos formados por la unión de uno o varios átomos de flúor a otro elemento químico.²³

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.²⁴

¹⁷ INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional de 1,2-Dicloroetileno. España. 2013.

¹⁸ NOGUEZ PEDROZA, Luis Ángel; CANSECO LÓPEZ, Carlos Alberto. Manejo de basura eléctrica en México bifenilos policlorados. UNAM. México, 2010.

¹⁹ NEIRA GUTIÉRREZ, Marco Antonio. Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile. Universidad de Chile. 2006. p. 10-12.

²⁰ *Ibid.* p. 10-12

²¹ UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA. Separación por cromatografía en columna de pigmentos vegetales y sus espectros de absorción. Departamento de Ingeniería y Ciencias Químicas. p. 25-35.

²² DEPETRIS, P. Fenoles. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Fenoles.htm>

²³ MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Fluoruros (Como F TOTAL). España. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: <http://www.prr-es.es/Fluoruros-como-total-694112007.html>

²⁴ IDEAM. Fósforo total en agua por digestión ácida, método del ácido ascórbico. 2004. p. 3.

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.²⁵

HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS: grupo extenso de compuestos orgánicos, formados por la fusión de dos o más anillos de benceno y en algunos casos un anillo pentagonal.²⁶

HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO: mezcla de productos químicos compuestos principalmente de hidrógeno y carbono, llamados hidrocarburos.²⁷

HIERRO: metal maleable y abundante, de alta densidad y fusibilidad. La presencia de éste en el agua provoca precipitación y coloración no deseada.²⁸

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.²⁹

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.³⁰

²⁵ SAINZ SASTRE, Juan Antonio. Op. Cit., p. 35

²⁶ KATIYAR, Santosh K; AGARWAL, Rajesh y MUKHTAR, Hasan. CRC Handbook of chromatography: liquid chromatography of polycyclic aromatic hydrocarbons. Boca Ratón, Florida: CRC Press, 1993. p. 1-17. ISBN: 0-8493-3005-X

²⁷ AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. Hidrocarburos Totales de Petróleo. 6 Mayo 2016. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts123.html

²⁸ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=KNC9a9J>

²⁹ AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Glosario. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.anla.gov.co/subdireccion-evaluacion-y-seguimiento>

³⁰ AGUAMARKET. Diccionario. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3286>

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.³¹

NÍQUEL: metal de transición, presente en pequeñas cantidades en el agua de mar, el petróleo y en la mayor parte del carbón.³²

NITRATOS: es producido cuando los organismos nitrificantes oxidan el nitrógeno amoniacal.³³

NITRÓGENO AMONIAICAL: consiste de amoníaco no ionizado (NH₃) e ion amoníaco (NH₄).³⁴

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.

ORGANOCOLORADO: compuesto químico orgánico donde los átomos de hidrogeno unidos al carbono, son reemplazados por átomos de cloro. Conforman un grupo de pesticidas artificiales.³⁵

ORGANOFOSFORADO: grupo de sustancias orgánicas derivadas de la estructura química del fósforo. Utilizado como aditivos del petróleo, disolventes, fungicidas e insecticidas, entre otros.³⁶

ORTOFOSFATOS: fósforo soluble.

³¹ AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Glosario. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.anla.gov.co/subdireccion-evaluacion-y-seguimiento>

³² REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=QWTCFY4>

³³ BOYD, Claude E. Estándares de la calidad del agua: amoníaco de nitrógeno total. Boletín Nicovita Camarón de mar. Edición 1. Volumen 7. Diciembre 2002. p. 1.

³⁴ Ibid. p. 1.

³⁵ REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA. Compuesto organocolorado. [En línea]. [Agosto 2017]. <http://diccionario.raing.es/es/lema/compuesto-organocolorado>

³⁶ FERNANDEZ A, Daniel G; MANCIPE G, Liliana C y FERNANDEZ A, Diana C. Intoxicación por Organofosforados. 2010, vol.18, n.1 [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-52562010000100009&lng=en&nrm=iso. p. 84-92. ISSN 0121-5256.

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.³⁸

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.³⁹

REFORESTACIÓN SILVOPASTORIL: repoblación de un terreno con arbustos y árboles donde a su vez se pueden practicar la ganadería y la crianza de animales domésticos.⁴⁰

SELENIO: elemento químico insoluble en agua y alcohol, ligeramente soluble en sulfuro de carbono y soluble en éter.⁴¹

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.⁴²

³⁷ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Presentación nueva norma de vertimientos. Bogotá, 18 Marzo 2015. [En línea]. [Noviembre 2016]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>

³⁸ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=TM1dBxX>

³⁹ *Ibid.* [En línea] Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=TQB0VQN>

⁴⁰ ECOPETROL S.A. El petróleo y su mundo. Bogotá, Colombia. 2014. p. 35-37.

⁴¹ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=XUUEoRj>

⁴² IDEAM. Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103-105°C. 2007. p. 2.

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES: son todos los sólidos que se desplazan por arrastre en el agua y pueden ser: limos, arcillas, arena, entre otros.⁴³

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.⁴⁴

SULFUROS: producidos por la reducción biológica de sulfatos y la descomposición de material orgánico. Significativamente tóxicos por inhalación o ingestión.⁴⁵

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.⁴⁶

SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO: es un colorante catiónico donde el SAAM actúa como anión y el azul de metileno como catión, en donde la medida se da por la intensidad de color resultante. Los tensoactivos aniónicos se encuentran entre las muchas sustancias naturales y sintéticas activas al azul de metileno.⁴⁷

TRICLOROETILENO: sustancia química de síntesis, se presenta en forma de líquido incoloro, inflamable, de aroma y sabor dulce.⁴⁸

VANADIO: metal de transición que presenta una alta resistencia a las bases, al ácido sulfúrico y al ácido clorhídrico.⁴⁹

⁴³ *Ibíd.* p. 2.

⁴⁴ LENNTECH. Op. Cit. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos.htm>

⁴⁵ *Ibíd.* [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos.htm>

⁴⁶ AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. Sulfuro de Carbono. Septiembre 1997. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: <http://www.cvs.saude.sp.gov.br/pdf/toxfaq162.pdf>

⁴⁷ IDEAM. Tensoactivos aniónicos en agua – Método SAAM. 2007. p. 2.

⁴⁸ AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y REGISTROS DE ENFERMEDADES. Tricloroetileno. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs19.html

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

A	:	Ausente
ACP	:	Asociación Colombiana de Petróleo.
A.R	:	Análisis y Reporte.
ARD	:	Aguas Residuales Domesticas.
AOX	:	Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles.
BA	:	Barriles de agua.
Bbl	:	Barriles.
Bbl / año	:	Barriles por año.
BTEX	:	Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno.
DBO₅	:	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DQO	:	Demanda Química de Oxígeno.
ECC	:	Extracto De Carbono-Cloroformo.
HAP	:	Hydrocarburos Aromáticos Policíclicos.
HTP	:	Hydrocarburos Totales de Petróleo.
ICA	:	Informe de Cumplimiento Ambiental.
Kg / d	:	Kilogramo por día.
mg / L	:	Miligramo por litro.
mg / L CaCO₃	:	Miligramo por litro de carbonato de calcio.

⁴⁹ LENNTECH. Op. Cit. [En línea]. [Septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/v.htm>

mg / L O₂	:	Miligramo por litro de oxígeno.
mm	:	Milímetros
M	:	Mil
MM	:	Millones
MMPCPA	:	Millones de pies cúbicos por año.
m⁻¹	:	Unidad de número de ondas.
m³	:	Metro cúbico
N.D	:	No Definido
N. R.	:	No Reportado
PRTLGV	:	Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos.
PTAR	:	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
PW	:	Puerto Wilches
R	:	Remoción
SAAM	:	Sustancias Activas al Azul de Metileno.
SB	:	Sur de Bolívar
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 DE PERFORACIÓN Y PRODUCCIÓN EN LOS CAMPOS DE SANTANDER DURANTE EL 2014-2016, SEGÚN LA RESOLUCIÓN 0631 DEL 2015*

AUTOR: Karen Danitza López Barba
Valentina Rodríguez Arias**

PALABRAS CLAVE: vertimientos, aguas, perforación, producción, resolución.

DESCRIPCIÓN:

En el sector de hidrocarburos la generación de aguas residuales en la exploración y producción de un campo es intrínseca e inevitable. Es por esto que el gobierno colombiano ha implementado normativas que respondan a las necesidades actuales, como lo ha hecho con la implementación de la Resolución 0631, donde se instauran parámetros más exigentes para el vertimiento puntual a cuerpos de aguas superficiales y sistemas de alcantarillado público. Estas aguas residuales constituyen un problema ambiental grave si no se disponen tratamientos adecuados que controlen y minimicen los contaminantes presentes en ellas.

El propósito de esta investigación consiste en evaluar el impacto de esta nueva normatividad en campos petroleros ubicados en Santander durante el periodo 2014 - 2016. Esto mediante el análisis fisicoquímico de las aguas residuales industriales generadas por la exploración y la producción del sector de hidrocarburos y que como disposición final son vertidas a cuerpos de agua superficiales. La información fue obtenida de los ICA radicados en la ANLA. Los resultados muestran que un número considerable de campos estarían incumpliendo la normatividad actualmente vigente en diferentes parámetros. Por esta razón, se proponen alternativas de tratamiento a los parámetros críticos que permitirían minimizar el impacto ambiental que provocan. Esto con el fin de evitar sanciones y poder cumplir con los requerimientos que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece.

* 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 SANTANDER FIELDS DURING 2014-2016, ACCORDING TO RESOLUTION 0631 OF 2015*

AUTHORS: Karen Danitza López Barba
Valentina Rodríguez Arias**

KEYWORDS: discharge, wastewater, drilling, production, resolution.

DESCRIPTION:

In the hydrocarbon sector the generation of wastewater in the exploration and production of a field is intrinsic and inevitable. This is why the Colombian government has implemented regulations that respond to current needs, as it has done with the implementation of Resolution 0631, where more demanding parameters are established for the timely discharge to bodies of surface water and public sewage systems. This wastewater constitutes a serious environmental problem if suitable treatments are not available to control and minimize the contaminants that are present.

The purpose of this research is to evaluate the impact of this new regulation on oil fields located in Santander during the period of 2014-2016. This is done through the physiochemical analysis of the industrial wastewater generated by the exploration and production of the hydrocarbon sector that as a final disposal are discharged into superficial bodies of water. The information was obtained from the ICAs available in the ANLA. The results show that a considerable number of fields would be breaking the current regulations in different parameters. For this reason, treatment alternatives are proposed to critical parameters that would minimize the environmental impact they cause. This in order to avoid sanctions and be able to comply with the requirements that the Ministry of Environment and Sustainable Development establishes.

* Bachelor Thesis

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

INTRODUCCIÓN

El sector de hidrocarburos es uno de los ocho sectores económicos del país que está directamente relacionado con los vertimientos a los cuerpos de aguas superficiales, donde las aguas residuales de perforación y producción representan una de las problemáticas más importantes ya que son éstas las que poseen contaminantes que requieren ser controlados y minimizados.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la resolución 0631 el 17 de marzo de 2015, que modifica el decreto 1594 de 1984, donde se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales. Es importante resaltar que esta resolución es más exigente y la modificación y el fortalecimiento de estos parámetros afectaría directamente la viabilidad de las operaciones de producción de los campos tanto a nivel departamental como nacional, ocasionando que su implementación sea una coyuntura actual en la industria colombiana de hidrocarburos.

Actualmente, la resolución 0631 de 2015 se encuentra en un régimen de transición donde las empresas tienen de 4 a 5 años para implementar un plan de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos. Por tales motivos, mediante la investigación y el análisis de los informes de cumplimiento ambiental se determinarán cuáles son los parámetros que estarían incumpliendo dicha resolución en los vertimientos de las aguas residuales de perforación y producción de los campos de hidrocarburos ubicados en el departamento de Santander durante los años 2014, 2015 y 2016, permitiendo hacer recomendaciones a la industria para empezar a tomar las medidas correspondientes y poder cumplir con los requisitos propuestos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 AGUAS DE PERFORACIÓN

La etapa de perforación en los campos petroleros se presenta durante la fase exploratoria o en pozos de desarrollo. En ella se generan aguas residuales que provienen de los fluidos de perforación utilizados para mejorar la eficiencia del proceso y la productividad de los yacimientos. Según la ACP, en el 2014 hubo 978 pozos en desarrollo perforados en los cuales se vertió 475 M m³ de agua tratada resultante del proceso.⁵⁰ Por otra parte, en el año 2015 la cantidad de pozos en desarrollo que se perforaron fue de 710 y de ellos 52 M m³ de aguas residuales tratadas fueron vertidas,⁵¹ lo que representa una reducción en los vertimientos del 89 % comparado con el año anterior.

Los fluidos de perforación generalmente conocidos como lodos, se utilizan para controlar la presión de la formación, remover los cortes y residuos sólidos, así como también, sellar las formaciones permeables encontradas durante la perforación, enfriar y lubricar la broca, brindar estabilidad y control en el pozo.⁵² Estos fluidos presentan una fase discontinua que son los sólidos y una fase continua que son los líquidos, además, algunas veces por arrastre del gas en la formación se puede encontrar una fase gaseosa. En la fase continua se pueden encontrar fluidos base aceite, base agua y neumáticos, donde los fluidos base agua son los más utilizados por su economía y fácil preparación.

⁵⁰ ACP. Informe de gestión ambiental 2014. p. 18.

⁵¹ ACP. Informe de desempeño ambiental 2015. p. 20.

⁵² WILLIAMSON, Don. Fundamentos de los fluidos de perforación. Oilfield Review. Volumen 25, no. 1. p. 67.

1.2 AGUAS DE PRODUCCIÓN

Las aguas asociadas a la producción se generan durante la explotación de un campo petrolero y provienen de dos fuentes: agua asociada al yacimiento (agua de formación) y agua o vapor que se inyecta a los yacimientos durante los procesos de recuperación secundarios.

Por lo general, se identifica por ser agua salada y contener una serie de sustancias, además de los hidrocarburos, que afectan su tratamiento. Algunas de las sustancias que la constituyen son los sólidos disueltos, sólidos precipitados (escamas), gases disueltos, emulsiones de aceite en agua, concentraciones de aceite disuelto, aceite dispersado, sustancias tóxicas, materiales radiactivos naturales y bacterias. La composición y concentración de estas sustancias pueden variar entre campos e incluso entre diferentes zonas de producción dentro de un mismo campo.⁵³

Dependiendo del yacimiento productor, la cantidad de agua de producción puede representar entre el 80 % al 95 % del volumen total de los fluidos producidos, como es el caso de Campo Rubiales, operado por ECOPETROL S.A. y ubicado en el departamento del Meta en Colombia. En el 2015 por cada barril de crudo producido, se generaron 1,91 m³ de agua, que equivale a 12,02 Bbl de agua.⁵⁴ (Ver Figura 1).

⁵³ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface Production Operations. Third Edition. United States of America: Elsevier, 2008. p. 482-498. ISBN: 978-0-7506-7853-7

⁵⁴ ACP. Informe de desempeño ambiental 2015. p. 25.

Figura 1. Un barril producido equivale a 12 barriles de agua



Fuente: ACP. Informe de desempeño ambiental. 2015

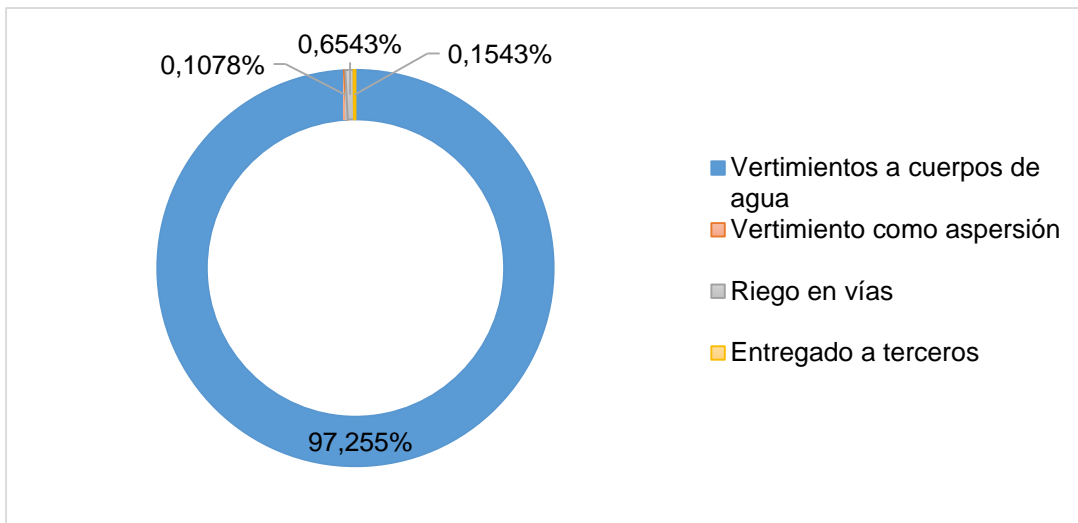
Después de que estas aguas reciban el tratamiento adecuado, se debe considerar un método de disposición final para con ello lograr reducir el impacto ambiental que generan, los métodos más usados son:

- Vertimientos a cuerpos de aguas superficiales como los ríos en donde el agua residual se mezcla con el río o cualquier otro cuerpo superficial en un punto autorizado por la autoridad ambiental.
- Vertimiento como aspersión utilizada para regar cultivos y reforestación silvopastoril.⁵⁵
- Riego en vías para controlar el polvo o cualquier material particulado.
- Reinyección que ayuda a mantener la presión en el pozo y mejorar la productividad.
- Evaporación donde por aumento de la temperatura el agua que se encuentra en fase líquida pasa a fase gaseosa y se regresa al ambiente.
- Entregar a terceros que se encargan de darle una disposición final.

En la Figura 2 se puede observar la disposición final que se le dieron a las aguas residuales en la etapa de producción en el año 2015.

Figura 2. Distribución de las aguas residuales en la etapa de producción

⁵⁵ ECOPEtrol S.A. El petróleo y su mundo. Bogotá, diciembre 2014. p. 37



Fuente: Modificado de ACP. Informe de desempeño ambiental. 2015

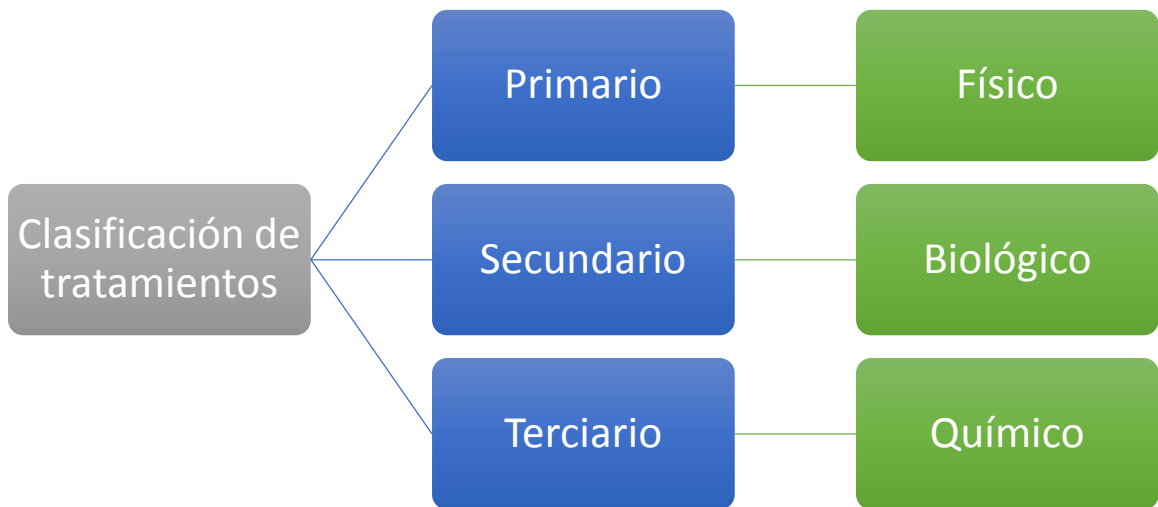
1.3 TRATAMIENTOS

El agua es el fluido que más se genera en la producción de petróleo y el retorno de estas aguas residuales a nuestros ríos o lagos nos convierte en usuarios directos o indirectos de las mismas. A medida que crece la población, aumenta la necesidad de proveer sistemas de tratamiento o renovación que permitan eliminar los riesgos para la salud y minimizar los daños al ambiente, ya que resulta innecesario destacar cuan vital es el agua para el desarrollo social y económico de los pueblos.

El tratamiento tiene como objetivo obtener un fluido que cumpla con la normatividad establecida, removiendo del agua residual aquellos constituyentes que pueden causar dificultades de operación y mantenimiento en los procesos posteriores o que, en algunos casos, no pueden tratarse conjuntamente con los demás componentes del agua residual.

Los tipos de tratamiento se pueden clasificar según la finalidad con la que son aplicados, ya que responden a las condiciones en las que se encuentra el fluido a tratar y es por eso que una caracterización correcta de éste es fundamental para el éxito y la optimización de un proceso. (Ver Figura 3)

Figura 3. Clasificación de tratamientos para aguas residuales según Antonio J. Mota de la Universidad de Granada



1.3.1 Tratamiento primario

Se refiere comúnmente al asentamiento o remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, como también a la remoción del aceite libre. Es un método que prepara el agua para el tratamiento secundario, ya que no altera su composición química. Por lo regular, el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual

y un 35 a 40% de la DBO.⁵⁶ Estos son algunos de los procedimientos más comunes, (Ver Tabla 1).

- Filtración: consiste en a la eliminación física de partículas (ej. Sólidos y arenas) de acuerdo a su tamaño, clasificándose así en filtración de partículas, microfiltración, y ultrafiltración.
- Separador API: su método de separación se basa en la diferencia de densidades. Eliminando entre el 50-99% de aceite y sólidos con tamaños mayores a 100 micras.⁵⁷
- Sedimentación primaria: su objetivo es concentrar y remover los sólidos del agua residual. Este tipo de sedimentación se realiza sin la adición de coagulantes químicos.⁵⁸

1.3.2 Tratamiento secundario

Es el tratamiento biológico para remover la materia orgánica disuelta presente en el agua que está siendo tratada. Se usa principalmente para remoción del hierro y bajar la dureza del agua (calcio y magnesio). Incluye los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas, sedimentación secundaria, entre otros.

- Lodos activados: Consiste en un tratamiento biológico de cultivos suspendidos, donde el residuo se estabiliza en un reactor bajo condiciones aeróbicas (aireamiento). Durante el crecimiento y la mezcla que se genera

⁵⁶ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999. p. 129-131. ISBN 958-8060-13-3

⁵⁷ RETEMA. Revista técnica de medio ambiente. Planta de tratamiento de efluentes de la refinería de Cartagena. Edición 167, 2013. p. 75

⁵⁸ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL. Universidad Autónoma de México. Tratamiento de Aguas residuales: sedimentación primaria.

los organismos floculan, formando una masa activa, la cual recibe el nombre de lodos activos.

- Sedimentación secundaria: Su función consiste en separar los lodos activados del líquido-mezcla. Los tipos de tanques más usados son los tanques circulares y rectangulares.⁵⁹
- Sistema de lagunas: Es una tecnología robusta y de carácter biológico que se constituye de lagos artificiales desarrollados para remover sólidos, materia orgánica y destruir microorganismos no deseados presentes en el agua residual. Su aireación puede ser mecánica o simplemente no tenerla.⁶⁰

1.3.3 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario o avanzado, también llamado como tratamiento químico supone, generalmente, la necesidad de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de las fuentes receptoras o de mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reúso.

- Ósmosis inversa: Es una tecnología de membrana capaz de rechazar contaminantes de tamaños de 0.0001 mm, a través de una membrana semipermeable por un proceso de difusión controlada. En condiciones ideales se puede encontrar que debe ser capaz de tratar salmueras de hasta 65.000 mg/l de TDS.⁶¹
- Intercambiadores iónicos: Consiste en una tecnología que brinda un intercambio específico, basada en el proceso de adsorción, de manera continua. Incrementando los iones entre electrolitos o un electrón

⁵⁹ HAMMEKEN ARANA, Alejandro Mauricio; ROMERO GARCÍA, Eduardo. Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Chol. p. 118.

⁶⁰ BARAÑAO, Pablo Andrés; TAPIA, Luis Alejandro. Tratamiento de las aguas servidas: situación en Chile. 2004. p. 113.

⁶¹ FUNDACIÓN CHILE. Tecnologías emergentes y no convencionales, Santa Cruz, Bolivia. 2013. p. 10-11

solución complejo. Generando la capacidad para separar y concentrar contaminantes presentes.⁶²

Tabla 1. Métodos más comunes según el tipo de tratamiento

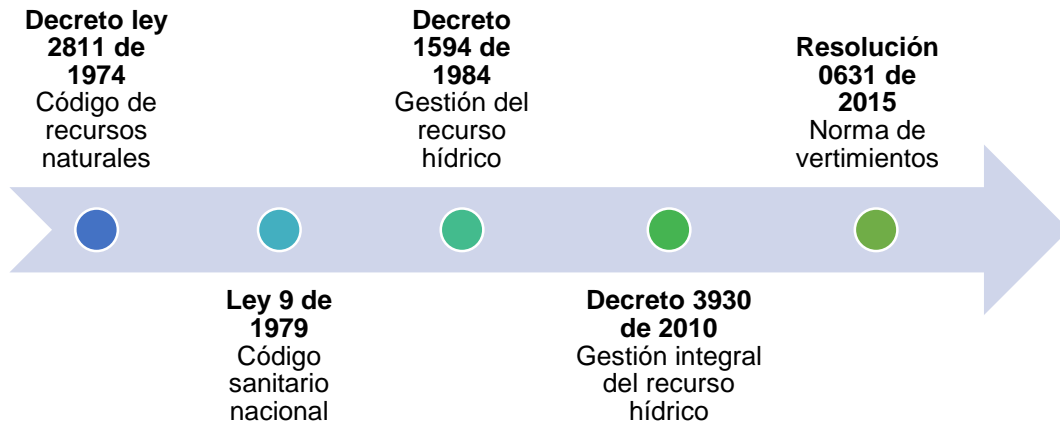
Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario
Remoción de sólidos	Lodos activados	Nano-filtración
Remoción de arena	Lagunas	Osmosis inversa
Sedimentación primaria	Filtros percoladores	Intercambio iónico
Separador API	Aireación y sedimentación	Oxidación avanzada

1.4 MARCO LEGAL COLOMBIANO

A través de los años se ha venido controlando y reduciendo la contaminación del agua por medio de decretos y leyes. La Figura 4 muestra una reseña histórica que ha tenido el marco legal colombiano con respecto al cuidado de los recursos hídricos.

⁶² Ibid. p. 18.

Figura 4. Línea del tiempo sobre el marco legal Colombiano de los recursos hídricos



Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

1.4.1 Decreto Ley 2811 de 1974

Crea el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente en el que se establece que el ambiente es de dominio público, inalienable e imprescriptible. Además, el estado y las personas particulares deben participar en la preservación y manejo de los recursos naturales renovables.⁶³

1.4.2 Ley 9 de 1979

Conocida como El Código Sanitario establece todas las normas generales que son necesarias para preservar, restaurar y mejorar la salud humana. Asimismo, los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación,

⁶³ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente - Anotado. 2014. p. 14.

legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afecten o puedan afectar las condiciones sanitarias del ambiente.⁶⁴

1.4.3 Decreto 1594 de 1984

Fue creado con la intención de regular el manejo del recurso hídrico, estableciendo unos criterios de calidad para el agua que permitiesen asignarle un tratamiento y disposición final adecuada.

1.4.4 Decreto 3930 de 2010

Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.⁶⁵ Sin embargo, este decreto no especifica los valores permitidos para los vertimientos en el sector de hidrocarburos.

1.4.5 Resolución 0631 de 2015

Reglamenta al artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el decreto 1594 de 1984 (vigente hace 30 años). Se conoce como la norma de vertimientos y permite controlar las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de aguas superficiales y que son vertidas por 73 actividades productivas distribuidas en 8 sectores económicos del país:

- Agroindustria
- Ganadería
- Minería

⁶⁴ MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. Ley 9 de 1979. Artículo 1.

⁶⁵ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 de 2010. Artículo 1.

- Hidrocarburos
- Elaboración de productos alimenticios y bebidas
- Fabricación y manufactura de bienes
- Actividades industriales, comerciales o de servicio que generan ARD y a los prestadores de servicio público de alcantarillado.
- Actividades asociadas con servicios y otras actividades.

En el sector de hidrocarburos, la resolución especifica límites máximos permisibles distribuidos en 40 parámetros para cada actividad asociada con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados) los cuales son: exploración, producción, refino, venta y distribución, transporte y almacenamiento.

Esta resolución es de obligatorio cumplimiento para todas aquellas personas y empresas que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicios y que en el desarrollo de las mismas generen aguas residuales, que serán vertidas en un cuerpo de agua superficial o al alcantarillado público. Todas las compañías deben entregar un ICA, reportando entre otras cosas los resultados de los monitoreos fisicoquímicos de los vertimientos que realicen, ya que por medio de estos informes se procede a hacer la respectiva auditoría y control. Dicho control se realiza a partir de la medición de la cantidad de sustancias descargadas, que es lo que impacta en la calidad del agua, y no en el proceso de tratamiento.⁶⁶

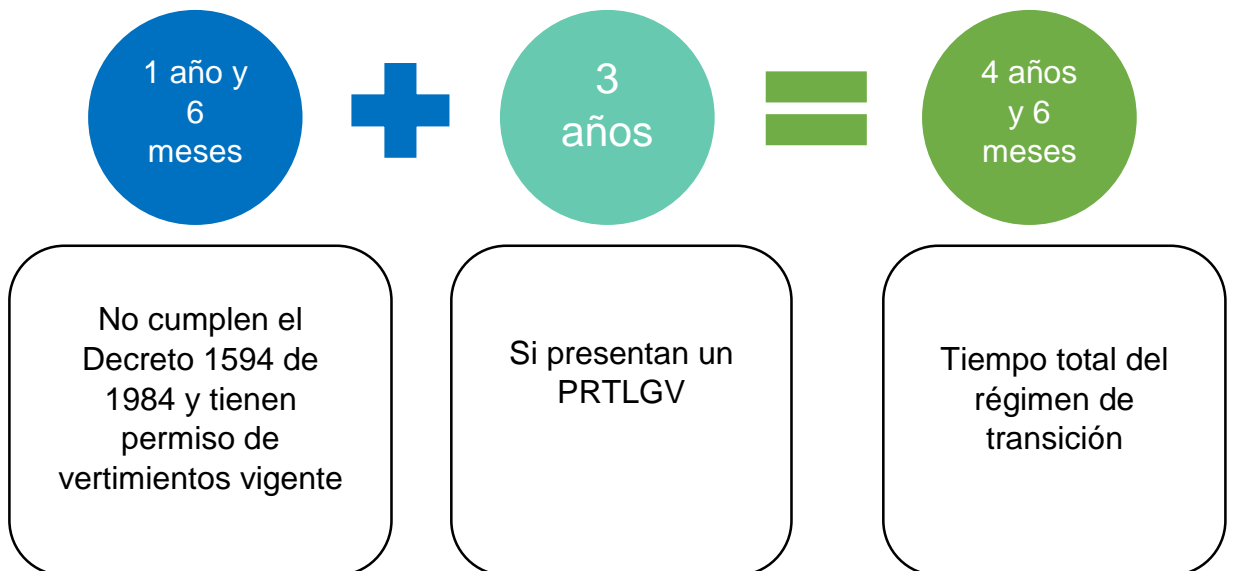
El tiempo de implementación y el régimen de transición para la aplicación de la norma empiezan a contar desde el 18 de abril de 2015. Los tiempos para cumplir la norma se observan en la Figura 5 y Figura 6.

⁶⁶ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Presentación nueva norma de vertimientos. Bogotá, 18 Marzo 2015. [En línea]. [Noviembre 2015]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>

Figura 5. Tiempo de transición estando cumpliendo el Decreto 1594 de 1984



Figura 6. Tiempo de transición sin estar cumpliendo el Decreto 1594 de 1984



2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de esta investigación tuvo como objetivo evaluar el cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales de los campos de producción para así poder determinar los parámetros críticos que se estarían incumpliendo. Al tener como alcance del proyecto los campos ubicados en el departamento de Santander la primera autoridad ambiental a la cual se debió recurrir para solicitar los ICA necesarios para llevar a cabo el respectivo análisis fue la Corporación Autónoma Regional de Santander - CAS -, ubicada en el municipio de San Gil, encargada entre otras cosas de velar por el buen manejo y aprovechamiento de los recursos naturales renovables.

En la CAS se llevó a cabo el proceso establecido para solicitar la información a través de diferentes medios en diferentes oportunidades, telefónicamente, mediante correo electrónico y como última instancia personalmente. Sin embargo, no fue posible obtener la información requerida ya que argumentaron no tenerla bajo su disposición. Por lo que se procedió a consultar en la autoridad nacional que es la Agencia Nacional de Licencias Ambientales - ANLA -, ubicada en Bogotá D.C., encargada entre otras cosas de realizar un seguimiento a la normativa ambiental del país.

De igual manera, siguiendo el procedimiento establecido, se gestionó por medio de derechos de petición a la ANLA los expedientes de los informes en los cuales fuera posible obtener información de los campos en producción ubicados en Santander que realizaran vertimientos de aguas residuales industriales a cuerpos de agua superficiales desde el año 2015 hasta la actualidad. A pesar de que se hizo un arduo proceso de investigación y búsqueda en la base de datos de la ANLA, no toda la información estaba disponible por cuestiones de interventoría o porque los informes se encontraban en un mal estado o no estaban en el

expediente y no podían ser incluidos en el análisis, por consiguiente, hubo limitaciones en la información recopilada.

Debido a eso es importante mencionar que el alcance de esta investigación consistía en la evaluación del cumplimiento de los vertimientos de las aguas asociadas a la producción únicamente de los campos situados en el departamento de Santander durante el año 2015. Sin embargo, se hizo necesaria la ampliación de este alcance con el fin de obtener un mayor provecho de la información recopilada, es decir, los ICA consultados fueron en su mayoría del año 2014 y de campos en donde sus aguas residuales pertenecen a perforaciones exploratorias o de campos en desarrollo, además de esto, dichos campos se encuentran ubicados en Santander, pero también con jurisdicción en departamentos aledaños como César, Bolívar y Norte de Santander.

Una vez recopilada la información, se clasificó y se prosiguió a evaluar el cumplimiento de cada parámetro según el límite establecido por la nueva normatividad, estableciendo así cuáles propiedades tendrían una tendencia a incumplir si se hacía 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 su tecnología, inversión y mejora, para acatar la nueva normatividad de vertimientos.

A continuación, se presenta en la Tabla 2 las generalidades de los campos en los que se centrará este estudio.

Tabla 2. Generalidades de los campos evaluados

La coma (,) representa decimal

Nombre	Ubicación	Operadora	Fluido producido	Producción 2016	Otros
Proyecto Coyote	Municipio de San Vicente de Chucurí, Departamento de Santander	Ecopetrol S.A. & Parex Resources Inc.	Petróleo	N.R.	Actualmente recibe el nombre de: Proyecto Marteja.
Campo Gala 1	Vereda Campo Gala, corregimiento Llanito. Municipio de Barrancabermeja (Santander).	Ecopetrol S.A.	Petróleo y gas	18.306 bbl/año	Produjo un 3% de la producción total del departamento de Santander en el año 2016
Campo Llanito	Corregimiento Llanito. Municipio de Barrancabermeja (Santander)	Ecopetrol S.A.	Petróleo y gas	22.882 bbl/año	Se realiza reinyección de agua. Produjo un 3% de la producción total del departamento de Santander en el año 2016.
Campo Yarigui	Límite entre los municipios de Cantagallo (Bolívar) y Puerto Wilches (Santander).	Ecopetrol S.A.	Petróleo	199.727 bbl/año	Produjo un 9% de la producción total del departamento de Santander en el año 2016.
Campo Pavas Cáchira	Corregimiento El Tropezón. Municipio La Esperanza. Departamento Norte de Santander.	Ecopetrol S.A.	Petróleo	616 bbl/año	El agua producida es transportada para realizar tratamiento y reinyección al Campo Palagua (Boyacá) y a la Planta Deshidratadora Lisama para su disposición final. La muestra fue tomada en el Skimmer.
Campo Barranca Lebrija	Municipios de Puerto Wilches (Santander) y, Aguachica y San Martín (Cesar)	Ecopetrol S.A.	Petróleo	N.R.	Baja producción de petróleo. Producción de agua prácticamente nula. El sistema de tratamiento existente es para el manejo de agua del tanque de lavado del crudo. Muestra tomada en la Planta de tratamiento
Campo Opón	Municipio Cimitarra. Departamento Santander.	Compañía Operadora Petrocolombia S.A.S.	Gas	667,37 MMPCPA	A pesar de que es un campo considerado productor de gas, en el año 2016 tuvo una producción total de petróleo de 420 bbl. Muestras tomadas en la última piscina del sistema de tratamiento de agua residual industrial.
Campo Fénix ave-1	Jurisdicción de los municipios La Esperanza (Norte de Santander) y Rionegro (Santander)	Amerisur Exploración Colombia Ltda.	Petróleo	19 bbl/año	Fueron generados 3480 BA durante la etapa de perforación. (diciembre 2013- enero 2014)

3. COMPARACIÓN ENTRE EL DECRETO 1594 DE 1984 Y LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015

La Tabla 3 presenta los parámetros que se modificaron, ajustaron y añadieron del Capítulo VI: Del vertimiento de los residuos líquidos del Decreto 1594 de 1984, Art. 72 y Art. 74, en el Capítulo VI. Sector: Actividades de hidrocarburos. Resolución 0631 de 2015, Art. 11.

Tabla 3. Cuadro comparativo entre el Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 de 2015

PARÁMETRO	DECRETO 1594 DE 1984				RESOLUCIÓN 0631 DE 2015			
	Usuario Existente		Usuario Nuevo		Exploración		Producción	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Temperatura	< 40	°C	< 40	°C	40	°C	40	°C
pH	5 a 9	Unidades de pH	5 a 9	Unidades de pH	6 a 9	Unidades de pH	6 a 9	Unidades de pH
DQO	-	-	-	-	400,0	mg/L O ₂	180,0	mg/L O ₂
DBO ₅	R > 20% en carga	Kg/d	R > 80% en carga	Kg/d	200,0	mg/L O ₂	60,0	mg/L O ₂
SST	R > 50% en carga	Kg/d	R > 80% en carga	Kg/d	50,0	mg/L	50,0	mg/L
SSED	-	-	-	-	1,0	mg/L	1,0	mg/L

Tabla 3. (Continuación)

PARÁMETRO	DECRETO 1594 DE 1984				RESOLUCIÓN 0631 DE 2015			
	Usuario Existente		Usuario Nuevo		Exploración		Producción	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Grasas y Aceites	R > 80% en carga	Kg/d	R > 80% en carga	Kg/d	15,0	mg/L	15,0	mg/L
Fenoles	0,2	mg/L	0,2	mg/L	0,2	mg/L	0,2	mg/L
SAAM	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
HTP	-	-	-	-	10,0	mg/L	10,0	mg/L
HAP	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
BTEX	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
AOX	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
Fósforo Total (P)	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
Nitratos (N-NO ₃)	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
Nitrógeno Total (N)	-	-	-	-	10,0	mg/L	10,0	mg/L
Cianuro Total (CN ⁻)	1,0	mg/L	1,0	mg/L	1,0	mg/L	1,0	mg/L
Cloruros (Cl ⁻)	-	-	-	-	1.200	mg/L	1.200	mg/L
Fluoruros (F)	-	-	-	-	A.R	mg/L	A.R	mg/L
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	-	-	-	-	300	mg/L	300	mg/L
Sulfuros (S ²⁻)	-	-	-	-	1,0	mg/L	1,0	mg/L
Arsénico (As)	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,1	mg/L	0,1	mg/L
Bario (Ba)	5,0	mg/L	5,0	mg/L	A.R	mg/L	A.R	mg/L

Tabla 3. (Continuación)

PARÁMETRO	DECRETO 1594 DE 1984				RESOLUCIÓN 0631 DE 2015			
	Usuario Existente		Usuario Nuevo		Exploración		Producción	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Cadmio (Cd)	0,1	mg/L	0,1	mg/L	0,1	mg/L	0,1	mg/L
Cinc (Zn)	-	-	-	-	3,0	mg/L	3,0	mg/L
Cobre (Cu)	3,0	mg/L	3,0	mg/L	1,0	mg/L	1,0	mg/L
Cromo (Cr)	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,5	mg/L
Hierro (Fe)	-	-	-	-	3,0	mg/L	3,0	mg/L
Mercurio (Hg)	0,02	mg/L	0,02	mg/L	0,01	mg/L	0,01	mg/L
Níquel (Ni)	2,0	mg/L	2,0	mg/L	0,5	mg/L	0,5	mg/L
Plata (Ag)	0,5	mg/L	0,5	mg/L	A.R	mg/L	A.R	mg/L
Plomo (Pb)	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,2	mg/L	0,2	mg/L
Selenio (Se)	0,5	mg/L	0,5	mg/L	0,2	mg/L	0,2	mg/L
Vanadio (V)	-	-	-	-	1,0	mg/L	1,0	mg/L
Acidez Total	-	-	-	-	A.R	mg/L CaCO3	A.R	mg/L CaCO3
Alcalinidad Total	-	-	-	-	A.R	mg/L CaCO3	A.R	mg/L CaCO3
Dureza Cálcica	-	-	-	-	A.R	mg/L CaCO3	A.R	mg/L CaCO3
Dureza Total	-	-	-	-	A.R	mg/L CaCO3	A.R	mg/L CaCO3
Color Real	-	-	-	-	A.R	m ⁻¹	A.R	m ⁻¹
Material flotante	A	-	A	-	-	-	-	-
Difenil policlorados	N.D	-	N.D	-	-	-	-	-
Mercurio Orgánico	N.D	-	N.D	-	-	-	-	-
Tricloroetileno	1,0	mg/L	1,0	mg/L	-	-	-	-
ECC	1,0	mg/L	1,0	mg/L	-	-	-	-
Tetracloruro de carbono	1,0	mg/L	1,0	mg/L	-	-	-	-

Tabla 3. (Continuación)

PARÁMETRO	DECRETO 1594 DE 1984				RESOLUCIÓN 0631 DE 2015			
	Usuario Existente		Usuario Nuevo		Exploración		Producción	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Dicloroetileno	1,0	mg/L	1,0	mg/L	-	-	-	-
Sulfuro de carbono	1,0	mg/L	1,0	mg/L	-	-	-	-
Otros compuestos Organoclorados, cada variedad	0,05	mg/L	0,05	mg/L	-	-	-	-
Compuestos Organofosforados, cada variedad	0,1	mg/L	0,1	mg/L	-	-	-	-
Carbamatos	0,1	mg/L	0,1	mg/L	-	-	-	-

De la Tabla 3 se destacan las siguientes modificaciones y ajustes:

- Uno de los cambios sustanciales y con mayor trascendencia en la conversión del Decreto 1594 a la Resolución 0631 fue el de implementar un valor límite fijo, reemplazando así el porcentaje por remoción en carga, el cual consiste en:

$$E = (S_o - S) / S_o \times 100$$

Donde:

E: Eficiencia de remoción del sistema (%)

So: Carga contaminante de entrada (mg)

S: Carga contaminante de entrada (mg)

De esta manera la cantidad de determinados parámetros contaminantes del vertimiento dependían de la carga a verter y no directamente de la magnitud física o cantidad como tal. Entendiendo con esto que no importaba cuánto era su porcentaje restante de contaminante descargado, ya que este podría llegar a tener concentraciones muy altas y seguir cumpliendo con la normatividad, evaluando así la eficiencia de la remoción mas no la cantidad de contaminantes descargados.

Por consiguiente, se modificaron 3 parámetros que en el Decreto 1594 estaban como remoción en carga en Kg/d y en la Resolución 0631 se encuentran con un valor fijo en mg/L:

- DBO5
 - SST
 - Grasas y Aceite
-
- Los 11 parámetros que fueron objeto de inclusión en la nueva resolución y cuentan con un valor límite específico, son:
 - DQO
 - SST
 - Fenoles
 - HTP

- Nitrógeno Total
- Cloruros
- Sulfatos
- Sulfuros
- Cinc
- Hierro
- Vanadio

Siendo esto una necesidad fundamental en la normativa, ya que parámetros tan intrínsecos a la actividad petrolera, como los Hidrocarburos Totales, no eran evaluados ni tenían un límite bajo el cual se pudiera ejercer algún tipo de control.

- Se modificaron 7 parámetros en donde cada uno cambió su límite máximo permisible en la resolución vigente actualmente:

- pH
- Arsénico
- Cobre
- Mercurio
- Níquel
- Plomo
- Selenio

- Los 14 parámetros que no se encontraban en el Decreto 1594 de 1984 y ahora en la Resolución 0631 de 2015 se consideran de análisis y reporte, son los siguientes:

- SAAM
- HAP
- BTEX
- AOX
- Fósforo Total
- Ortofosfatos
- Nitratos
- Nitrógeno Amoniacal
- Fluoruros
- Acidez Total

- Alcalinidad Total
- Dureza Cálctica
- Dureza Total
- Color Real

- Estos 9 parámetros se excluyeron en la nueva resolución vigente:

- Material flotante
- Difenil policlorados
- Mercurio orgánico
- ECC
- Tetracloruro de carbono
- Dicloroetileno
- Sulfuro de carbono
- Compuestos organoclorados y sus variedades
- Compuestos organofosforados y sus variedades

Cabe resaltar que los 23 parámetros nombrados anteriormente, que corresponden a los que se añadieron como análisis y reporte, y los que se excluyeron en la nueva resolución, no representan un cambio significativo en la normatividad ambiental en el sector de hidrocarburos ya que no afectan directamente las aguas residuales, a excepción de ciertos parámetros que están constantemente presentes y relacionados con la actividad de hidrocarburos, como lo es el HAP y el BTEX.

En adición, otra modificación que tuvo la Resolución 0631 de 2015 con respecto al Decreto 1594 de 1984 consiste en que los ocho sectores económicos del país discriminaron sus actividades principales en donde en el caso del sector de hidrocarburos las actividades se dividen en: exploración, producción, refino, transporte y ventas. Cada una de estas actividades presenta un límite máximo permisible para los diferentes parámetros que se evalúan en el momento de realizar vertimientos a cuerpos de aguas superficiales.

4. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS VERTIMIENTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS CAMPOS EN SANTANDER, SEGÚN LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015

De acuerdo con la información disponible recopilada, según la metodología usada para el desarrollo de esta investigación, en las Figuras 7, 8 y 9 se presentan los parámetros analizados por cada campo y la comparación de éstos con el límite máximo permisible según la resolución vigente. (Ver anexos disponibles en la base de datos de la Universidad Industrial de Santander).

Los parámetros que reciben la convención de “parámetros de incertidumbre” fueron etiquetados de esta manera debido a que han sido reportados mediante un rango, no un valor específico. Esto se presenta a causa de que los laboratorios usados para la caracterización de las muestras no cuentan con la infraestructura o tecnología necesaria para realizar una medición más detallada de determinadas propiedades, dando como resultado un valor subjetivo de la concentración real a verter. Por lo anterior se ha decidido no evaluar dichos parámetros.

Figura 7. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimiento (Temperatura, pH, cloruros, sulfatos, selenio, fenoles totales, sólidos totales y sedimentables, DBO5 y hierro) según la resolución 0631 del 2015 para los años 2014 – 2016

LETRA	PROPIEDADES / INFORMES	Temperatura (° C)	pH (Unidades)	Cloruros (mg/L CL-)	Sulfatos (mg/ L SO4-2)	Selenio (mg/L)	Fenoles totales (mg/L)	Sólidos sedimentables (mL/L -h)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	DBO5 (mg/L O2)	Hierro (mg/L)
A	Proyecto Coyote 1 (29/10/2014)	28,7	6,01	< 3,3	< 5	-	< 0,1	-	50	< 5	-
B	Campo Gala 1 (27/11/2014)	26,5	7,85	-	-	<0,005	-	-	<10,0	181	-
C	Campo Gala 1 (17/12/2014)	30,2	7,58	-	-	<0,005	-	-	15	103	-
D	Campo Gala 1 (05/12/2014)	26,8	7,37	1280	74,6	<0,0005	0,189	<0,1	80	368	2,33
E	Campo Gala 1 (09/01/2015)	27,5	7,5	-	-	0,005	-	-	129	77	-
F	Campo Llanito (12/05/2015)	38,3	3,65	27900	325	0,00024	0,139	<0,1	148	301	12,5
G	Campo Llanito (18/08/2015)	30,9	3,38	26400	289	0,00029	0,162	<0,1	68	179	8,3
H	Campo Yarigui Pozo Yarigui 132 (21/11/2014 SB)	27,8	7,12	567	89,2	<0,0005	0,147	<0,1	19	206	0,355
I	Campo Yarigui Pozo Yarigui 132 (21/11/2014 PW)	28,7	7,51	239	204	<0,005	<0,1	-	14	22,3	-
J	Campo Yarigui Pozo Yarigui 133 (30/07/2014)	32,9	6,61	475	<5	-	<0,1	0,2	1070	106	6,35
K	Campo Yarigui Pozo Yarigui 133 (10/09/2014)	31,1	5,35	69,5	56,4	<0,005	0,101	-	20	37,4	-
L	Campo Yarigui Pozo Yarigui 134 (15/10/2014)	28,7	8,84	248	166	<0,005	<0,1	-	1426	118	-
M	Campo Yarigui Pozo Yarigui 135 (07/07/2014)	31,5	7,03	1180	117	-	<0,1	<0,1	270	2750	0,627
N	Campo Yarigui Pozo Yarigui 135 (10/07/2014)	-	7,23	246	279	<0,005	0,396	-	30	149	-
O	Campo Yarigui Pozo Yarigui 145 (05/01/2015)	33,9	6,39	900	71,6	<0,0005	0,134	<0,1	72	190	0,998
P	Campo Yarigui Pozo Yarigui 145 (15/01/2015)	27,4	6,63	210	365	<0,005	<0,1	-	26	64,9	-
Q	Campo Yarigui Pozo Yarigui 146 (20/11/2014)	27,8	7,12	567	89,2	-	0,147	<0,1	19	206	0,355
R	Campo Yarigui Pozo Yarigui 146 (04/12/2014)	31,8	8,31	17,8	43,3	<0,005	<0,1	-	<10	12,7	-
S	Campo Yarigui Pozo Yarigui 154 (21/03/2015)	-	7,56	98,1	37,5	<0,005	<0,1	-	<10	<5,0	-
T	Campo Pavas Cachira (05/12/2014)	28,1	7,41	7720	<5	-	0,865	<0,1	78	145	10,4
U	Campo Barranca Lebrija (12/12/2014)	27,7	6,85	62	<5	-	<0,1	<0,1	18	10	1,7
V	Pozo Cantagallo 144 (02/03/2015)	-	6,49	223	294	<0,005	<0,1	-	54	509	-
W	Pozo Cantagallo 156 (04/02/2015)	33,3	6,01	3460	120	<0,0005	<0,1	<0,1	23	1460	1,51
X	Pozo Cantagallo 156 (06/02/2015)	27,6	7,13	234	131	-	0,159	-	24,5	312	-
Y	Pozo Cantagallo 157 (18/02/2015)	-	7,54	93,2	270	<0,005	<0,1	-	<10	13,2	-
Z	Campo Opon PTAR (17/09/2016)	32,5	8,13	15605	1556	<0,0055	0,654	-	215	57	0,12
AA	Campo Opon PTAR (04/11/2016)	-	-	31257	-	-	0,372	-	53	537	-
AB	Campo Ave Fenix 1 (14/01/2014)	-	8,02	<9,9	250	-	<0,1	-	<10	26,5	<0,2
	VALORES MÁX RES. 0631 DEL 2015 PRODUCCIÓN	40	6 - 9	1200	300	0,2	0,2	1	50	60	3
	VALORES MÁX RES. 0631 DEL 2015 EXPLORACIÓN	40	6 - 9	1200	300	0,2	0,2	1	50	200	3
	PERFORACIÓN										
	PRODUCCIÓN										
	PARÁMETROS CRÍTICOS										
	PARÁMETROS DE INCERTIDUMBRE										
	(-) NO HAY DATOS EN EL INFORME										

Figura 8. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimiento (Grasas totales, cadmio, plomo, HTP, arsénico, cromo, DQO, mercurio, vanadio, cianuro) según la resolución 0631 del 2015 para los años 2014 – 2016

LETRA	PROPIEDADES / INFORMES	Grasas y aceites (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)	Hidrocarburos totales (mg/L)	Arsénico (mg/L)	Cromo (mg/L)	DQO (mg/LO2)	Mercurio (mg/L)	Vanadio (mg/L)	Cianuro (mg/L)
A	Proyecto Coyote 1 (29/10/2014)	<0,67	<0,015	-	< 0,67	0,00039	-	<20	< 0,0023	-	-
B	Campo Gala 1 (27/11/2014)	4,21	<0,05	<0,5	-	<0,01	<0,04	-	<0,002	-	-
C	Campo Gala 1 (17/12/2014)	3,56	<0,05	<0,5	1,51	<0,01	<0,04	-	<0,002	-	-
D	Campo Gala 1 (05/12/2014)	7,13	<0,015	<0,052	3,1	0,001	<0,109	595	<0,0023	<0,443	<0,2
E	Campo Gala 1 (09/01/2015)	3,49	<0,05	<0,5	0,537	<0,01	<0,04	-	<0,002	-	<0,02
F	Campo Llanito (12/05/2015)	6,43	<0,015	<0,052	-	0,00047	<0,109	470	<0,0023	<0,443	<0,010
G	Campo Llanito (18/08/2015)	3,09	<0,015	0,228	-	0,00063	<0,109	289	<0,0023	<0,443	<0,010
H	Campo Yarigui Pozo Yarigui 132 (21/11/2014 SB)	4,76	<0,015	<0,052	1,73	<0,001	<0,109	396	<0,0023	<0,443	<0,2
I	Campo Yarigui Pozo Yarigui 132 (21/11/2014 PW)	4,4	<0,05	<0,5	0,525	<0,01	<0,04	86,8	<0,002	<2	-
J	Campo Yarigui Pozo Yarigui 133 (30/07/2014)	2,65	<0,015	<0,052	2,14	-	-	165	<0,0023	<0,443	-
K	Campo Yarigui Pozo Yarigui 133 (10/09/2014)	2,66	<0,05	<0,5	<0,20	<0,01	<0,04	235	<0,002	<2,0	-
L	Campo Yarigui Pozo Yarigui 134 (15/10/2014)	12,3	<0,05	<0,5	6,91	<0,01	<0,04	403	<0,002	<2,0	-
M	Campo Yarigui Pozo Yarigui 135 (07/07/2014)	14,7	<0,015	<0,052	5,14	-	<0,109	5270	<0,0023	<0,443	-
N	Campo Yarigui Pozo Yarigui 135 (10/07/2014)	0,819	<0,05	<0,5	0,243	<0,01	<0,04	340	<0,002	<2,0	-
O	Campo Yarigui Pozo Yarigui 145 (05/01/2015)	2,41	<0,015	<0,052	-	<0,001	<0,109	295	<0,0023	<0,443	<0,2
P	Campo Yarigui Pozo Yarigui 145 (15/01/2015)	6,45	<0,05	<0,5	1,89	<0,01	<0,04	164	<0,002	<2,0	-
Q	Campo Yarigui Pozo Yarigui 146 (20/11/2014)	4,76	<0,015	<0,052	1,73	-	<0,109	396	<0,0023	<0,443	-
R	Campo Yarigui Pozo Yarigui 146 (04/12/2014)	3,87	<0,05	<0,5	0,753	<0,01	<0,04	197	<0,002	<2,0	-
S	Campo Yarigui Pozo Yarigui 154 (21/03/2015)	2,21	-	<0,5	1,03	<0,01	<0,04	<5,0	<0,002	<2,0	-
T	Campo Pavas Cachira (05/12/2014)	59,3	<0,015	<0,052	53,1	-	-	231	-	-	-
U	Campo Barranca Lebrija (12/12/2014)	<0,67	<0,015	<0,052	<0,67	-	-	20	-	-	-
V	Pozo Cantagallo 144 (02/03/2015)	2,41	<0,05	<0,5	0,787	<0,01	<0,04	647	<0,002	<2,0	-
W	Pozo Cantagallo 156 (04/02/2015)	12,3	<0,015	<0,052	-	<0,001	<0,109	2500	<0,0023	<0,443	<0,2
X	Pozo Cantagallo 156 (06/02/2015)	287	<0,05	<0,5	0,502	<0,01	<0,04	617	<0,002	<2,0	-
Y	Pozo Cantagallo 157 (18/02/2015)	10,3	<0,05	<0,5	6,45	<0,01	<0,04	64,8	<0,002	<2,0	-
Z	Campo Opon PTAR (17/09/2016)	<0,5	<0,002	<0,05	<0,5	<0,0045	<0,05	530	<0,0006	<0,3	0,019
AA	Campo Opon PTAR (04/11/2016)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	Campo Ave Fenix 1 (14/01/2014)	0,522	<0,05	<0,5	<0,2	-	<0,04	106	<0,002	-	-
	VALORES MÁX RES. 0631 DEL 2015 PRODUCCIÓN	15	0,1	0,2	10	0,1	0,5	180	0,01	1	1
	VALORES MÁX RES. 0631 DEL 2015 EXPLORACIÓN	15	0,1	0,2	10	0,1	0,5	400	0,01	1	1
	PERFORACIÓN										
	PRODUCCIÓN										
	PARAMETROS CRITICOS										
	PARÁMETROS DE INCERTIDUMBRE										
	(-) NO HAY DATOS EN EL INFORME										

Figura 9. Evaluación del cumplimiento de parámetros de vertimiento (Cobre, níquel, nitrógeno total, zinc, sulfuros) según la resolución 0631 del 2015 para los años 2014 – 2016

LETRA	PROPIEDADES / INFORMES	Cobre (mg/L)	Níquel (mg/L)	Nitrógeno total (mg N/ L)	Zinc (mg/L)	Sulfuros (mg S2/L)
A	Proyecto Coyote 1 (29/10/2014)	-	-	-	-	-
B	Campo Gala 1 (27/11/2014)	<0,1	<0,2	-	-	-
C	Campo Gala 1 (17/12/2014)	<0,1	<0,2	-	-	-
D	Campo Gala 1 (06/12/2014)	<0,055	<0,0085	-	0,331	-
E	Campo Gala 1 (09/01/2015)	<0,1	<0,2	-	-	-
F	Campo Llanito (12/05/2015)	<0,055	0,085	-	0,043	-
G	Campo Llanito (18/08/2015)	<0,055	<0,085	-	0,11	-
H	Campo Yarigui Pozo Yarigui 132 (21/11/2014 SB)	<0,055	<0,085	-	0,201	-
I	Campo Yarigui Pozo Yarigui 132 (21/11/2014 PW)	-	-	-	-	-
J	Campo Yarigui Pozo Yarigui 133 (30/07/2014)	<0,055	<0,085	-	0,124	-
K	Campo Yarigui Pozo Yarigui 133 (10/09/2014)	-	-	-	-	-
L	Campo Yarigui Pozo Yarigui 134 (15/10/2014)	-	-	-	-	-
M	Campo Yarigui Pozo Yarigui 135 (07/07/2014)	<0,055	<0,085	-	0,023	-
N	Campo Yarigui Pozo Yarigui 135 (10/07/2014)	-	-	-	-	-
O	Campo Yarigui Pozo Yarigui 145 (05/01/2015)	<0,055	<0,085	-	0,083	-
P	Campo Yarigui Pozo Yarigui 145 (15/01/2015)	-	-	-	-	-
Q	Campo Yarigui Pozo Yarigui 148 (20/11/2014)	<0,055	<0,085	-	0,201	-
R	Campo Yarigui Pozo Yarigui 148 (04/12/2014)	-	-	-	-	-
S	Campo Yarigui Pozo Yarigui 154 (21/03/2015)	-	-	-	-	-
T	Campo Pavas Cachira (05/12/2014)	-	-	-	-	-
U	Campo Barranca Lebríja (12/12/2014)	-	-	-	-	-
V	Pozo Cantagallo 144 (02/03/2015)	-	-	-	-	-
W	Pozo Cantagallo 156 (04/02/2015)	0,49	0,418	-	0,246	-
X	Pozo Cantagallo 156 (06/02/2015)	-	-	-	-	-
Y	Pozo Cantagallo 157 (18/02/2015)	-	-	-	-	-
Z	Campo Opon PTAR (17/09/2016)	0,018	<0,05	<5,31	0,02	<1
AA	Campo Opon PTAR (04/11/2016)	-	-	-	-	-
AB	Campo Ave Fenix 1 (14/01/2014)	-	-	-	-	-
	VALORES MÁX RES. 0631 DEL 2015 PRODUCCIÓN	1	0,5	10	3	1
	VALORES MÁX RES. 0631 DEL 2015 EXPLORACIÓN	1	0,5	10	3	1
	PERFORACIÓN					
	PRODUCCIÓN					
	PARÁMETROS CRÍTICOS					
	PARÁMETROS DE INCERTIDUMBRE					
	(-) NO HAY DATOS EN EL INFORME					

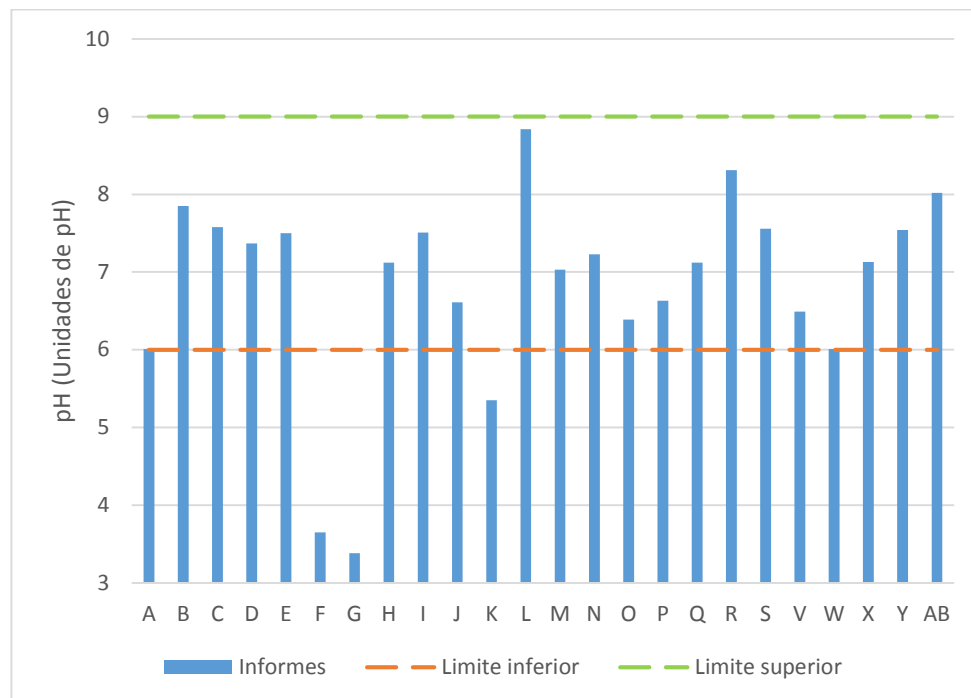
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Según la información disponible recopilada se obtuvieron los siguientes análisis y estadísticas.

Las convenciones de los informes se pueden observar en el capítulo 4, figuras 7, 8 y 9.

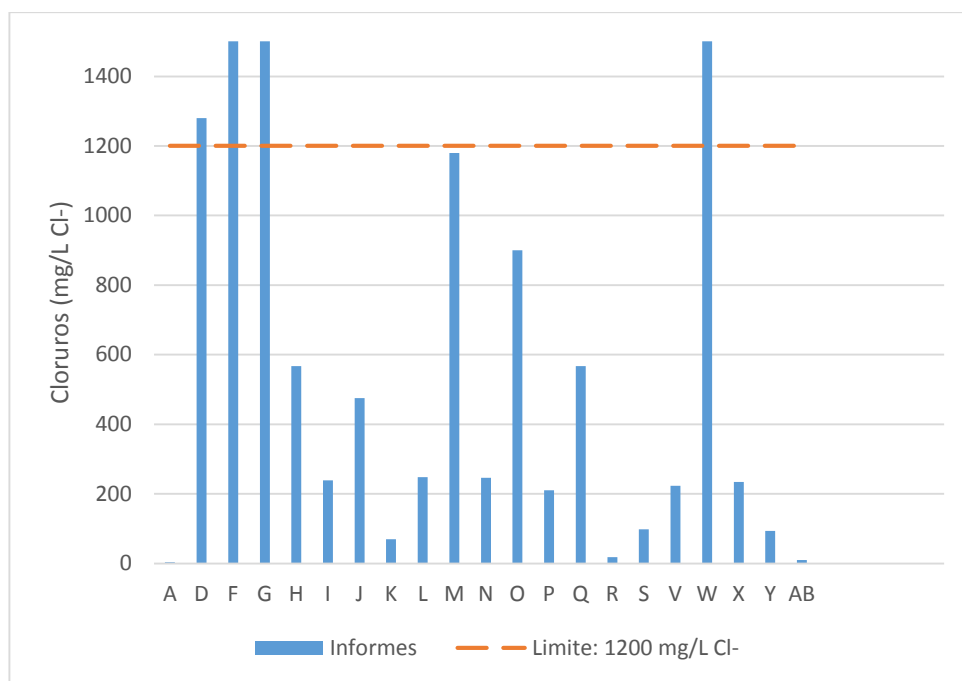
5.1 ANÁLISIS DE PERFORACIÓN

Figura 10. pH en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015



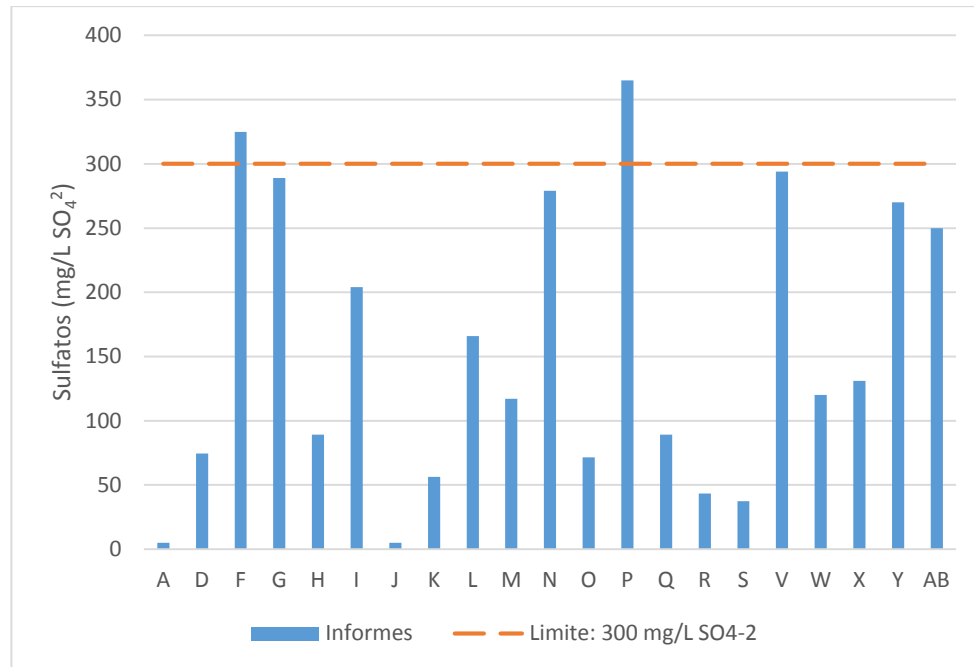
Teniendo en cuenta que los límites permisibles para el pH son de 6 a 9, de la Figura 10 se observa que 3 de los 24 informes que reportan este parámetro, es decir, el 12,5%, no se encontraría dentro del rango permitido por la Resolución 0631 de 2015, establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de exploración.

Figura 11. Cloruros en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015



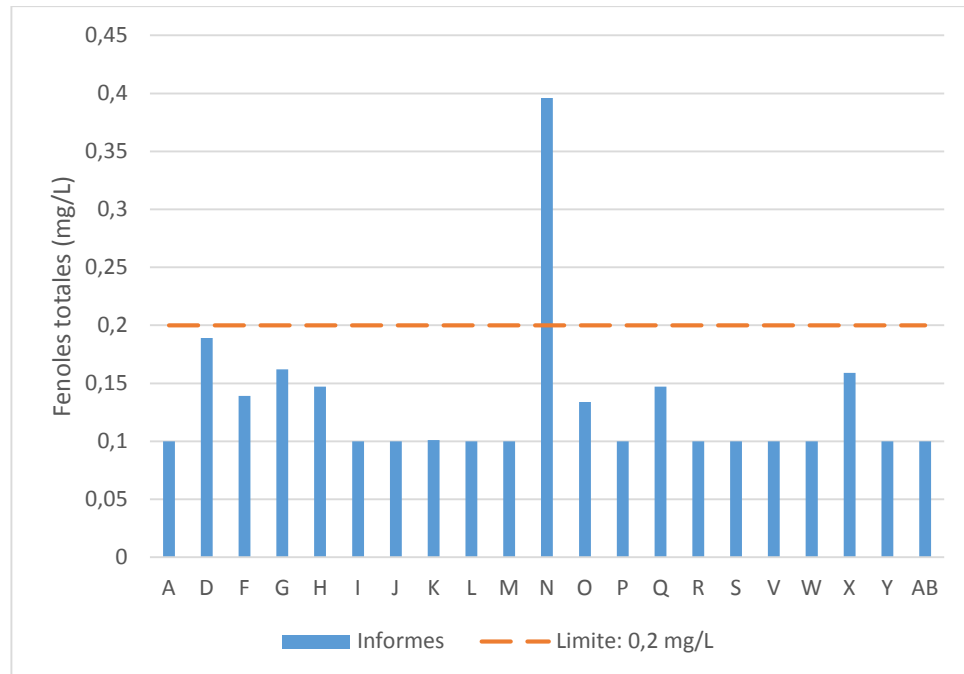
De la Figura 11 se observa que 4 de los 21 informes que reportan este parámetro y que representan aproximadamente el 16,7%, sobrepasarían el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de exploración de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los cloruros es de 1200 mg/L.

Figura 12. Sulfatos en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015



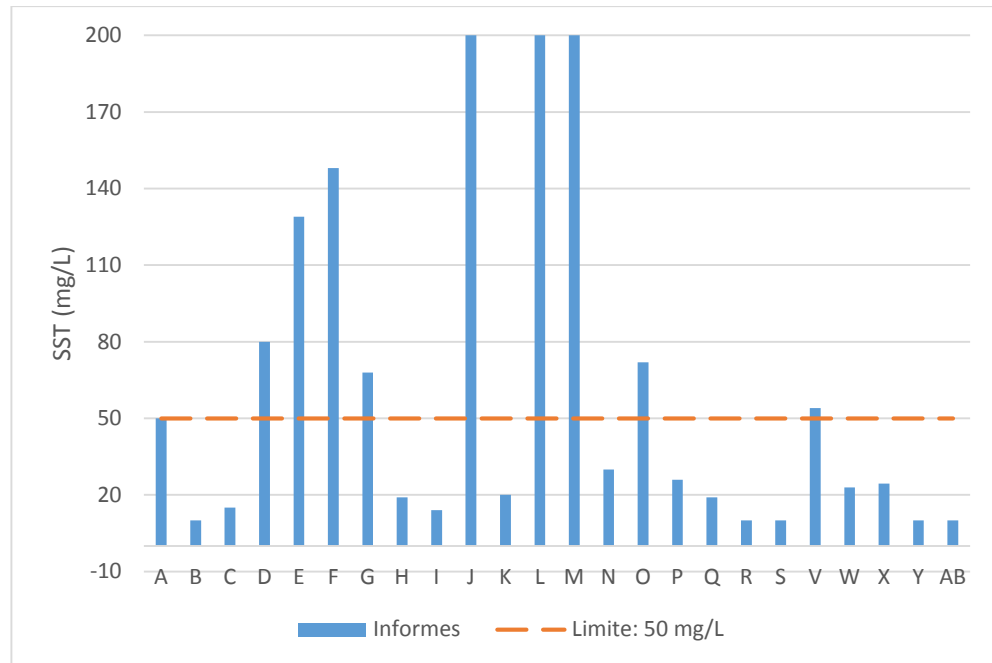
De la Figura 12 se observa que 2 de los 21 informes que reportan este parámetro, es decir, el 8,3 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de exploración de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los sulfatos es de 300 mg/L.

Figura 13. Fenoles totales en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015



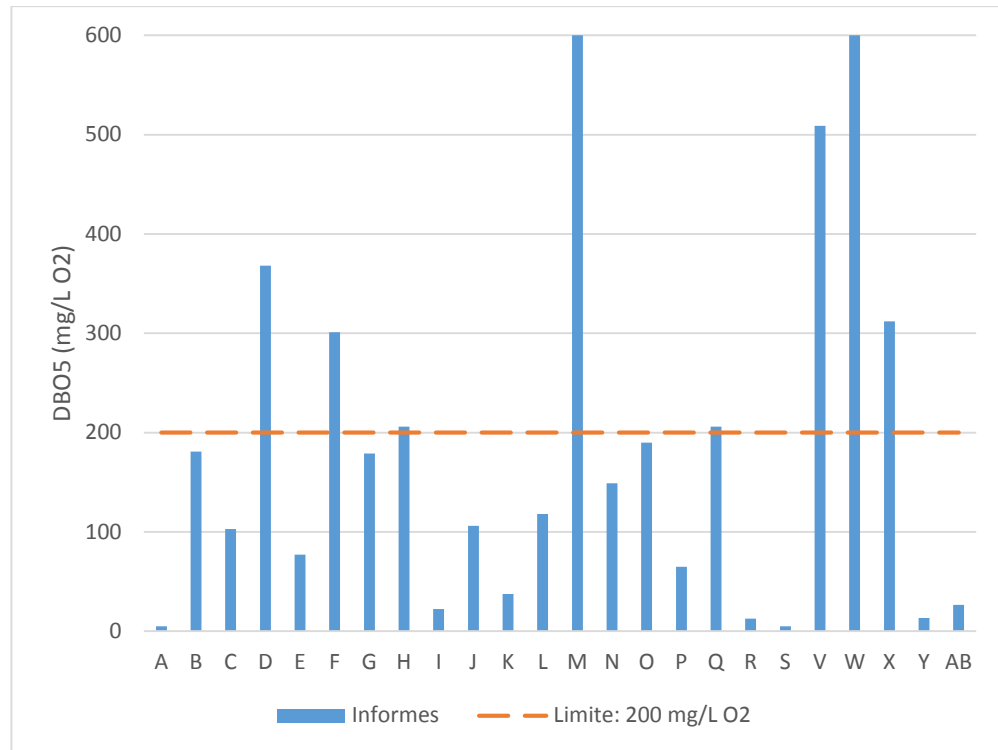
De la Figura 13 se observa que solo un informe de los 21 que reportaron este parámetro y que representa el 4,1%, sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de exploración de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los fenoles es de 0,2 mg/L y el campo que incumple presenta valores de 0,4 mg/L, el doble del permitido.

Figura 14. Sólidos suspendidos totales en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015



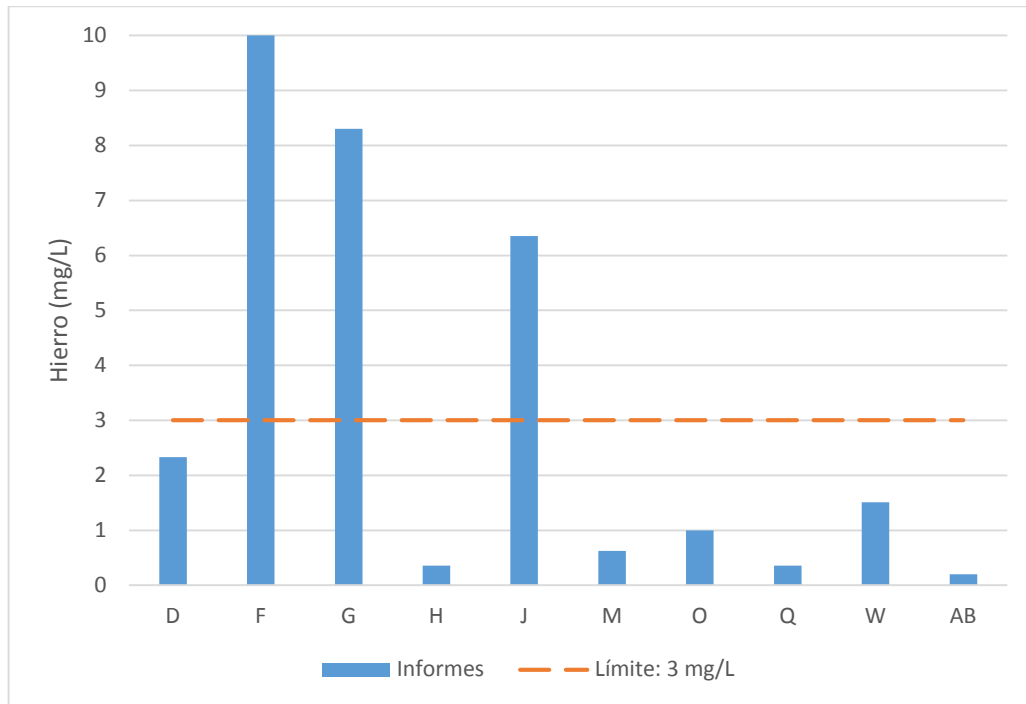
De la Figura 14 se observa que 9 de los 24 informes que reportan este parámetro, es decir, el 37,5% sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de exploración de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los SST es de 50 mg/L.

Figura 15. DBO₅ en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015



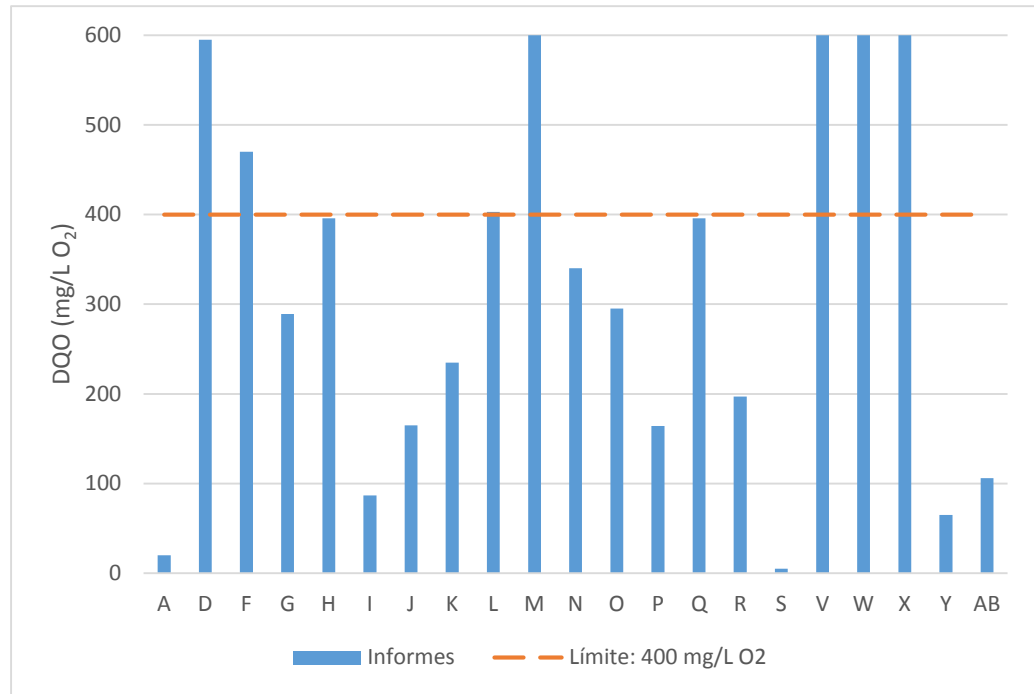
De la Figura 15 se observa que 8 de los 24 informes que reportan este parámetro, es decir, el 33,3% sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de exploración de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para el DBO₅ es de 200 mg/L O₂.

Figura 16. Hierro en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015



De la Figura 16 se observa que 3 de los 10 informes que reportaron este parámetro, es decir, el 30 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de exploración de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para el hierro es de 3 mg/L.

Figura 17. DQO en la etapa de exploración para los diferentes campos de Santander durante los años 2014-2015



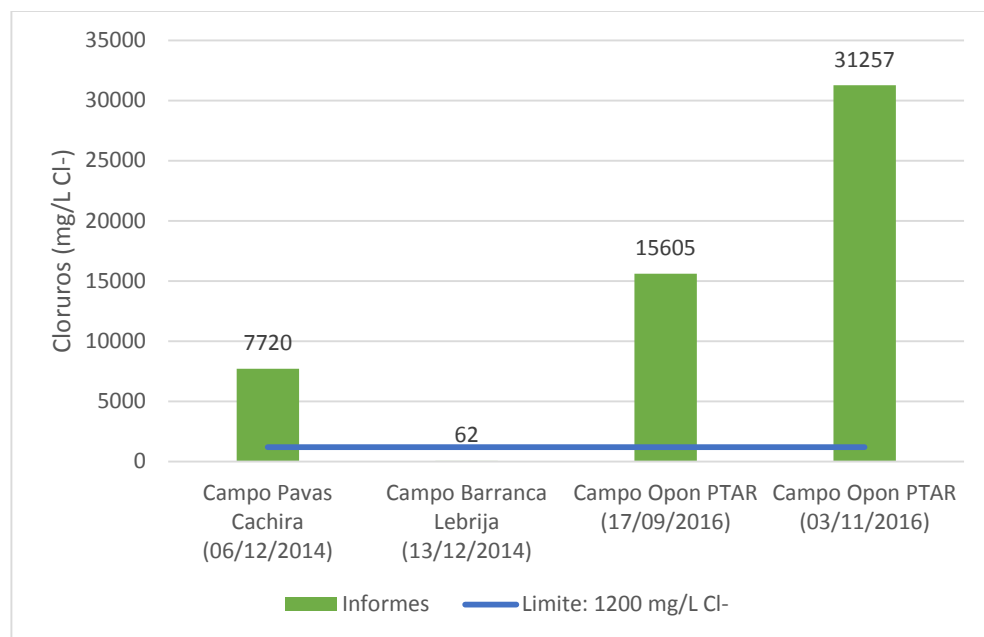
De la Figura 17 se observa que 7 de los 21 informes que reportaron este parámetro, es decir, el 33,3 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de exploración de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para el DQO es de 400 mg/L O₂.

De acuerdo al análisis realizado en la etapa de perforación, se puede evidenciar que parámetros críticos como los cloruros, SST, DBO₅, hierro, DQO, grasas y aceites incumplen drásticamente el límite máximo permisible para cada uno de ellos, representando un problema grave en el momento de hacer el vertimiento a un cuerpo de agua superficial si no se realiza el tratamiento adecuado. Como es el

caso del Campo Llanito, que en los cloruros reporta valores 23.25 y 22 veces por encima del permitido para los dos informes analizados respectivamente. También, el campo Yarigui en los pozos 133 y 134 reportan valores de SST 21.4 y 28.5 veces por encima del límite permitido. Todos estos parámetros que exceden dramáticamente la resolución 0631 de 2015 deberían ser controlados para evitar futuras sanciones.

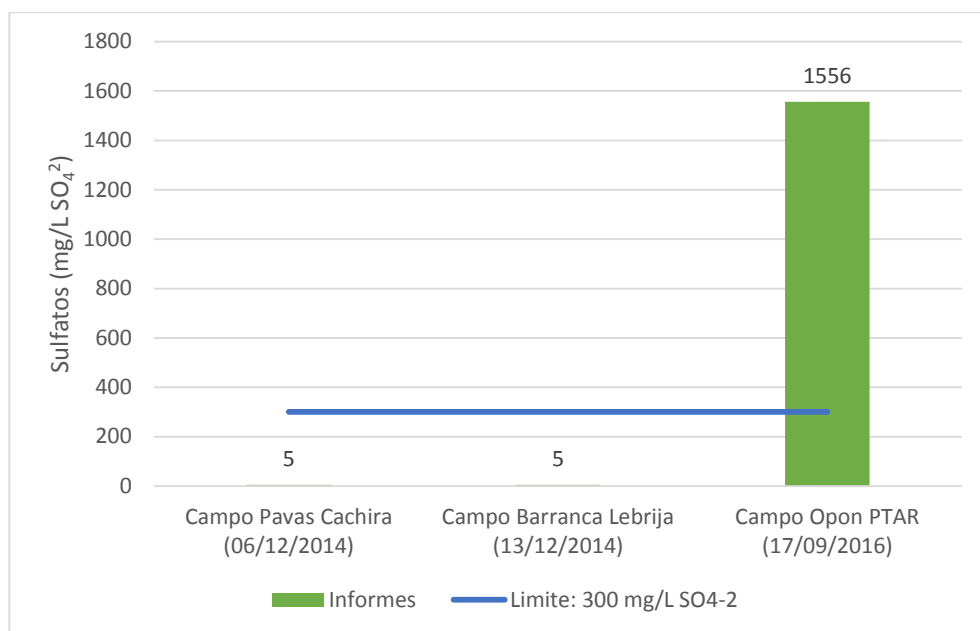
5.2 ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN

Figura 18. Cloruros en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



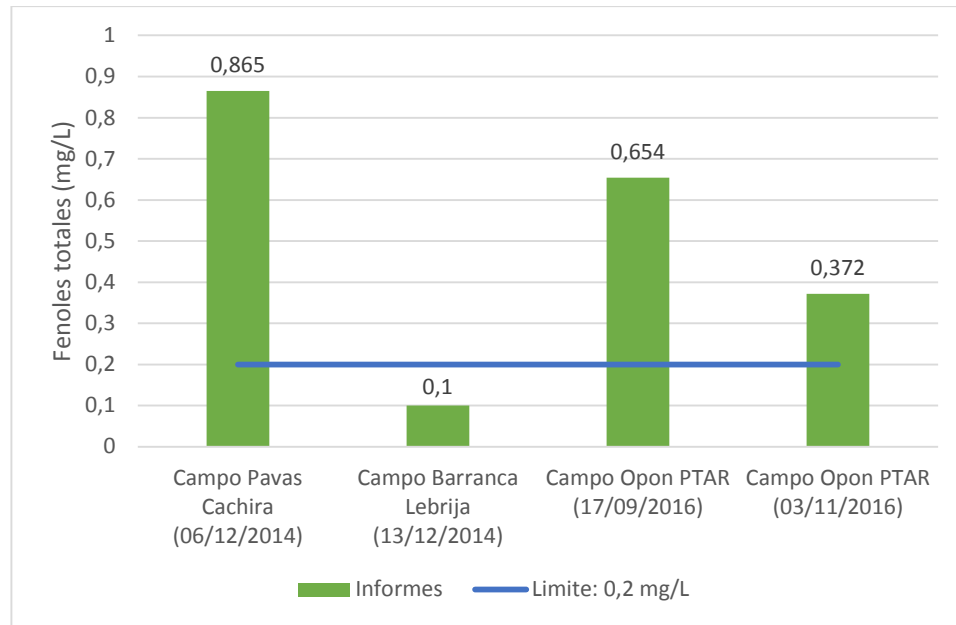
De la Figura 18 se observa que 3 de los 4 informes que reportan este parámetro, es decir el 75 %, superarían el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los Cloruros es de 1200 mg/L.

Figura 19. Sulfatos en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



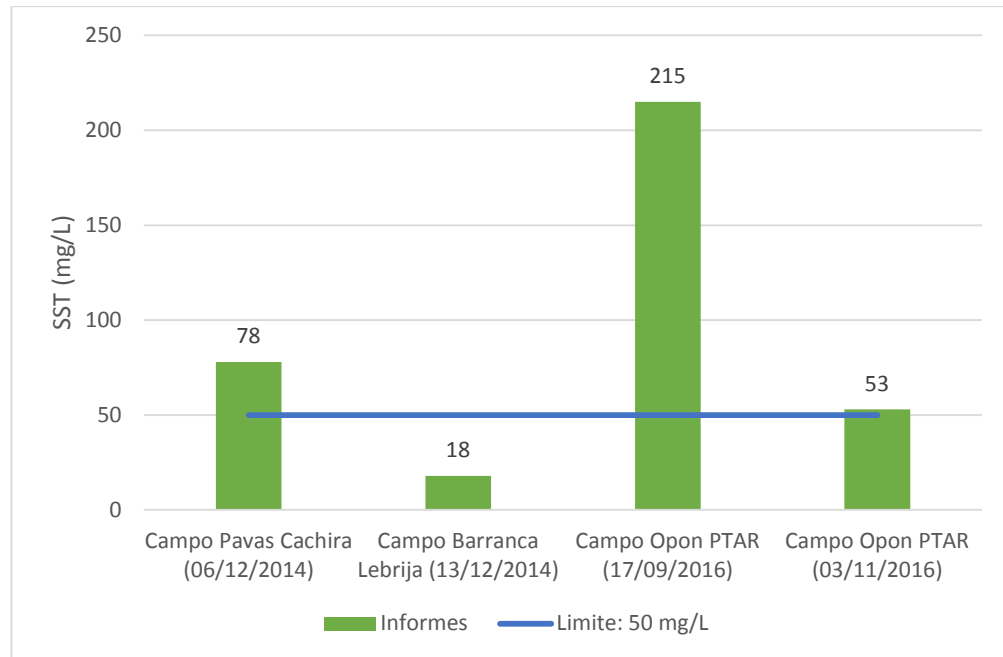
De la Figura 19 se observa que 1 de los 3 informes que reportan este parámetro, es decir, el 33 % de los informes analizados, superarían el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los Sulfatos es de 300 mg/L, excediendo así el quíntuple del valor permitido.

Figura 20. Fenoles totales en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



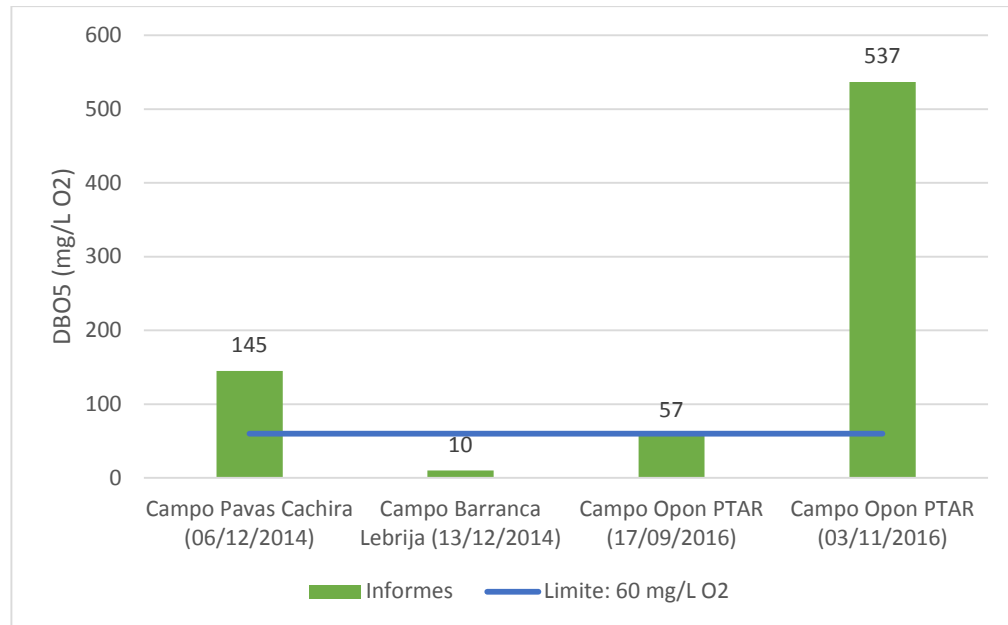
De la Figura 20 se observa que 3 de los 4 informes que reportan este parámetro, es decir, el 75 %, sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los Fenoles totales es de 0,2 mg/L.

Figura 21. Sólidos suspendidos en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



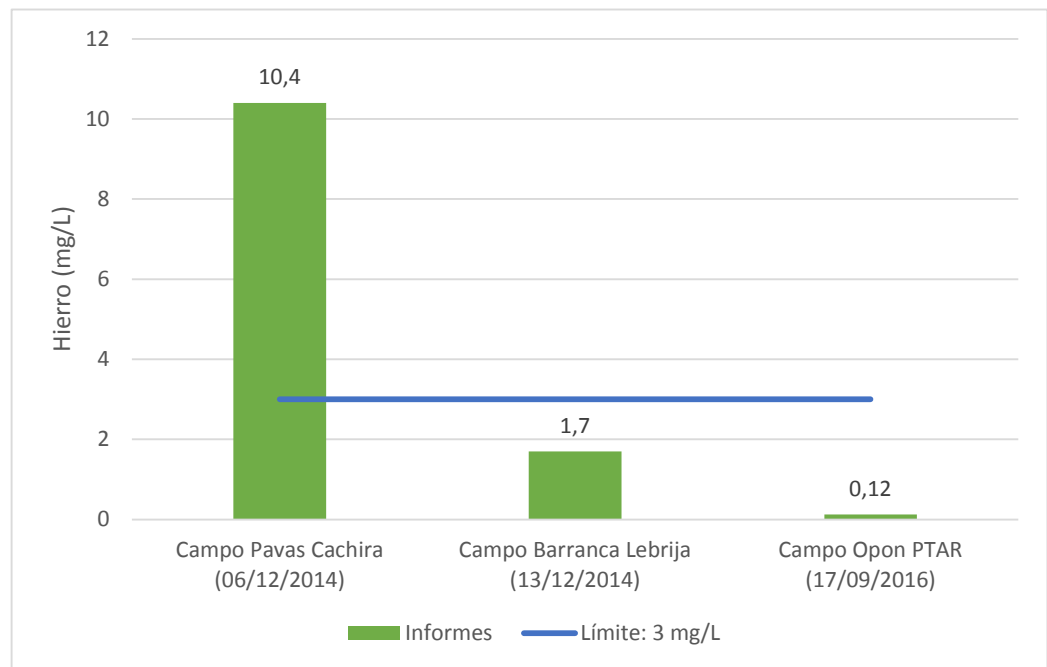
De la Figura 21 se observa que 3 de los 4 informes que reportan este parámetro, es decir, el 75 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los SST es de 50 mg/L.

Figura 22. DBO₅ en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



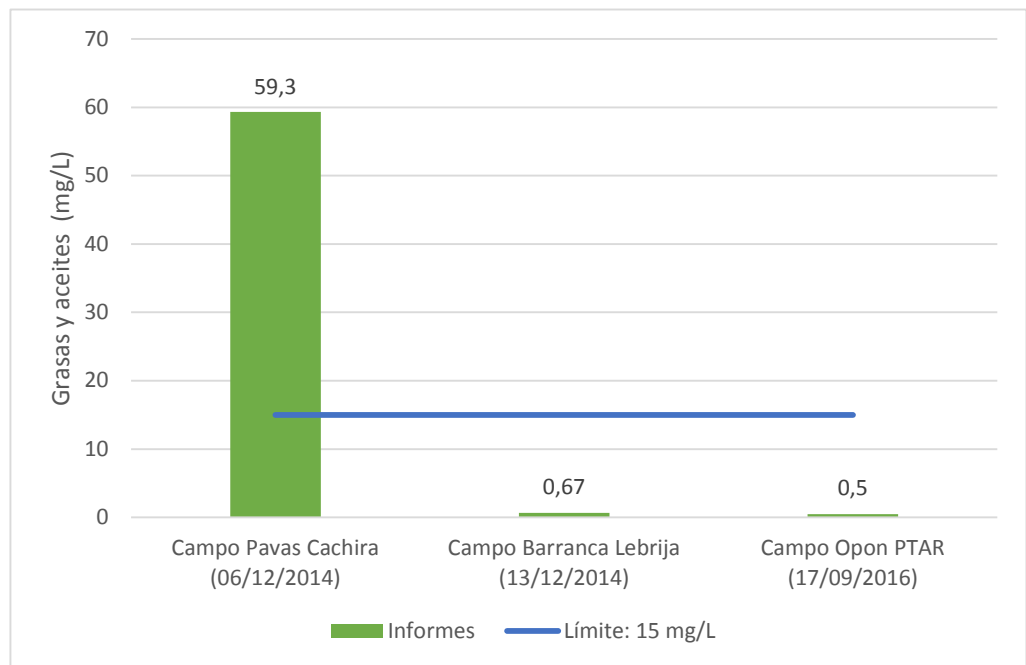
De la Figura 22 se observa que 2 de los 4 informes que reportan este parámetro, es decir, el 50 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para el DBO₅ es de 60 mg/L O₂.

Figura 23. Hierro en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



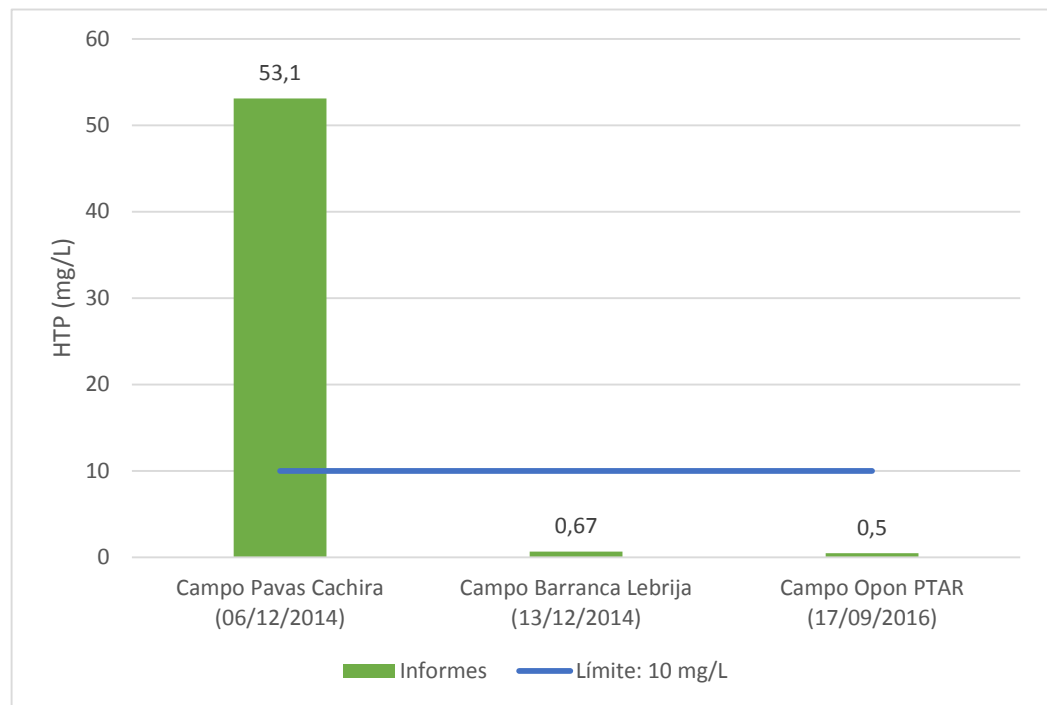
De la Figura 23 se observa que 1 de los 3 informes que reportan este parámetro, es decir, el 33, 3 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para el hierro es de 3 mg/L.

Figura 24. Grasas y Aceites en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



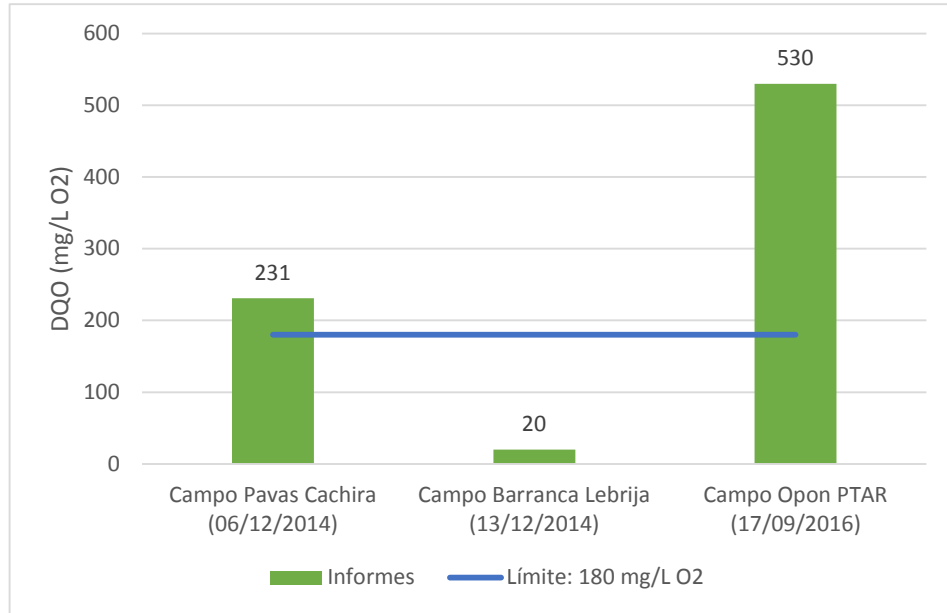
De la Figura 24 se observa que 1 de los 3 informes que reportan este parámetro, es decir, el 33, 3 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para las grasas y aceites es de 15 mg/L.

Figura 25. HTP en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



De la Figura 25 se observa que 1 de los 3 informes que reportan este parámetro, es decir, el 33,3 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para los HTP es de 10 mg/L.

Figura 26. DQO en la etapa de producción para los diferentes campos de Santander durante los años 2014 y 2016



De la Figura 26 se observa que 1 de los 3 informes que reportan este parámetro, es decir, el 33,3 % sobrepasaría el límite máximo permisible establecido en el capítulo VI, artículo 11, etapa de producción de la Resolución 0631 de 2015, en donde el límite máximo permisible para el DQO es de 180 mg/L O₂.

Es evidente el incumplimiento en los parámetros críticos como cloruros, sulfatos, fenoles totales, SST, DBO₅, HTP y DQO de los campos en la etapa de producción, en donde por ejemplo el Campo Opón incumple en la mayoría de estos parámetros con valores reportados que sobrepasan 5, 13 y 26 veces el límite máximo permisible. También, en el Campo Pavas Cáchira encontramos incumplimiento de estos parámetros 4, 6 y hasta 8 veces por encima de lo permitido. Representando con esto una falencia en los sistemas de tratamientos que se están utilizando, por eso es necesario tomar las medidas correspondientes para evitar incumplir la normativa ambiental del país.

6. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN A LOS PARÁMETROS CRÍTICOS

6.1 pH

Los informes F, G y K, todos pertenecientes a la etapa de exploración, no se encuentran dentro del rango permitido por la Resolución 0631 de 2015. Las aguas residuales de los campos a los que pertenecen dichos informes se reportaron con un pH menor de seis, lo que conlleva a que al realizarse un tratamiento biológico estas aguas ácidas favorezcan el crecimiento de hongos sobre las bacterias.⁶⁷ Por lo tanto, se recomienda un proceso de neutralización como pretratamiento usando cal, óxido de cal o hidróxido de calcio (más usada por su bajo costo), también óxido o hidróxido de magnesio, o hidróxido de sodio⁶⁸ para que el nivel de pH al realizar el vertimiento se encuentre dentro del rango permitido que es de 6 a 9 Unidades de pH.

6.2 Cloruros

Los informes D, F, G y W pertenecientes a la etapa de exploración y los informes T, Z y AA pertenecientes a la etapa de producción, no cumplen con el límite máximo permisible establecido por la Resolución 0631 de 2015. Aunque este límite es de 1.200 mg/L, los cloruros en concentraciones mayores de 15.000 mg/L son considerados tóxicos para el tratamiento biológico convencional.⁶⁹ Sus altas concentraciones pueden causar corrosión en tuberías y estructuras metálicas. Se recomienda como alternativa de tratamiento las tecnologías como ósmosis inversa, carbón activado, destilación o intercambio iónico.⁷⁰ Sin embargo, algunas

⁶⁷ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Op. Cit., p. 66. ISBN 958-8060-13-3

⁶⁸ Ibid. p. 323

⁶⁹ Ibid. p. 36

⁷⁰ FERNÁNDEZ ACUÑA, Sebastián Ignacio. Tratamiento y disposición de aguas residuales de plantas de tratamiento de agua potable en Chile. Universidad de Chile, 2015. p. 15-17.

de estas tecnologías son muy costosas y su implementación depende de la capacidad económica que tenga el campo y dependiendo del caudal a tratar, en ocasiones su aplicación a escala industrial no es viable técnicamente.

6.3 Sulfatos

Los informes F y P, pertenecientes a la etapa de exploración, y el informe Z, perteneciente a la etapa de producción, sobrepasan el límite permitido por la normatividad ambiental del país. Es posible que se reporten valores altos debido al uso de elementos químicos como coagulantes.⁷¹ Estos campos/pozos a los que pertenecen dichos informes podrían tener problemas de corrosión en sus equipos y tuberías dispuestas para el tratamiento y distribución del agua residual. Se recomienda como alternativa de tratamiento emplear la ósmosis inversa, intercambio iónico, destilación y/o flash multietapas.⁷²

6.4 Fenoles totales

Los informes T, Z y AA, pertenecientes a la etapa de exploración, y el informe N, perteneciente a la etapa de producción, incumplen con la normativa ambiental de país. Un alto contenido de fenoles totales en el agua residual puede causar problemas de sabores en aguas de consumo tratadas con cloro. Sin embargo, son tolerables concentraciones hasta de 500 mg/L, un valor bastante alto si se supone que en la normativa ambiental del país el límite máximo permisible es de 0,2

⁷¹ CIMA. Informe de monitoreo de agua superficial, residual industrial, residual doméstica: Campo Opón. Bogotá D.C., Octubre 2016. p. 36

⁷² SANZ. Joan, Veolia Water Technologies. Eliminación de sulfatos en aguas de mina mediante proceso de precipitación en serie y nanofiltración. p. 1-4.

mg/L. ⁷³ Se recomienda como alternativa de tratamiento emplear tratamientos de electrocoagulación y/o la biodegradación aeróbica y anaeróbica. ⁷⁴

6.5 SST

Los informes A, D, E, F, G, J, L, M, O y V, asociados a la etapa de exploración, y los informes T, Z y AA, asociados a la etapa de producción, sobrepasan el límite máximo permisible por la Resolución 0631 de 2015. El contenido de sólidos de un agua afecta directamente la cantidad de lodo que se produce en el sistema de tratamiento o disposición. Se recomienda como alternativa de tratamiento emplear filtros, si ya se tiene presente un proceso de filtración realizar una optimización para evitar el alto contenido de sólidos presentes en el vertimiento, o realizar un Proceso Ascensional de Manto de Lodos Anaerobio (PAMLA).⁷⁵

6.6 DBO₅ Y DQO

Los informes D, F, H, M, O, V, W y X pertenecientes a la etapa de exploración y T y AA pertenecientes a la etapa de producción, sobrepasan el límite máximo permisible para DBO₅. Además, los informes D, F, L, M, V, W y X pertenecientes a la etapa de exploración y T y Z pertenecientes a la etapa de producción, sobrepasan el límite máximo permisible establecido por la Resolución 0631 de 2015 para DQO. Se recomienda como alternativa de tratamiento emplear tratamientos de oxidación de materia orgánica mediante el ozono o procesos de coagulación y floculación de organismos con el fin de desestabilizar las cargas

⁷³ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Op. Cit. p. 58

⁷⁴ DÍAZ Altmira, RINCÓN Nancy; MARIN, Julio Cesar; BEHLING, Elisabeth; CHACÍN, Elsa; FERNÁNDEZ, Nola. Degradación de fenoles totales durante el tratamiento biológico de aguas de producción petroleras, 2005. Universidad de Zulia, Venezuela, p. 283-287.

⁷⁵ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Op. Cit. p. 68

orgánicas de la materia orgánica en suspensión, formando al mismo tiempo, pequeños flóculos de fácil sedimentación y filtración.⁷⁶

La DBO₅ se puede controlar con un tratamiento de oxidación biológica que puede ser de tipo aerobio como los lodos activados, lagunas aireadas, digestión aerobia, lagunas aerobias, filtros percoladores, torres biológicas, unidades rotatorias de contacto biológico y/o reactores de lecho fijo; también, de tipo anóxico como el Bardenpho, y de tipo anaerobio como la digestión anaerobia, anaerobio de contacto, lagunas anaerobias, PAMLA, filtro anaerobio y/o lecho expandido.⁷⁷ Cabe destacar que los valores de la DQO no incluyen el oxígeno que convierte el nitrógeno reducido a nitrato.⁷⁸

Mediante la relación de estos dos parámetros (DQO/DBO₅) puede realizarse una aproximación cuantitativa de la biodegradabilidad de un efluente. Cuando esta relación sea menor a 2.5 puede suponerse que es un efluente biodegradable, recomendando el uso de tratamientos biológicos como fangos activos. De manera opuesta cuando el índice de esta relación se encuentra entre los rangos de 2.5 a 5 es recomendable el empleo de tratamientos bacterianos.⁷⁹

6.7 Hierro

Los informes F, G y J de la etapa de exploración y T de la etapa de producción, no cumplen con el límite máximo permisible para este parámetro. El hierro es considerado un metal pesado y los metales pesados en altas concentraciones son tóxicos.⁸⁰ Al estar alto supone un riesgo para la calidad del agua y probabilidad de

⁷⁶ PÉREZ GARRIDO, Claudia; LEÓN RODRÍGUEZ, Frida María; DELGADILLO GARCIA, Graciela Ruth. Tratamiento de aguas: manual de laboratorio, Universidad Autónoma de Nuevo México, México, 2013, p. 91-105.

⁷⁷ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Op. Cit. p. 227

⁷⁸ CISTERNA OSORIO, Pedro; PEÑA, Daisy. Determinación de la relación DQO/DBO₅ en aguas residuales de comunas con población menor a 25000 habitantes en la VIII región. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. p. 6.

⁷⁹ *Ibíd.* p. 9.

⁸⁰ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Op. Cit. p. 60

depósitos e incrustaciones en la tubería⁸¹. Muchas aguas residuales industriales son ácidas y, por consiguiente, poseen grandes cantidades de hierro ferroso soluble. Por lo tanto, se propone un tratamiento basado en la oxidación de hierro ferroso en hierro férrico, precipitación y clarificación. Para esto el agua se neutraliza inicialmente a pH 7.0, esto con el fin de que el hierro ferroso se oxide en hierro férrico y forme hidróxido férrico, el cual es insoluble y de baja densidad, razón por la cual requiere períodos de sedimentación prolongados y filtración.⁸² Además, como otra alternativa se utiliza aireación.⁸³

6.8 Grasas y aceites

Los informes T de la etapa de producción y X de la etapa de exploración, sobrepasan el límite máximo permisible. Superar los límites permisibles puede crear películas y depósitos en la superficie que llevan a la degradación ambiental y biológica.⁸⁴ Se recomienda como alternativa de solución la tecnología de Flotación por Aire Disuelto (FAD), ya que además de separar sólidos también separa aceites, grasas, fibras y otros materiales de baja densidad.⁸⁵ De igual modo, se utilizan separadores de aceite API. Por lo tanto, si en los campos a los que pertenecen dichos informes se encuentra un separador de estos como método para la separación de grasas y aceites, se propone una revisión para descartar problemas internos que estén provocando un incumplimiento en la normatividad ambiental del país.

⁸¹ ANTEK. Monitoreo y caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas pertenecientes al Campo Pavas Cáchira. La Esperanza, Norte de Santander. Diciembre 2014. p. 57

⁸² ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Op. Cit. p. 151-152

⁸³ *Ibid.* p. 376

⁸⁴ PÉREZ GARRIDO, Claudia. Op. Cit. p. 107.

⁸⁵ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Op. Cit. p. 346

6.9 Hidrocarburos totales

El informe T que se encuentra en la etapa de producción, es el único que según el reporte no cumple con este parámetro. 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. Por otra parte, los floculantes constituidos por polímeros atrapan las gotas de crudo que se encuentran dispersas en el agua y al llegar a superficie puede ser retirado de forma mecánica. Sin embargo, aunque se propone como alternativa de solución los floculantes debe considerarse otra opción antes de usarlos, ya que no es muy recomendable su uso debido a que el polímero al mezclarse con el crudo forma una sustancia viscosa que no puede luego ser aprovechada para extraer crudo de allí.⁸⁶

Las alternativas propuestas para cada uno de los parámetros críticos se presentan a continuación en la tabla 4.

Tabla 4. Alternativas de tratamiento a los parámetros críticos

⁸⁶ MONTES PÁEZ, Erik Giovany. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Universidad Industrial de Santander. 2010. p. 56-57

Alternativas/ Parámetros		pH	Cloruros	Sulfatos	Fenoles totales	SST	DBO ₅	DQO	Hierro	Grasas y aceites	Hidrocarburos totales
Pretratamiento	Neutralización usando Cal	x							x		
Tratamiento primario	Filtración					x	x		x		
	Coagulantes						x	x			x
	Floculantes						x	x			x
	Separadores API									x	
	Destilación		x								
Tratamiento secundario	Biodegradación aerobia				x		x		x		
	Biodegradación anaerobia				x		x				
	PAMLA					x	x	x			

Tabla 4. (Continuación)

Alternativas/ Parámetros		pH	Cloruros	Sulfatos	Fenoles totales	SST	DBO ₅	DQO	Hierro	Grasas y aceites	Hidrocarburos totales
Tratamiento terciario	Intercambio iónico		x								
	Carbón activado		x								
	Ósmosis inversa		x								
	Electrocoagulación				x			x			
	FAD									x	
	Flash multietapas			x							

6.10 CASOS DE ESTUDIO

Con respecto a las alternativas presentadas anteriormente se exponen algunos ejemplos que evidencian la eficiencia que éstas tendrían para mitigar el impacto de los parámetros críticos. En cada uno de ellos se escoge el informe que presente el valor más alto reportado en la etapa de exploración y producción.

6.10.1 ALTERNATIVA TRATAMIENTO PRIMARIO: COAGULACIÓN

La coagulación tiene un 95% de remoción teórica utilizando sulfato de aluminio, usado por su bajo costo y manejo relativamente sencillo.⁸⁷ Los parámetros críticos a los cuales esta alternativa brinda una solución son:

- DBO₅

El informe M (Campo Yarigui Pozo 135, 07-07-2014) presenta la concentración más alta de este parámetro en la etapa de exploración: 2.750 mg/L O₂, removiendo 2.612,5 mg/L O₂ y quedando 137,5 mg/L O₂ en el agua residual. Logrando cumplir con la normativa ambiental del país ya que el límite máximo permisible para la etapa de exploración es de 200 mg/L O₂. Por otra parte, el informe AA (Campo Opón, 04-11-2016) presenta la concentración más alta de este parámetro en la etapa de producción: 537 mg/L O₂, al utilizar como alternativa esta tecnología alcanzaría a remover 510,15 mg/L O₂, quedando 26,85 mg/L O₂ en el agua residual. Siendo esta tecnología suficiente para que el parámetro se encuentre dentro del límite permitido, que es de 60 mg/L O₂ para la etapa de producción.

- DQO

En la etapa de exploración, el informe con la concentración más alta es el M (Campo Yarigui Pozo 135, 07.07.2014) reportando 5.270 mg/L O₂. Utilizando esta tecnología con el porcentaje teórico de remoción más alto, remueve 5.006,5 mg/L O₂ quedando 263,5 mg/ L O₂ en el agua residual. Siendo suficiente para controlar el parámetro ya que el límite máximo permisible en la etapa de exploración para DQO es de 400 mg/L O₂. Por otra parte, en la etapa de producción, el informe con

⁸⁷ RESTREPO OSORNO, HERNÁN ALONSO. Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín. 2009. p. 9- 27.

la concentración de DQO más alta es el Z (Campo Opón, 17-09-2016) reportando 530 mg/L O₂, donde al utilizar como alternativa esta tecnología alcanzaría a remover 503,5 mg/L O₂ quedando 26,5 mg/L O₂ en el agua residual. Cumpliendo con esto el límite máximo permisible para la etapa de producción que es de 180 mg/L O₂.

- Hidrocarburos totales

El informe T (Campo Pavas Cáchira, 05-12-2014) perteneciente a la etapa de producción registra el valor más alto de hidrocarburos totales: 53,1 mg/L. Al utilizar este tipo de coagulante alcanzaría a remover 50,445 mg/L quedando en el agua residual 2,655 mg/L. Logrando cumplir con el límite máximo permisible para la etapa de producción que es de 10 mg/L.

6.10.2 ALTERNATIVA TRATAMIENTO SECUNDARIO: PAMLA

El Proceso Ascensional de Mantos de Lodos Anaerobio tiene una remoción teórica entre el 60 - 85%.⁸⁸ Los parámetros críticos a los que esta alternativa brinda una solución son:

- DBO₅

El informe M (Campo Yarigui Pozo 135. 07-07-2014) presenta la concentración más alta en la etapa de exploración: 2.750 mg/L O₂, al utilizar una alternativa como esta alcanzaría a remover 2.337,5 mg/L O₂ quedando 412,5 mg/L O₂ en el agua residual. Por consiguiente, sigue incumpliendo con la normativa ambiental del país ya que el límite máximo permisible para la etapa de exploración es de 200 mg/L O₂. Cabe resaltar que el informe W (Pozo Cantagallo 156, 04-02-2015)

⁸⁸ VÁSQUEZ NÚÑEZ; Geinny. Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la costa atlántica colombiana. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. 2013. p. 35

tampoco alcanzaría a cumplir con la normativa si se tiene en cuenta sólo esta alternativa de solución. Por otra parte, el informe AA (Campo Opón, 04-11-2016) presenta la concentración más alta en la etapa de producción: 537 mg/L O₂, en donde alcanzaría a remover 456,45 mg/L O₂ y quedando 80,55 mg/L O₂ en el agua residual. Sin embargo, esta tecnología tampoco sería suficiente para que el parámetro se encuentre dentro del límite permitido, ya que este límite para la etapa de producción es de 60 mg/L O₂.

- DQO

En la etapa de exploración, el informe con la concentración más alta es el M (Campo Yarigui Pozo 135, 07-07-2014) reportando 5.270 mg/L O₂. Utilizando esta tecnología con el porcentaje teórico de remoción más alto, remueve 4.479,5 mg/L O₂ quedando 790,5 mg/L O₂ en el agua residual. Sin embargo, esta alternativa no es suficiente para controlar el parámetro ya que el límite máximo permisible en la etapa de exploración para DQO es de 400 mg/L O₂. Cabe resaltar que los demás informes si cumplirían si utilizan como alternativa esta tecnología. Por otra parte, en la etapa de producción, el informe con la concentración más alta es el Z (Campo Opón, 17-09-2016) reportando 530 mg/L O₂, con esta alternativa alcanzaría a remover 450,5 mg/L O₂ quedando 79,5 mg/L O₂ en al agua residual. Cumpliendo con esto el límite máximo permisible para la etapa de producción que es de 180 mg/L O₂.

- SST

En informe L (Campo Yarigui Pozo 134, 15-10-2014) presenta la concentración más alta en la etapa de exploración: 1.426 mg/L. Al utilizar esta alternativa alcanzaría a remover 1.212 mg/L quedando en el agua residual 214 mg/L que seguiría incumpliendo con la normativa ambiental del país, ya que el límite máximo permisible para la etapa de exploración es de 50 mg/L. Cabe resaltar que esta

alternativa tampoco sería suficiente para el informe J (Campo Yarigui Pozo 133, 30-07-2014). Con respecto a la etapa de producción, el informe Z (Campo Opón, 17-09-2016) presenta la concentración más alta: 215 mg/L, removiendo con esta alternativa 182,75 mg/L y por lo tanto, quedando 32,25 mg/L en el agua residual que sí cumpliría con el límite máximo permisible para los SST en la etapa de producción que es de 50 mg/L.

6.10.3 ALTERNATIVA TRATAMIENTO TERCIARIO: ÓSMOSIS INVERSA

La remoción teórica de las sales mediante esta tecnología está entre un 95 a 99.9% ⁸⁹ El parámetro crítico al cual brinda una solución es:

- Cloruros

En la etapa de exploración, el informe F (Campo Llanito, 12-05-2015) registra el valor más alto de concentración de cloruros: 27.900 mg/ L Cl-. Al utilizar una tecnología como la ósmosis inversa puede remover 27.872 mg/L Cl-, quedando 28 mg/L Cl- en el agua residual que cumpliría con la resolución 0631 de 2015 ya que el límite máximo permisible para la etapa de exploración es de 1.200 mg/L Cl-. Por otra parte, en la etapa de producción, el informe AA (Campo opón, 04-11-2016) registra la concentración más alta de cloruros: 31.257 mg/L Cl-, aplicando esta tecnología alcanzaría a remover 31.225 mg/L Cl-, quedando 32 mg/L Cl- en el agua residual. Por lo tanto, cumpliría con la resolución 0631 de 2015 ya que el límite máximo permisible para la etapa de producción es de 1.200 mg/L Cl-. Cabe resaltar que todos los informes que reportan concentraciones altas de cloruros pueden llegar a cumplir con la normativa ambiental si se toma como opción de

⁸⁹ RWL WATER. Ósmosis inversa y nanofiltración. Octubre 2017. [En línea] Disponible en: <http://www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa.php/libreria-tecnica-relacionada/5/osmosis-inversa-y-nanofiltracion>

tratamiento esta tecnología. Sin embargo, en algunos campos por cuestiones económicas no es viable su aplicación.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis llevado a cabo se concluye lo siguiente:

- En la presente investigación, no se pudo recopilar y analizar el volumen de información que se pretendía, ya que las autoridades ambientales como la CAS y la ANLA no cuentan con un apropiado gerenciamiento de la data necesaria. Aunque en teoría y de acuerdo con los reglamentos, todos los pozos y campos deberían reportar en sus informes de cumplimiento ambiental los resultados del monitoreo a sus vertimientos, ni la ANLA ni la CAS cuentan con información organizada, actualizada y fácilmente consultable en este tema. Lo anterior no contribuye a un adecuado seguimiento por parte de las autoridades y la comunidad en general, a un tema muy importante para el medio ambiente y la salud de las personas, como es el cumplimiento de los requisitos de vertimiento de los pozos y campos petroleros.
- La Resolución 0631 de 2015 añadió y modificó 18 parámetros del Decreto 1594 de 1984 que se consideran necesarios para permitir una regulación más estricta, pero que a su vez no fueron suficientes para cumplir con todos los requerimientos que esto abarca. Es decir, la normatividad actual vigente sigue teniendo vacíos y discrepancias en la clasificación de las actividades realizadas por el sector de hidrocarburos, siendo la ambigüedad una consecuencia que puede llevar a una evaluación errónea en el momento de cumplir con la normatividad.
- Uno de los cambios sustanciales y con mayor trascendencia en la conversión del Decreto 1594 a la Resolución 0631 fue el de reemplazar el

porcentaje de remoción en carga por un valor límite fijo. De esta manera se evita que se evalúe la eficiencia de la remoción, como se hacía previamente, y se redireccione el control a la cantidad de contaminantes descargados.

- En la resolución actualmente vigente continúan encontrándose parámetros que están exentos de un valor máximo permisible. Estos parámetros se encuentran como de análisis y reporte, dejando ciertos vacíos en el cuidado ambiental del país al ser reportados sin tener restricciones, como es el caso de parámetros como los HAP y BTEX, altamente relacionados con la actividad de la industria.
- De los 24 informes analizados en la etapa de perforación, 17 de ellos estarían incumpliendo con la Resolución 0631 de 2015 en diferentes parámetros. Y de los 4 informes analizados en la etapa de producción, 3 de ellos estarían incumpliendo con la Resolución 0631 de 2015 en diferentes parámetros. Este incumplimiento eventualmente podría conducir a la necesidad de cerrar los pozos o los campos, con lo cual se dejarían de producir barriles importantes para la economía de las empresas, las regiones y el país
- Los parámetros como el plomo, el vanadio y los sulfuros no fueron evaluados ya que los informes consultados presentan un rango en el cual se encuentra el límite máximo permisible, es decir, para el plomo el límite máximo permisible es de 0,2 mg/L y en el ICA se reporta como <0,5 mg/L, con lo cual no fue posible determinar si el parámetro cumple o no con el valor máximo permisible, dejando a la suposición un parámetro importante.

- Los parámetros críticos que estarían incumpliendo con la Resolución 0631 de 2015 son: pH, cloruros, sulfatos, fenoles totales, DBO5, DQO, SST, grasas y aceites, hierro e hidrocarburos totales.
- Los parámetros críticos que estarían incumpliendo representan un alto riesgo para detener la explotación de los campos evaluados y eventualmente podrían recibir rigurosas sanciones.
- Al conocer los diferentes parámetros críticos que están incumpliendo con la resolución, y teniendo en cuenta los procesos más aplicados en el tratamiento de aguas residuales en países como México, Brasil, Chile, Guatemala y República Dominicana, se propusieron de manera general las siguientes alternativas: lodos activados, lagunas de activación, ósmosis inversa, entre otras, en donde cada una de ellas aporta significativamente una posible alternativa de tratamiento a los parámetros críticos, permitiendo que las empresas operadoras opten por hacer una reconversión en sus tecnologías usadas.
- Teniendo en cuenta las alternativas propuestas y el análisis realizado con el porcentaje de remoción teórico de algunas de ellas, se evidenció que es necesario hacer uso de dos o más alternativas para poder cumplir con los límites establecidos por la resolución 0631 de 2015 en algunos parámetros, ya que teóricamente una sola no sería suficiente para controlarlo. Permite con esto 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 de cada tecnología para evaluar si es posible económicamente realizar este reemplazo.

- Debido a los parámetros más estrictos que propone la normativa actual vigente, las compañías operadoras estarían optando por evitar los vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y realizando otro tipo de disposición final a estas aguas como la aspersión en vías y/o la reinyección.

8. RECOMENDACIONES

Para estudios futuros se recomienda:

- Debido a que la información entregada a la autoridad ambiental por las empresas operadoras se encuentran en algunos casos en mal estado, impidiendo su ejecución y por lo tanto su evaluación, se recomienda más organización, auditoría y control para evitar posibles incumplimientos de las normativas ambientales del país.
- Tener como opción para todo el público una lista actualizada virtual en la página de la ANLA de los expedientes radicados en ella, organizado ya sea por departamento y/o por empresa operadora, ya que esto facilitaría el acceso a la información por parte de los ciudadanos.
- De acuerdo a la experiencia que se presentó en el desarrollo de la tesis, en cuanto a la consulta de información en la base de datos de la ANLA, se recomienda a esta entidad implementar y tener a disposición de la ciudadanía herramientas que faciliten el acceso a la información, tales como: aumentar el número de equipos disponibles para responder a la alta demanda que recibe constantemente; generar un respaldo y/o copias de la información manejada con el fin de evitar la pérdida de éstas por un mal manejo de la entidad o del ciudadano, de esta manera también podría solucionarse el inconveniente de prolongadas esperas porque la información está ocupada.

- Para evitar malentendidos e incumplimientos, se recomienda que los laboratorios acreditados por el IDEAM para realizar los respectivos monitoreos y análisis, cuenten con la infraestructura y la tecnología necesaria para realizar las mediciones de los nuevos parámetros establecidos en la normatividad vigente. Evitando rangos que imposibiliten la lectura y evaluación de los mismos.
- Realizar un estudio profundo y analítico por parte de la autoridad ambiental que evalúe el comportamiento de los vertimientos de las aguas residuales en el sector de hidrocarburos, desde que entró en vigencia la Resolución 0631 de 2015, para conocer realmente cuál es la disposición final que se le están haciendo a estas aguas y tomar las medidas respectivas si están incumpliendo.
- Con el fin de complementar el análisis realizado en esta investigación, se recomienda hacer un estudio exhaustivo de las alternativas y/o tecnologías que puedan brindar una solución viable y económicamente factible a los parámetros críticos de acuerdo a las necesidades de cada campo/pozo.

BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Balance de producción de gas por campo. Vicepresidencia de operaciones, regalías y participaciones. Enero-diciembre 2016.
- AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Producción fiscalizada de petróleo por campo en superficie. Vicepresidencia de operaciones, regalías y participaciones. Enero-diciembre 2016.
- AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Producción fiscalizada de petróleo por campo en superficie. Vicepresidencia de operaciones, regalías y participaciones. Enero-junio 2017.
- AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. Hidrocarburos Totales de Petróleo. 6 mayo 2016. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts123.html
- AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. Sulfuro de Carbono. Septiembre 1997. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: <http://www.cvs.saude.sp.gov.br/pdf/toxfaq162.pdf>
- AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y REGISTROS DE ENFERMEDADES. Tricloroetileno. [En línea]. [agosto 2017] Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs19.html

- AGUAMARKET. Diccionario. [En línea]. [septiembre 2017] Disponible en: <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3286>
- AMERISUR EXPLORACIÓN COLOMBIA. Informe de cumplimiento ambiental etapa de perforación pozo exploratorio Fénix Ave 01. p. 10.
- ANTEK. Informe de interpretación de resultados 4538-14-HOC. Caracterización fisicoquímica y microbiológica agua residual industrial Proyecto Coyote 1 – Perforación. HOCOL S.A. p. 3.
- ANTEK. Monitoreo y caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas pertenecientes al Campo Pavas Cáchira. La Esperanza, Norte de Santander. Diciembre 2014. p. 57
- ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface Production Operations. Third Edition. United States of America: Elsevier, 2008. p. 482-498. ISBN: 978-0-7506-7853-7
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO. Informe de desempeño ambiental 2015. Bogotá, Colombia. 2016. p. 20-21, 25-26.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO. Informe de gestión ambiental 2014. Bogotá, Colombia. 2015. p. 18-19.
- AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Glosario. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: <http://www.anla.gov.co/subdireccion-evaluacion-y-seguimiento>
- BARAÑAO, Pablo Andrés; TAPIA, Luis Alejandro. Tratamiento de las aguas servidas: situación en Chile. 2004. p. 113.

- BOYD, Claude E. Estándares de la calidad del agua: amoníaco de nitrógeno total. Boletín Nicovita Camarón de mar. Edición 1. Volumen 7. Diciembre 2002. p. 1.
- CIMA. Informe de monitoreo de agua superficial, residual industrial, residual doméstica, Campo Opón. Bogotá D.C., octubre 2016. p. 31-36.
- CISTERNA OSORIO, Pedro; PEÑA, Daisy. Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25000 habitantes en la VIII región. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. p. 6-9.
- COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 1594 de 1984 (26, junio, 1984). Por la cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI –Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III –Libro I- del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Diario Oficial. Bogotá D.C. 1984.
- COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 de 2010 (25, octubre, 2010). Por la cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI –Parte III- Libro II del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D.C. 2010.
- COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. 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 público y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D.C. 2015. p. 12-14

- COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. Ley 9 de 1979 (24, enero, 1979). Por la cual se dictan medidas sanitarias. Diario Oficial. Bogotá D.C. 1979.
- DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL. Universidad Autónoma de México. Tratamiento de Aguas residuales: sedimentación primaria.
- DEPARTMENT OF ENVIRONMENT AND HERITAGE PROTECTION. BTEX Chemicals. Queensland, Australia. Marzo 2002. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: <https://www.ehp.qld.gov.au/management/non-mining/btex-chemicals.html>
- DEPARTMENT OF ENVIRONMENT AND HERITAGE PROTECTION. Fact Sheet Population Health Branch: Carbamate insecticides. Queensland, Australia. Marzo 2002. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: https://www.health.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0027/422298/4174.pdf
- DEPETRIS, P. Fenoles. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Fenoles.htm>
- DÍAZ Altmira, RINCÓN Nancy; MARIN, Julio Cesar; BEHLING, Elisabeth; CHACÍN, Elsa; FERNÁNDEZ, Nola. Degradación de fenoles totales durante el tratamiento biológico de aguas de producción petroleras, 2005. Universidad de Zulia, Venezuela, p. 283-287.

- DICCIONARIO DE LA REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [En línea]. [septiembre 2017]. Disponible en: <http://dle.rae.es>
- ECOPETROL S.A. El petróleo y su mundo. Bogotá, Colombia. 2014. p. 35-37.
- ECOPETROL S.A. Informe de cumplimiento ambiental campo Barranca Lebrija que hace parte de campo Yarigui Cantagallo y aledaños, julio a diciembre de 2014. p. 11-13.
- ECOPETROL S.A. Informe de cumplimiento ambiental campo Pavas Cáchira que hace parte de campo Yarigui Cantagallo y aledaños, julio a diciembre de 2014. p. 13-14.
- FERNÁNDEZ A, Daniel G; MANCIPE G, Liliana C y FERNÁNDEZ A, Diana C. Intoxicación por organofosforados. 2010, vol.18, n.1 [En línea]. [septiembre 2017]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-52562010000100009&lng=en&nrm=iso. p. 84-92. ISSN 0121-5256.
- FERNÁNDEZ ACUÑA, Sebastián Ignacio. Tratamiento y disposición de aguas residuales de plantas de tratamiento de agua potable en Chile. Universidad de Chile, 2015. p. 15-17.
- FUNDACIÓN CHILE. Tecnologías emergentes y no convencionales, Santa Cruz, Bolivia. 2013. p. 10-18
- HAMMEKEN ARANA, Alejandro Mauricio; ROMERO GARCÍA, Eduardo. Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Chol. p. 118.

- IDEAM. Fósforo total en agua por digestión ácida, método del ácido ascórbico. 2004. p. 3.
- IDEAM. Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103-105°C. 2007. p. 2.
- IDEAM. Tensoactivos aniónicos en agua – Método SAAM. 2007. p. 2.
- INSTITUTO INTERNACIONAL PARA EL MANEJO DEL CIANURO. Definiciones y siglas para el Código Internacional para el Manejo de Cianuro. Junio 2012. p. 3.
- INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional de 1,2-Dicloroetileno. España. 2013.
- KATIYAR, Santosh K; AGARWAL, Rajesh y MUKHTAR, Hasan. CRC Handbook of chromatography: liquid chromatography of polycyclic aromatic hydrocarbons. Boca Ratón, Florida: CRC Press, 1993. p. 1-17. ISBN: 0-8493-3005-X
- LENNTECH. Tratamiento y purificación del agua: Tabla periódica. [En línea]. [septiembre 2017]. Disponible en:
<http://www.lennotech.es/periodica/elementos.htm>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Cloruros (CL TOTAL). España. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Cloruros-CI-total,15666,11,2007.html>

- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Compuestos orgánicos halogenados (AOX). España. [En línea]. [Agosto 2017]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Compuestos-Organicos-Halogenados-AOX,15627,11,2007.html>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Fluoruros (Como F TOTAL). España. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Fluoruros-como-total-694112007.html>
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente - Anotado. Bogotá, Colombia. 2014.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Presentación nueva norma de vertimientos. Bogotá, 18 marzo 2015. [En línea]. [noviembre 2015]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Listado de pozos campos y contratos vigentes en explotación. Dirección de hidrocarburos. [En línea]. [septiembre 2017]. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/480779/Consolidado%2B%20puntos+fiscalizacion-Pozos+por+contrato%2BMME-40.pdf/57380ed4-647d-4510-a208-9745811ca42c>

- NEIRA GUTIÉRREZ, Marco Antonio. Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile. Universidad de Chile. 2006. p. 10-12.
- NOGUEZ PEDROZA, Luis Ángel; CANSECO LÓPEZ, Carlos Alberto. Manejo de basura eléctrica en México bifenilos policlorados. UNAM. México, 2010.
- NOYOLA, Alberto. Las plantas de tratamiento de aguas residuales y el cambio climático. Instituto de ingeniería de la Universidad Autónoma de México. 2013.
- PÉREZ GARRIDO, Claudia; LEÓN RODRÍGUEZ, Frida María; DELGADILLO GARCIA, Graciela Ruth. Tratamiento de aguas: manual de laboratorio, Universidad Autónoma de Nuevo México, México, 2013, p. 91-107.
- REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA. Compuesto organoclorado. [En línea]. [agosto 2017]. Disponible en: <http://diccionario.raing.es/es/lema/compuesto-organoclorado>
- RESTREPO OSORNO, HERNÁN ALONSO. Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín. 2009. p. 9-27.
- RETEMA. Revista técnica de medio ambiente. Planta de tratamiento de efluentes de la refinería de Cartagena. Edición 167, 2013. p. 75

- ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999. p. 36-346. ISBN 958-8060-13-3
- RWL WATER. Ósmosis inversa y nanofiltración. Octubre 2017. [En línea] [octubre 2017] Disponible en: <http://www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa.php/libreria-tecnica-relacionada/5/osmosis-inversa-y-nanofiltracion>
- SAINZ SASTRE, Juan Antonio. Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Primera Edición. Madrid, España: Fundación EOI, 2005. p. 35-43-45. ISBN: 978-84-88723-58-1
- SANZ. Joan, Veolia Water Technologies. Eliminación de sulfatos en aguas de mina mediante proceso de precipitación en serie y nano - filtración. p. 1-4.
- UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO. Laboratorio química analítica 502503. p.1.
- UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA. Separación por cromatografía en columna de pigmentos vegetales y sus espectros de absorción. Departamento de Ingeniería y Ciencias Química. p. 25-35.
- VÁSQUEZ NÚÑEZ; Geinny. Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la costa atlántica colombiana. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. 2013. p. 35

- WILLIAMSON, Don. Fundamentos de los fluidos de perforación. Oilfield Review. Volumen 25, no. 1. 2013. p. 67.