PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES

MAESTRÍA EN CONSERVACIÓN Y USO DE LA BIODIVERSIDAD

2018

AUTOR: EDUAR MENDOZA

DIRECTOR: ARMANDO SARMIENTO

MONOGRAFÍA

AFECTACIONES POTENCIALES POR LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN DE LA INDUSTRIA DE HIDROCARBUROS SOBRE LA ICTIOFAUNA. CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, REGIÓN DE LA ORINOQUÍA, COLOMBIA

Tabla de contenido

1 Resumen y Abstract ... 3
1.1 Resumen ... 3
1.2 Abstract ... 4
2 Conceptos Clave ... 5
3 Introducción ... 7
4 Objetivos ... 12
4.1.1 Objetivo general ... 12
4.1.2 Objetivos específicos ... 12
5 Metodología ... 13
6 Área de Estudio ... 15
7 Capítulo 1: Identificar las zonas de la macrocuenca hidrológica de la región de la Orinoquía colombiana, que presenten algún tipo de interacción con las aguas de producción de la industria petrolera. ... 21
7.1 Características de las áreas hidrográficas identificadas ... 24
7.2 Análisis de los vertimientos de los estudios de caso ... 27
7.3 Características de la ictiofauna representativa y las relaciones ecológicas ... 29
8 Capítulo 2: Determinar las afectaciones potenciales sobre la ictiofauna representativa de las zonas identificadas en la cuenca hidrológica de la Orinoquía colombiana, de acuerdo con las características físico-químicas de las aguas de producción. ... 33
8.1 Características generales de las aguas de producción ... 33
8.2 Propiedades de la Cuenca Petrolífera de los Llanos Orientales ... 35
8.3 Parámetros físico-químicos de las aguas de producción de los casos de estudio 37
8.4 Descripción general de las posibles afectaciones en la ictiofauna ... 42
9 Capítulo 3: Establecer las alternativas de manejo de impactos de las aguas de producción ... 48
9.1 Descripción general de métodos de tratamiento ... 49
9.2 Medidas de tratamiento identificadas en los estudios de caso ... 51
10 Análisis y discusión ... 52
11 Conclusiones y recomendaciones ... 57
12 Bibliografía ... 60

Índice de Figuras

Figura 1. Área de estudio 15
Figura 2. Áreas otorgadas ANLA 18
Figura 3. Pozos otorgados ANLA 19
Figura 4. Puntos autorizados para vertimientos 19
Figura 5. Sub Zonas Hidrográficas identificadas 25
Figura 6. Afluentes de las Cuencas principales Río Meta y Río Vichada 26

Índice de Tablas

Tabla 1: Proyectos asociados a los puntos autorizados para vertimientos 22
Tabla 2. Relación de caudales de vertimiento Campo Entrerríos 27
Tabla 3. Relación de caudales de vertimiento Campo Rubiales 29
Tabla 4. Componentes y rango de valores del agua producida 35
Tabla 5. Parámetros físico-químicos estudios de caso 37
Tabla 6. Determinación de carga contaminante y aumento de concentración real aportada por los vertimientos caso estudio 40
Tabla 7. Tipos de impactos potenciales 46

1 Resumen y Abstract

1.1 Resumen

El desarrollo sostenible, debe contemplar el aprovechamiento de los recursos ecosistémicos de manera que se asegure su integridad y preservación para las generaciones futuras. Bajo este criterio, el agua es uno de los servicios más relevantes que provee el ecosistema, no solo por su rol de aprovisionamiento, sino también de regulación y soporte de los demás servicios y procesos de una región. Es así que los sectores productivos que tengan algún tipo de interacción con el sistema hídrico, deben adaptar estrategias que garanticen la protección de todos los cuerpos de agua dentro de su área de influencia.

La macrocuenca del Orinoco, es una de las regiones con mayor riqueza hídrica del país, que hace posible la existencia de distintos niveles de biodiversidad. Así mismo, este territorio está asociado a una de las zonas de mayor producción de hidrocarburos a nivel nacional, conocido como la cuenca petrolífera de Los Llanos Orientales.

En el presente trabajo se pretende realizar una revisión de las características de las aguas de producción en la cuenca petrolífera de los Llanos orientales en Colombia, considerando particularmente las posibles afectaciones a la ictiofauna de la Orinoquía, a partir del análisis de los vertimientos de dos estudios de caso y mediante la documentación de los tipos de sistemas de tratamiento existentes para estos desechos líquidos, buscando así la manera de reintegrar el sistema hídrico para su mejor y mayor aprovechamiento.

Palabras clave: hidrocarburos, agua producida, cuenca hidrográfica, ictiofauna

1.2 Abstract

Sustainable development must contemplate the use of ecosystem resources looking forward to guarantee its integrity and preservation for future generations. Under this point of view, water is one of the most important services provided by the ecosystem, not only because of its supply role, but also because of regulation and support of other services and processes in a region. Thus, the productive sectors that have some type of interaction with this resource, must implement strategies that guarantee the protection of the water systems in their area of influence.

The Orinoco macrobasin is one the highest water resources regions of the country, which supports diverse levels of biodiversity, being the fishery resource one of the most relevant. Likewise, this territory is associated with the greater production of hydrocarbons area in the country, known as Llanos Orientales oil basin.

This paper intend to review the characteristics of production waters impacts, particularly considering the possible effects on the Orinoco ichthyofauna from the analysis of the effluents of two case studies, documenting the types of existing treatment systems and looking for a way to reintegrate the water resource for its better and greater use.

Key words: hydrocarbons, water produced, hydrographic basin, ichthyofauna

2 Conceptos Clave

A continuación, se citan los conceptos más relevantes que pueden ser de utilidad para para facilitar la comprensión del lector sobre la presente monografía. Estos conceptos fueron tomados de los portales de libre consulta de Ecopetrol (ECOPETROL S.A., 2014) y de la Secretaría de Energía del gobierno mexicano (SENER, 2017):

Aditivo: sustancia química agregada a un producto para mejorar sus propiedades.

Barril: unidad de volumen para petróleo e hidrocarburos derivados, igual a 42 galones US.

Bloque: subdivisión en acres dedicada a la exploración y producción de hidrocarburos.

Campo: área geográfica en la que un número de pozos de petróleo y gas producen de una misma reserva probada. Un campo puede referirse únicamente a un área superficial o a formaciones subterráneas.

Crudo: mezcla de hidrocarburos que existe en fase líquida en reservorios bajo tierra y que permanece a presión atmosférica después de ser recuperado del pozo. Se puede encontrar asociado con gas, sulfuros y metales.

Cuenca petrolífera: receptáculo (cavidad) donde se deposita una columna sedimentaria, y que comparte en varios niveles estratigráficos una historia tectónica común.

Exploración: actividad o conjunto de actividades que se valen de métodos directos, incluyendo la perforación de pozos, encaminadas a la identificación, descubrimiento y evaluación de hidrocarburos en el subsuelo de un área definida.

Extracción: actividad o conjunto de actividades destinadas a la producción de hidrocarburos, incluyendo la perforación de pozos de producción, la inyección y la estimulación de yacimientos, la recuperación mejorada, la recolección, el acondicionamiento y separación de hidrocarburos, la eliminación de agua y sedimentos.

Hidrocarburo: compuesto químico orgánico formado por hidrógeno y carbono en cualquiera de sus fases, líquida, sólida o gaseosa.

Pozo: agujero perforado en la roca desde la superficie de un yacimiento a efecto de explorar o para extraer aceite o gas.

Reinyección: inyección de gases a presión para recuperar el petróleo de una fuente.

Reserva: volumen de Hidrocarburos en el subsuelo, calculado a una fecha dada a condiciones atmosféricas.

Reservas posibles: estimado de reservas de crudo o gas con base a datos geológicos o de ingeniería, de áreas no perforadas o no probadas.

Reservas probables: estimado de las reservas de crudo y/o gas con base a estructuras exploradas, pero requiriendo confirmación más avanzada para podérseles clasificar como reservas probadas.

Reservas probadas: cantidad de crudo y gas que se estima recuperable de campos conocidos, bajo condiciones económicas y operativas existentes.

Yacimiento: también llamado reservorio, es la acumulación de aceite y/o gas en roca porosa tal como arenisca. Un yacimiento petrolero normalmente contiene tres fluidos (aceite, gas y agua) que se separan en secciones distintas debido a sus gravedades variantes. El gas siendo el más ligero ocupa la parte superior del yacimiento, el aceite la parte intermedia y el agua la parte inferior.

3 Introducción

La supervivencia del sistema social depende por completo de la interacción y aprovechamiento de los bienes y servicios que provee un ecosistema, el cual se transforma por las diversas intervenciones humanas en términos de ocupación de suelo, explotación de los recursos naturales y procesos de contaminación (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Esto significa que en la medida que continúen las afectaciones sobre el medio ambiente, menores serán los beneficios disponibles por parte de los servicios ecosistémicos, que a su vez terminaran en repercusiones negativas para el bienestar humano y la calidad de vida.

Según lo mencionado, el informe "*Nuestro futuro común: Informe Brundtland*" (Naciones Unidas, 1987), establece la importancia de prevenir, mitigar y corregir las amenazas sobre el planeta, así como garantizar el bienestar humano a partir de un crecimiento equitativo y duradero, donde el desarrollo sea sostenible y lo define como: "*Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades*".

El agua es uno de los recursos naturales más afectados y con mayor riesgo en cuanto a su disponibilidad para generaciones futuras, teniendo en cuenta que solo el 2;53% es agua dulce y su accesibilidad depende de la configuración espacial, así como de los ciclos de precipitación, evapotranspiración y escorrentía (UNESCO, 2003).

Colombia es a nivel mundial uno de los países en el cual el agua representa uno de los sistemas más importantes, gracias a su gran variedad de relieves y regímenes climáticos (MAVDT, 2010), donde juega un papel fundamental en el mantenimiento de la biodiversidad por su rol como servicio ecosistémico de aprovisionamiento (oferta hídrica), así como de

regulación y soporte en el mantenimiento de los demás procesos como producción primaria, formación del suelo, ciclo de nutrientes, entre otros (MADS, 2012).

Con base en lo anterior, se resalta que una adecuada gestión del recurso hídrico como parte del aseguramiento de los servicios ecosistémicos, debe incluir el análisis de los sectores productivos, que aunque son las principales fuentes de desarrollo nacional e internacional, también tienen un papel como motores de cambio que afectan los servicios ecosistémicos y la biodiversidad como consecuencia de (MADS; Programa Naciones Unidas para el Desarrollo, 2014):

- Cambios en el uso del suelo (transformación del territorio)
- Sobreexplotación de los ecosistemas o de alguno de sus recursos
- Introducción de especies exóticas
- Emisión de gases contaminantes (cambio climático)
- Contaminación y toxificación del agua

El sector de minería e hidrocarburos es uno de los sectores productivos más relevantes del país, con un aporte cerca del 8% del PIB en el 2011 (Martínez Ortiz, 2012). Específicamente, la industria de hidrocarburos (petróleo y el gas) se divide en tres fases macro: upstream que contempla la exploración y producción, midstream enfocada al transporte y almacenamiento, y downstream que se refiere a la refinación, la elaboración de productos derivados y la comercialización (Okuthe, 2015).

La fase upstream tiene un papel importante como parte de los motores de cambio mencionados anteriormente, a nivel de contaminación y toxificación del agua como consecuencia de (Adebayo & Tawabini, 2012):

- Descargas de los cortes de roca perforada en sistemas hídricos, contaminados con fluidos tóxicos de perforación.
- Generación de agua de producción que contiene altos niveles de hidrocarburos y aditivos químicos, por su descarga en cuerpos hídricos o inyección en el subsuelo.

Específicamente, el agua de producción es el agua residual del proceso de extracción y producción, la cual contempla el agua presente de forma natural en las formaciones geológicas de los yacimientos de petróleo y gas, así como el agua adicional que se inyecta para realizar la extracción (Calao Ruiz, 2007), y representa uno de los mayores desechos por el volumen generado en la fase upstream, que en EE.UU. se reporta como el 98% del total de las aguas residuales, en comparación con el 2% de las generadas durante la perforación (Adebayo & Tawabini, 2012).

Para el caso del petróleo, la composición del agua de producción depende de las características geológicas de cada yacimiento, aunque en general se identifican sustancias químicas naturales como aceite disperso, hidrocarburos aromáticos, alquilfenoles, metales pesados y material radiactivo de origen natural (NORM) (Bakke , Klungsøyr, & Sanni, 2013). Adicional a los componentes naturales, a partir del agua de inyección se pueden incorporan otras mezclas de compuestos químicos de tipo aditivos (de uso en los equipos o residuales del proceso de perforación) como: inhibidores de corrosión, inhibidores de incrustaciones (para los depósitos minerales), biocidas, desmulsificantes, coagulantes, floculantes y clarificadores para eliminar sólidos, así como disolventes para la parafina (Veil, Puder, Elcock, & Redweik, 2004).

Las regiones con reservas petrolíferas son conocidas como cuencas por su característica subsidente, lo que significa que es una zona que presenta un hundimiento vertical, ocupada por

una acumulación de sedimentos dejando espacios porosos en los cuales se localizan los yacimientos (Malagón, Ruiz, & Montoya, 2016).

En Colombia se reportan 23 cuencas, de las cuales solo nueve son productoras de hidrocarburos: Llanos Orientales, Caguán-Putumayo, Catatumbo, Cordillera Oriental, Valle Inferior del Magdalena, Valle Medio del Magdalena, Valle Superior del Magdalena, Guajira y Guajira Offshore (Malagón, Ruiz, & Montoya, 2016).

La región de los Llanos Orientales corresponde a una de las zonas de mayor interés para el sector, teniendo en cuenta que la extensión de la cuenca de yacimientos petrolíferos (reales y manifestaciones de reservas potenciales) es de aproximadamente 220 000 km^2 (ANH, 2009), y representa el 68,9% de producción del total de crudo del país (Malagón, Ruiz, & Montoya, 2016).

Así mismo a nivel territorial, la cuenca petrolífera de los Llano Orientales se sobrepone en gran parte con la macrocuenca hidrográfica del río Orinoco, el cual es de gran importancia ya que es uno de los río más largos del continente (2150 km de recorrido) y a nivel mundial ocupa el tercer lugar en cuanto a caudal (31.061 m^3/seg), así como el quinto reportado con mayor transporte de sedimentos hacia el océano (150 millones de ton/año) (Rosales, Suárez, & Lasso, 2010).

La macrocuenca en mención, contempla una de las regiones con mayor disponibilidad hídrica del país, que hace posible la existencia de distintos ecosistemas con una alta biodiversidad de especies terrestres y acuáticas, especialmente de peces (Ramírez-Gil & Ajiaco-Martínez, 2011). Lo anterior se da como resultado de la variedad de unidades fisiográficas, representadas principalmente por formaciones montañosas, piedemonte, llanuras, altiplanicies y

superficies colinadas (Machado-Allison , Lasso, Usma, Sánchez-Duarte, & Lasso-Alcalá, 2010).

El componente íctico cumple un rol fundamental dentro de un territorio y su calidad ecosistémica, ya que en conjunto con los demás elementos bióticos y abióticos, así como con sus interrelaciones con el medio, aseguran que se mantengan los procesos de manera equilibrada. La alteración de los sistemas hidrológicos repercuten de manera directa sobre la integridad y supervivencia de la fauna íctica, por lo tanto se hace indispensable evitar que las acciones de otros sectores productivos ocasionen la degradación de la calidad y modificación hidrológica de los sistemas hídricos (Ramírez-Gil & Ajiaco-Martínez, 2011) y garantizar así un desarrollo realmente sostenible.

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo tiene como propósito determinar las zonas relevantes donde se puedan presentar posibles afectaciones en la ictiofauna de la Orinoquía Colombiana, con relación a las aguas de producción de la cuenca petrolífera de los Llanos orientales; para así describir los sistemas de tratamiento que contrarresten los impactos potenciales reconocidos; ya que en la actualidad en los lineamientos de la ANLA, hay una alta injerencia de las comunidades, las cuales se pronuncian solicitando que no se hagan vertimientos de aguas de producción en su territorio, generalmente basados en la ausencia de información técnica adecuada y las eventuales percepciones sin fundamento que imposibilitan puntos de concertación y acuerdo entre empresa y comunidad en este aspecto

4 Objetivos

4.1.1 Objetivo general

Determinar si la generación de las aguas de producción en la cuenca petrolífera de los Llanos Orientales, tienen alguna relación directa con posibles afectaciones de la calidad del sistema hídrico y la ictiofauna asociada a la macrocuenca hidrológica de la Orinoquía.

4.1.2 Objetivos específicos

1) Identificar las zonas de la macrocuenca hidrológica de la región de la Orinoquía colombiana, que presenten algún tipo de interacción con las aguas de producción de la industria petrolera.
2) Determinar las afectaciones potenciales sobre la ictiofauna representativa de las zonas identificadas en la cuenca hidrológica de la Orinoquía colombiana, de acuerdo con las características fisicoquímicas de las aguas de producción.
3) Establecer las alternativas de manejo de impactos de las aguas de producción.

5 Metodología

El trabajo en mención, se realizó a partir de la revisión sistemática de literatura, a partir de la consulta en bases de datos electrónicos de trabajos académicos y de revistas indexadas, en la bibliografía disponible en entidades e institutos de investigación de tipo ambiental y/o de la industria petrolera afines con el objeto del presente estudio, así como en comunicaciones oficiales y de normativa (leyes, normas, actos legislativos) asociadas con la gestión del sistema hídrico y el manejo de las aguas de producción para el sector de hidrocarburos.

Se contemplaron tres fases relacionadas con los objetivos específicos establecidos:

1) Fase I:

   Inició con la búsqueda preliminar de información sobre la Macrocuenca del Orinoco (área de estudio), lo cual permitió establecer un panorama general sobre el territorio.

   A partir de dicho contexto se determinaron las Zonas Hidrográficas relevantes, sus características y el componente biótico a nivel de ictiofauna relacionado.

   Así mismo, con base en la información disponible para consulta de la autoridad ambiental competente (ANLA) se definieron dos estudios de caso en relación con los vertimientos de las actividades de explotación del sector petrolero. No se incluyeron los permisos ambientales otorgados por las Corporaciones Autónomas Regionales, teniendo en cuenta que según el Decreto 1075 de 2015, el licenciamiento ambiental de la explotación de hidrocarburos es competencia de la ANLA. Adicionalmente se escogió solo las licencias ambientales asociadas a la fase de explotación de hidrocarburos, dada la permanencia de la actividad y por ende del impacto.

2) Fase II:

Se realizó una revisión exhaustiva para determinar la relevancia de las aguas de producción según sus características intrínsecas, así como la conformación de los yacimientos de la cuenca de los Llanos Orientales, relacionadas con los estudios de caso que ocupan la presente monografía.

De igual manera, se determinaron los principales parámetros de las aguas de producción nocivos para la ictiofauna, y se finalizó con una descripción detallada de las posibles afectaciones.

3) Fase III:

Para la revisión final, se investigó sobre los sistemas de tratamiento existentes a nivel nacional e internacional para el maneo de aguas residuales industriales asociadas a las actividades de producción, y se verificó cuáles fueron aplicados en los estudios de caso.

En la discusión y análisis se retomaron las consideraciones más relevantes descritas en el presente estudio, y se finalizó con un análisis de tipo descriptivo, de cuáles podrían ser los impactos más significativos y la existencia de una relación directa o no con la extracción de hidrocarburos.

6 Área de Estudio

La macrocuenca del Orinoco es el área de estudio en la que se fundamenta el presente trabajo, la cual se localiza en 11 departamentos (ver Figura 1): Norte de Santander, Santander, Boyacá, Arauca, Casanare, Cundinamarca, Meta, Vichada, Guaviare, Guainía y Vaupés. Los departamentos más relevantes de la macrocuenca son aquellos que su extensión total se encuentra localizada dentro de la misma: Vichada (100.242km^2), Arauca (23.818 km^2) y Casanare (44.640 km^2), así como el Meta que se encuentra en un 95% (81.747 km^2), mientras que los demás hacen parte en menor proporción (Rodríguez Becerra , y otros, 2009).

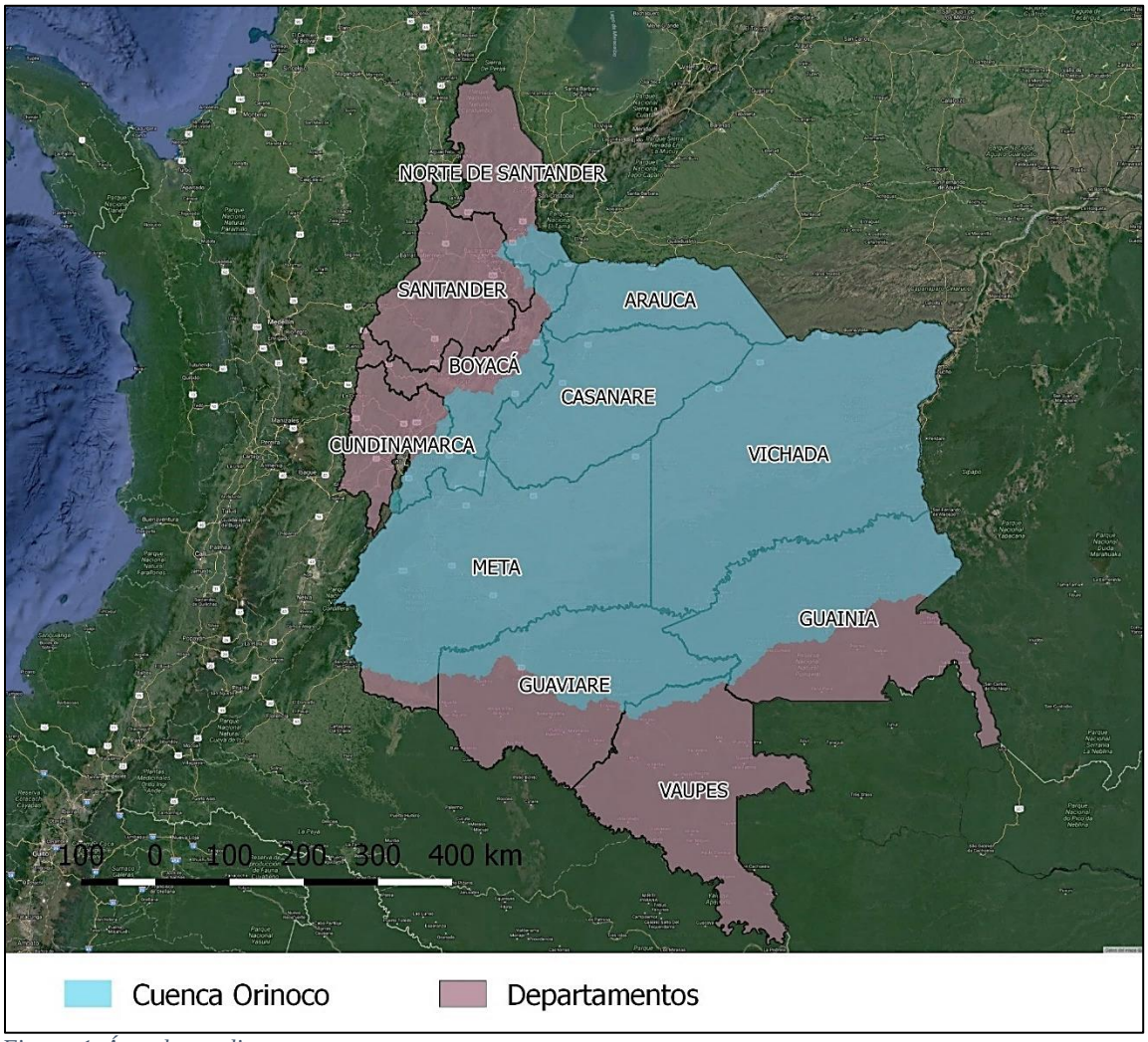

Figura 1. Área de estudio
Fuente: Elaboración propia

Esta región se caracteriza por su estructura geomorfológica, que está dada por un relieve singular conformado cordilleras de plegamiento, escudos o cratones y megacuencas de sedimentación siendo estas las tres estructuras dominantes del entorno natural (Rosales, Suárez, & Lasso, 2010). A nivel de suelo la región se divide en cuatro tipos, según el tipo de suelo y la litología: Andes y piedemontes andinos, Tierras bajas y llanuras (materia aluvional - erosional), El Escudo de Guayana (terrenos mayormente de cuarcita, gneis y granitos) y Penillanuras bajas (erosional – deposicional) (Rosales, Suárez, & Lasso, 2010).

A nivel de paisaje, la macrocuenca corresponde al bioma de sabana y de las montañas tropicales húmedas, que conforman un mosaico de 106 tipos de ecosistemas, representados por sabanas asociadas con redes de bosques de galería, selvas húmedas de los pisos subandino y altoandino, enclaves de matorrales secos andinos, páramos, superpáramos, selva tropical lluviosa, el piedemonte y afloramientos rocosos (Rodríguez Becerra , y otros, 2009).

La región provee diversos tipos de servicios ecosistémicos, en el que la regulación del ciclo del agua es uno de los más notorios, gracias a la que la biogeografía de su territorio lo hace posible, especialmente a nivel de páramos, selvas andinas, los humedales y las grandes superficies inundables (Rodríguez Becerra , y otros, 2009).

A nivel hidrográfico, la Orinoquía es una de las área más representativa (después del área Magdalena-Cauca), teniendo en cuenta que en Colombia se tienen identificadas cinco Áreas Hidrográficas: Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico (HIMAT, 1978). El Orinoco está conformada por 72 de las 311 Sub Zonas identificadas para el país, equivalentes al 23,2% de todo el territorio nacional (IDEAM, 2013).

La región se denomina a partir del gran río Orinoco, donde la macrocuenca contempla una superficie de 991.587 km^2, de la cual alrededor del 35% hace parte de Colombia (conforma

aproximadamente el 30% de la superficie continental nacional), mientras que el otro 65% se encuentra en territorio venezolano (Rodríguez Becerra , y otros, 2009).

La Orinoquía está conformada por otras cuencas de primer orden como las de los ríos Arauca, Meta, Bita, Dagua-Mesetas, Tomo, Tuparro, Vichada, Zama, Matavén y Ajota, así como afluentes del río Guaviare y la estrella fluvial de oriente (Atabapo, Inírida y Guaviare) que desembocan en el río Orinoco y están conformadas por 92 subcuencas (Rodríguez Becerra , y otros, 2009).

En términos de desarrollo económico a nivel nacional y de conformidad con lo mencionado en la introducción, la Orinoquía juega un rol fundamental en el sector petrolero, teniendo en cuenta que la cuenca petrolífera de Los Llanos Orientales es la que genera la mayor producción de hidrocarburos a nivel nacional y se sobrepone con la macrocuenca hidrográfica del Orinoco.

A continuación, con base en información obtenida en la plataforma de libre consulta: Sistema de Información Ambiental para Colombia –SIAC (MADS, 2015), específicamente a partir de la información sobre licencias por parte de la autoridad ambiental: Agencia Nacional de Licencias Ambientales –ANLA, en la Figura 2 se identifican las áreas otorgadas, donde se evidencia que efectivamente la macrocuenca del Orinoco contempla la mayor cantidad de áreas, con 296 bloques de hidrocarburos que abarcan el 75% de su extensión, las cuales se distribuyen en (4D Elements Consultores , 2013):

- Áreas en exploración: 136 bloques
- Áreas disponibles: 80 bloques
- Áreas en producción: 69 bloques
- Áreas en exploración técnica (TEA): 9 bloques

- Áreas reservadas: 2 bloques

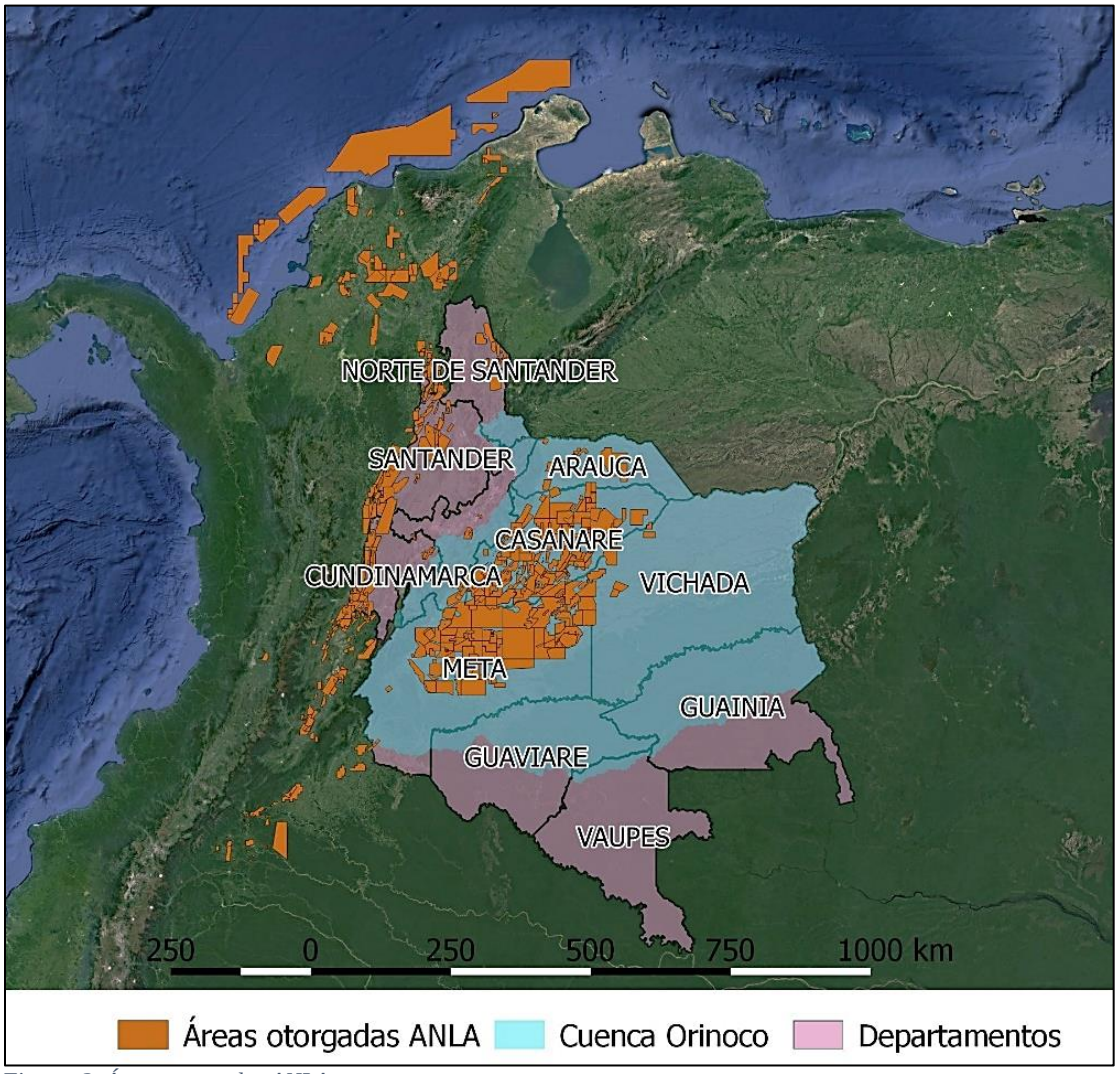

Figura 2. Áreas otorgadas ANLA
Fuente: Elaboración propia con base en la información SIAC (2015)

Así mismo, en la consulta del SIAC (MADS, 2015) se reportan los pozos otorgados a nivel nacional, de conformidad con las licencias del ANLA, que en la macrocuenca del Orinoco se localizan en tres departamentos: Arauca, Casanare y Meta, según como se observa en la Figura 3 a continuación:

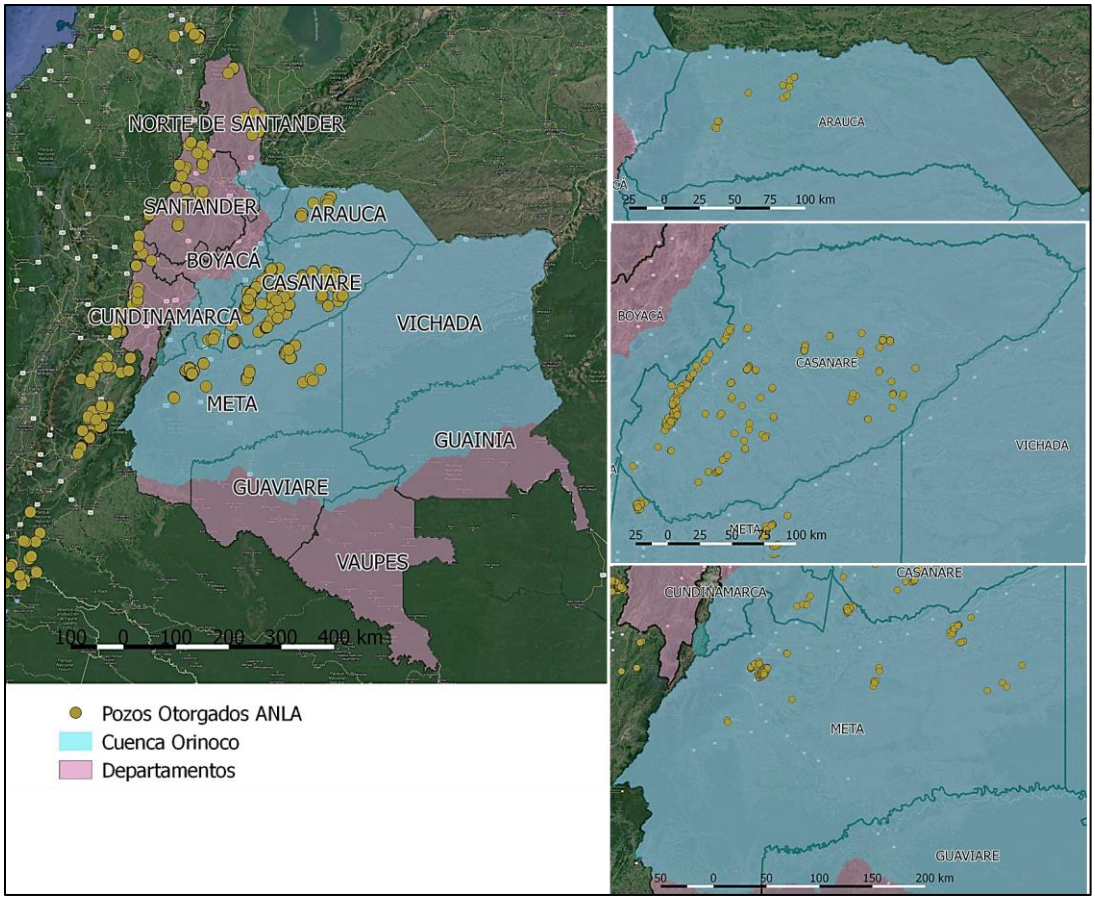

Figura 3. Pozos otorgados ANLA
Fuente: Elaboración propia con base en la información SIAC (2015)

En cuanto a permisos de vertimientos otorgados por el MAVDT (hoy conocido como MADS) y el ANLA, a continuación en la Figura 4, se referencias los puntos autorizados:

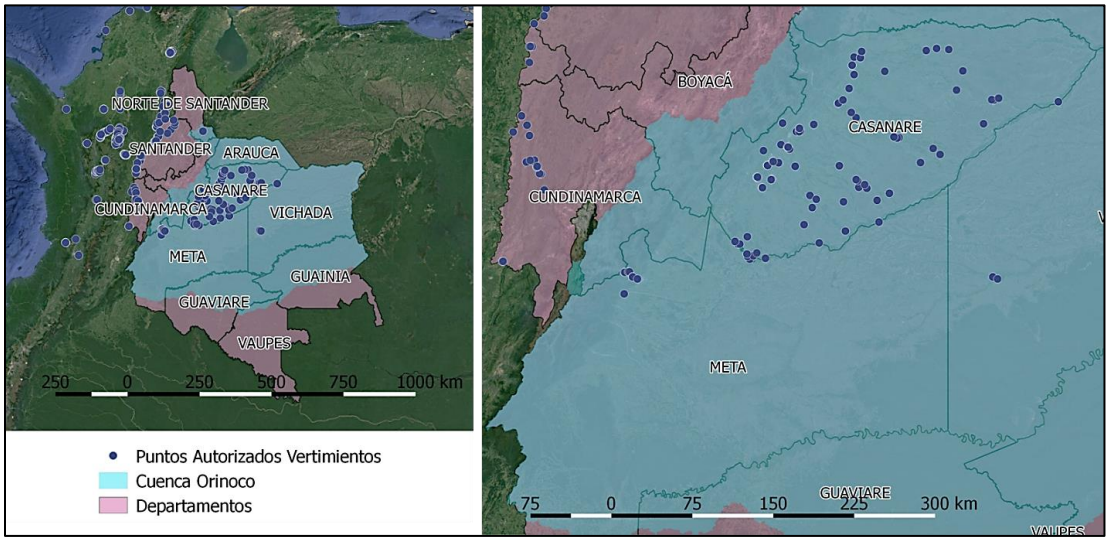

Figura 4. Puntos autorizados para vertimientos
Fuente: Elaboración propia con base en la información SIAC (2015)

De conformidad con la figura anterior, los departamentos de Casanare y el Meta son los de mayor interés para el presente estudio, teniendo en cuenta que son las regiones donde pueden presentarse mayores afectaciones sobre el componente hídrico, por su gran influencia de actividades petroleras, así como por contemplar los mayores puntos de vertimientos.

De igual forma, la relevancia de estos dos departamentos mencionados no solo está dada por contener la mayoría de pozos otorgados y puntos de vertimientos autorizados, sino porque juntos representan la mayor producción petrolera del país con 4,4 millones de m^3/año, lo que corresponde al 66,6% de la producción total nacional, siendo Meta el responsable del 48,9% y el Casanare con el 17,7% (MADS & IDEAM, 2015)

En el capítulo a continuación se identifican las zonas de la macrocuenca relevantes para el presente estudio y se describen las características significativas sobre las áreas hidrológicas, así como la ictiofauna asociada y sus relaciones ecológicas.

7 Capítulo 1: Identificar las zonas de la macrocuenca hidrológica de la región de la Orinoquía colombiana, que presenten algún tipo de interacción con las aguas de producción de la industria petrolera.

Para identificar las zonas de la macrocuenca que presenten algún tipo de interacción con las aguas de producción de la industria petrolera, es indispensable determinar en qué áreas se localizan los vertimientos, así como las características relevantes de las áreas hidrológicas que tengan algún tipo de relación con las aguas residuales.

Lo anterior se plantea con el propósito de analizar el caudal aportado de aguas residuales industriales asociadas a la explotación de hidrocarburos en la macrocuenca del Orinoco y su potencial impacto sobre la ictiofauna, en las áreas que se consideren representativas.

En virtud de la información disponible en la plataforma de libre consulta SIAC, referenciada en el numeral anterior (ver numeral 6: Área de Estudio), en la macrocuenca de la Orinoquía se reportan 36 puntos de vertimientos autorizados, los cuales se referencian en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1: Proyectos asociados a los puntos autorizados para vertimientos

PROYECTOS CON PUNTOS DE VERTIMIENTOS AUTORIZADOS I	
1	Área de Perforación Exploratoria Llanos 40
2	Área de Perforación Exploratoria Clarinero
3	Campo Entrerrios
4	Bloque Corocora A2
5	Área de Perforación Exploratoria Pajarillo
6	Gasoducto Gibraltar
7	Bloque de Perforación Exploratoria Cravoviejo
8	Bloque de Perforación Exploratoria Llanos 16
9	Área de Perforación Exploratoria Bloque Llanos 9
10	Área de Perforación Exploratoria Merecuré
11	Construcción nueva calzada de la Carretera Bogotá-Villavicencio, Tramo Chirajara-Bijagua
12	Bloque de Perforación Exploratoria Cabrestero
13	Área de Perforación Exploratoria Bloque Luna Llena
14	Explotación de Hidrocarburos Bloque Cachicamo
15	Bloque Exploratorio Salgar
16	Exploración de los Campos Careto y Arauco
17	Área de Perforación Exploratoria Bloque El Portón
18	Perforación Exploratoria Bloque San Antonio
19	Explotación y Desarrollo Campo Canacabare

PROYECTOS CON PUNTOS DE VERTIMIENTOS AUTORIZADOS II	
20	Bloque de Perforación Exploratoria Jagüeyes A- Sector
21	Bloque de Perforación Exploratoria Llanos 20
22	Campo Rancho Hermoso
23	Construcción y Operación Oleoducto Araguaney-
24	Construcción nueva calzada de la carretera Bogotá-Villavicencio, Tramo Bijagual Fundadores
25	Área de Interés de Perforación Exploratoria Tambaquí
26	Área de Explotación La Cuerva
27	Construcción y operación Oleoducto El Morro-
28	Bloque de Perforación Exploratoria Llanos 230
29	Área de Perforación Exploratoria Mapache
30	Construcción nueva calzada de la carretera Bogotá-Villavicencio, Tramo Bijagual-Fundadores
31	Bloque de Perforación Exploratoria CPO-1
32	Área de Perforación Exploratoria Altamira B
33	Estación de Bombeo y Oleoducto Carmentea - Estación Araguaney y Conexiones - CPF Cusiana
34	Bloque de Perforación Exploratoria El Edén
35	Área de Interés de Perforación Exploratoria Corcel
36	Campo de Producción Rubiales

Proyectos de explotación y producción de hidrocarburos, que generan aguas de producción dentro de su proceso
Proyectos de exploración, transporte y/o almacenamiento, no relacionados con la generación de aguas de producción
Proyectos que no corresponden al sector Hidrocarburos

Nota: Elaboración propia con base en la información SIAC (2015)

Como se evidencia previamente, de los 36 puntos de vertimientos autorizados, solo siete proyectos corresponden a actividades upstream específicas en desarrollo y producción de hidrocarburos, mientras que 26 son proyectos del sector de la fase upstream dedicada exclusivamente a exploración y fase midstream enfocada al transporte y almacenamiento, los cuales no generan aguas de producción; así como tres proyectos que no corresponden al sector.

Para determinar las zonas de estudio puntuales, se realizó una revisión directamente en el ANLA sobre los expedientes y licencias de los puntos de vertimientos sobre los ocho proyectos pertinentes:

1. Campo Entrerríos
2. Bloque Corocora A2
3. Explotación de Hidrocarburos Bloque Cachicamo

4. Explotación y Desarrollo Campo Canacabare
5. Campo Rancho Hermoso
6. Área de Explotación La Cuerva
7. Campo de Producción Rubiales

De acuerdo con los expedientes y los informes de cumplimiento ambiental – ICA asociados a cada proyecto en mención, se identificó que los proyectos Bloque Corocora, Bloque Cachicamo, Campo Canacabare, Campo Rancho Hermoso y La Cuerva; no realizan vertimientos en la actualidad, o no pretenden realizarlos a futuro, caso contrario del Campo Entrerríos.

Lo anterior se presenta debido a que los responsables de la gestión de las aguas de producción, han optado por realizar procedimientos de reinyección de las aguas al proceso productivo y/o hacer entrega de las mismas a un tercero para su tratamiento y disposición final, sin generar los vertimientos directos sobre el cuerpo de agua.

Según lo anterior, sólo se identificaron dos cuerpos hídricos relevantes para el presente análisis, como casos de estudio por vertimientos recientes y periódicos:

1. Río Charte:
   - Tributario del Río Cusiana que pertenece a la Subzona Hidrográfica –SZH denominada Río Cusiana, localizada en el departamento de Casanare.
   - Se reportaron vertimientos autorizados correspondientes a las actividades de producción del Campo Entrerríos.

2. Caño Rubiales:

   - Tributario del Río Tivallá que pertenece a la Subzona Hidrográfica –SZH denominada Alto Vichada, donde su mayor extensión está localizada en el departamento del Meta.
   - Se reportaron vertimientos autorizados correspondientes a las actividades de producción del Campo Rubiales.

A continuación, se describen las características más relevantes en cuanto a las áreas hidrográficas y sus distintos niveles asociadas a los cuerpos hídricos determinados.

7.1 Características de las áreas hidrográficas identificadas

El área hidrográfica o macrocuenca de la Orinoquía está representada principalmente por cuerpos lóticos con corrientes que nacen en la cordillera Oriental como parte de los departamentos de Boyacá, Meta y Cundinamarca, y en su recorrido atraviesan los llanos orientales hasta desembocar en el Río Orinoco sobre el límite político-administrativo con Venezuela, a través de grandes caudales de los siguientes sistemas hídricos: Meta, Guaviare, Inírida, Arauca, Vichada, Guayabero y Upía (IDEAM, 2015)

El régimen hidrológico en toda la macrocuenca es de tipo monomodal, con caudales mínimos en los primeros meses del año entre enero y marzo, mientras que los caudales máximos ocurren entre junio y agosto (IDEAM, 2015).

El Río Cusiana y el Alto Vichada son las Sub Zonas Hidrográficas determinadas para el presente estudio, en las cuales se localizan el Río Charte y El Caño Rubiales respectivamente, según como se observa en la Figura 5 a continuación:

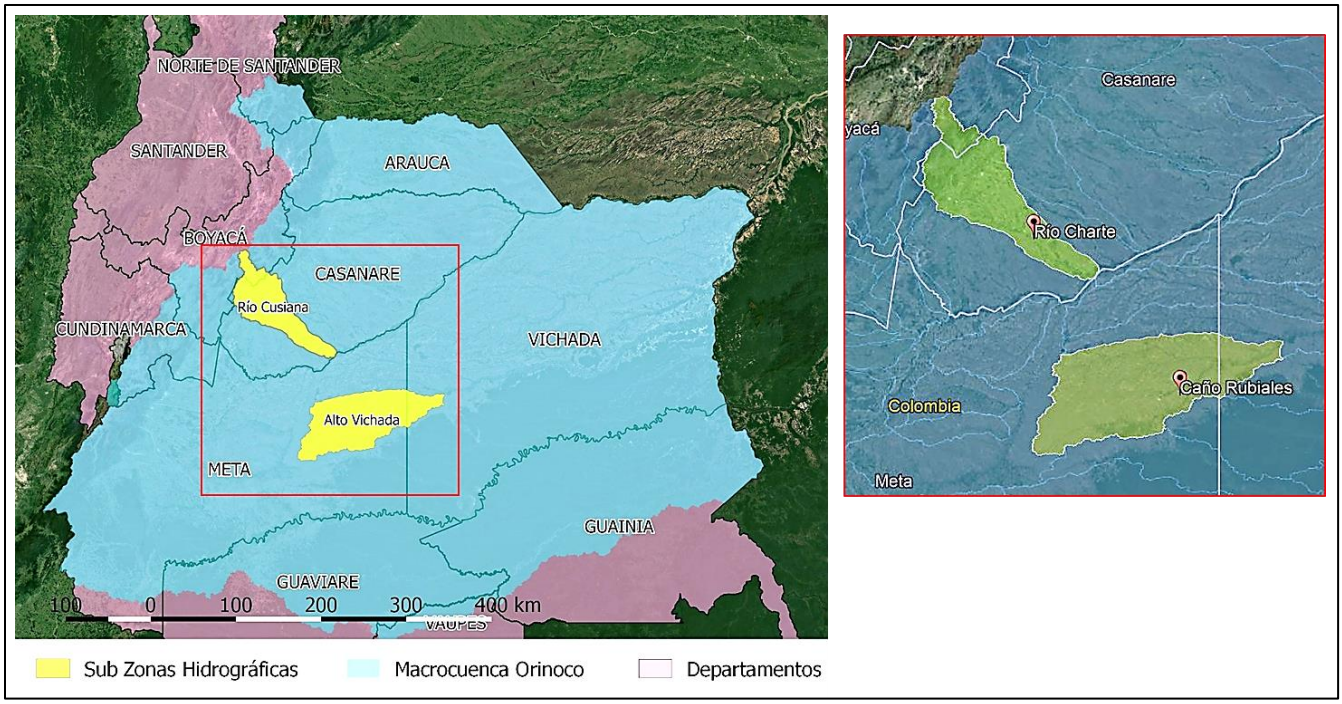

Figura 5. Sub Zonas Hidrográficas identificadas
Fuente: Elaboración propia con QGIS y Google Earth.

Por otra parte, las Sub Zonas Hidrográficas, comprenden a su vez subcuencas que hacen parte de las cuencas principales, también denominadas como cuencas de primer orden, que conforman la macrocuenca de la Orinoquía.

Para el presente estudio, los dos casos de estudio mencionados: Río Charte afluente del Río Cusiana y el Caño Rubiales afluente del Río Tivallá, se localizan dentro de las cuencas de primer orden del Río Meta y el Río Vichada respectivamente, como se evidencia en la Figura 6 a continuación:

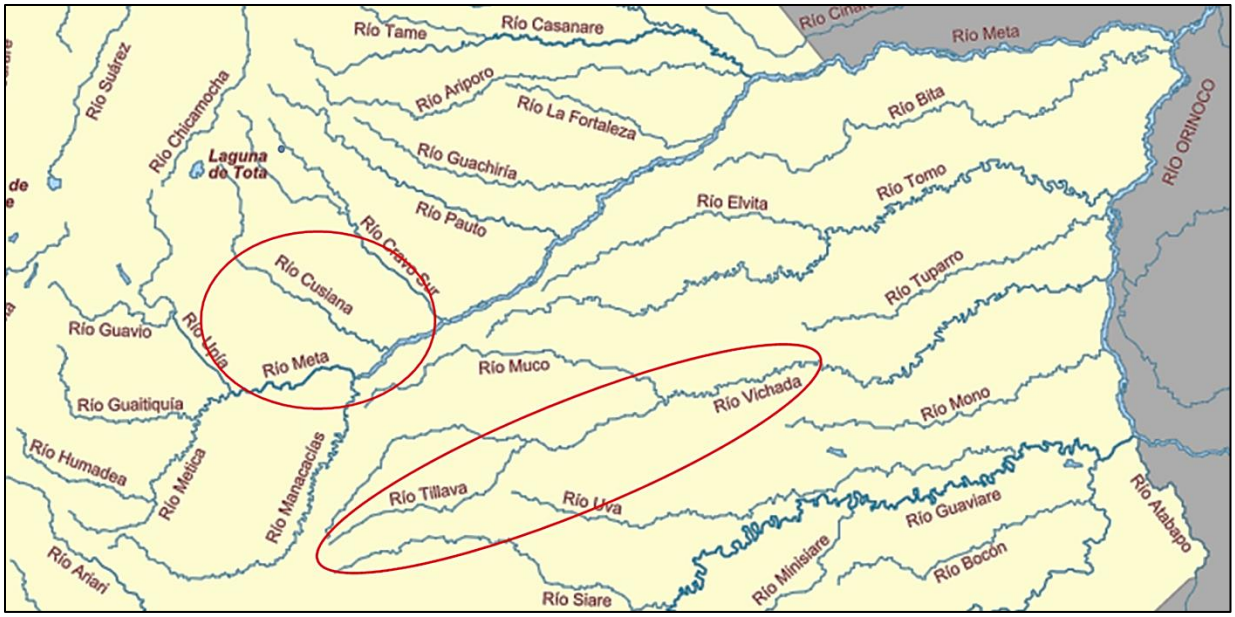

Figura 6. Afluentes de las Cuencas principales Río Meta y Río Vichada
Fuente: Imagen adaptada de "Mapa de Colombia (ríos)" (Shadowxfox, 2009).

El Río Meta y el Río Vichada representan dos de las seis principales cuencas tributarias de la macrocuenca del Orinoco, que a su vez se clasifican dentro de los once ríos de Colombia con caudales superiores a 1000 m^3/s; en el cual el rendimiento hídrico (cantidad de agua que fluye por unidad de área), según los caudales medios obtenidos a través del método de balance hidrológico de largo plazo para cada cuenca es (Correa, Ruiz, & Arévalo, 2005):

1. Cuenca Río Meta:

Precipitación (mm)	**Evapotranspiración (mm)**	**Área (m^2)**	**Q medio (m^3/s)**
2.479	1.416	114.791	3.868,9

2. Cuenca Río Vichada:

Precipitación (mm)	**Evapotranspiración (mm)**	**Área (m^2)**	**Q medio (m^3/s)**
2.548	1.591	33.174	1.006,7

Con el objeto de analizar el caudal aportado de aguas residuales industriales asociadas a la explotación de hidrocarburos en la macrocuenca del Orinoco y su potencial impacto sobre la ictiofauna, en el siguiente numeral se presenta el análisis de los dos puntos de vertimientos, de los cuerpos lóticos tributarios de la Cuenca Río Meta y Cuenca Río Vichada.

7.2 Análisis de los vertimientos de los estudios de caso

Para la Cuenca del Río Meta se analizó el vertimiento del Campo Entrerríos sobre el río Charte del año 2014, teniendo en cuenta que a partir de dicho periodo se suspendió la descarga directa de vertimientos, previamente tratados sobre la corriente hídrica mencionada (Petróleos Sudamericanos Energy, 2016).

En la Tabla 2 se presenta el análisis de caudales respecto al volumen de aguas de producción generadas, volumen de agua vertida y caudal del cuerpo de agua receptor de la descarga aguas arriba del vertimiento.

Tabla 2. Relación de caudales de vertimiento Campo Entrerríos

Fecha	Caudal de Aguas residuales generadas (m3/mes)	Caudal de vertimiento (m3/mes)	Relación de caudal vertido	Caudal del cuerpo de agua aguas arriba(m3/mes)	Relación de caudales vertido / cuerpo de agua
ene-14	632169	5735	0,91%	11324275,2	0,051%
feb-14	56509,963	0	0%	4574707,2	0%
mar-14	67677,873	0	0%	7017408	0%
abr-14	102333,68	0	0%	15938208	0%
may-14	110648,08	14025,91	12,68%	61699622,4	0,023%
jun-14	125646,2	22060	17,56%	90720000	0,024%
jul-14	103151,66	28282,98	27,42%	118787040	0,024%
ago-14	72350,35	0	0%	116001504	0%
sep-14	79712,017	0	0%	No reportó	No determinado
oct-14	78868,582	0	0%	146240640	0%
nov-14	67708,043	0	0%	27112320	0%
dic-14	81966,32	0	0%	9856512	0%

Nota: elaboración propia con base en el ICA (Petróleos Sudamericanos Energy, 2016).

De acuerdo con la tabla anterior, se observa que el porcentaje máximo de vertimiento descargado directamente sobre el Río Charte corresponde al 27,42% del total de las aguas de producción generadas y que con relación al valor del caudal del cuerpo de agua, corresponde al 0,024%. El 72,58% del vertimiento restante se reincorporó al proceso productivo por medio de reinyección.

Así mismo, se evidenció que el valor más alto del caudal descargado se presentó en el mes de enero (2014), el cual corresponde al 0,051% del caudal natural del cuerpo de agua en época seca. Esto significa que el vertimiento no genera un impacto importante ya que el valor del caudal del vertimiento es muy bajo, por lo tanto no modificaría el volumen originario del cuerpo de agua en el punto de descarga, y sus componentes se diluirían de manera natural sin alterar la calidad en cuanto a los parámetros del río, teniendo en cuenta que la descarga es puntual sobre un volumen específico y no de tipo continua.

En el caso hipotético que el vertimiento correspondiera al 100% de las aguas de producción generadas, la relación respecto al caudal que reporta el Río Charte sería del 5,58% en el mes de enero (2014), valor que tampoco se espera sea significativo en cuanto a las afectaciones que pudiesen generarse asociadas a la descarga sobre este cuerpo de agua.

Para la Cuenca del Río Vichada, se analizó el vertimiento del Campo Rubiales, a partir de la información de cinco puntos autorizados por el ANLA sobre el Caño Rubiales (afluente del río Tillavá).

En la Tabla 3 se presenta el análisis de caudales respecto al volumen de aguas de producción vertidas y el caudal del cuerpo de agua receptor de la descarga aguas arriba del vertimiento.

Tabla 3. Relación de caudales de vertimiento Campo Rubiales

Fecha	Caudal de vertimiento (m^3/mes)	Caudal del cuerpo de agua aguas arriba (m^3/mes)	Relación de caudales vertido / cuerpo de agua
ene-14	1.450.996	6.026.400	24%
feb-14	1.460.853	No reportado	No determinado
mar-14	550.358	No reportado	No determinado
abr-14	614.854	1.736.640	35%
may-14	1.399.116	67.254.624	2%
jun-14	1.430.641	65.655.360	2%
jul-14	1.301.917	No reportado	No determinado
ago-14	660.172	110.858.976	1%
sep-14	982.196	No reportado	No determinado
oct-14	1.156.721	29.274.912	4%
nov-14	1.167.407	37.195.200	3%
dic-14	1.162.854	23.141.376	5%

Nota: elaboración propia con base en el ICA (Pacific Rubiales Energy, 2014)

Según la tabla anterior, se observa que el valor máximo del vertimiento se da en el mes de abril (2014) y es del 35,405% con relación al caudal natural del cuerpo hídrico. Este valor responde al rendimiento hídrico del caño, que al ser una corriente de menor dimensión que un río de mayor orden hidrológico, presenta un caudal más escaso, por lo tanto puede verse mayormente afectado que otros cuerpos hídricos de la región.

A continuación, se describen las características principales de la ictiofauna representativas de la región y sus dinámicas poblacionales principales.

La calidad de agua de los vertimientos de acuerdo con los parámetros establecidos en la legislación vigente y para los dos estudios de caso en mención (Entrerrios y Rubiales), será explicada en detalle como parte del análisis de las agua de producción en el Capítulo N° 2 (ver numeral 8.3: Parámetros físico-químicos de las aguas de producción de los casos de estudio).

7.3 Características de la ictiofauna representativa y las relaciones ecológicas

En términos generales a nivel de ictiofauna, la Orinoquía colombiana es la segunda región con mayor riqueza de peces en Colombia con 658 especies (46% de las especies

dulceacuícolas registradas), de las cuales 56 son endémicas y presentan patrones de distribución restringidos a subcuencas y en algunos casos a cabeceras de afluentes (Machado-Allison , Lasso, Usma, Sánchez-Duarte, & Lasso-Alcalá, 2010). A nivel general, la mayoría de especies reportadas, se encuentran en tres grandes órdenes: Characiformes, Siluriformes, and Perciformes (Rodríguez, Winemiller, Lewis Jr., & Taphorn Baechle, 2007).

La cuenca del río Meta contempla con mayor número de especies los órdenes Characiformes con 263 especies reportadas y Siluriformes 202 especies (Usma Oviedo & Trujillo González, 2011).

Las especies más abundantes de los Siluriformes son: *Pseudoplatystoma orinocoense*, *Pseudoplatystoma metaense*, *Zungaro zungaro*, *Brachyplatystoma rousseauxii*, *Calophysus macropterus*, *Phractocephalus hemiliopterus* y *Brachyplatystoma platynemum*; y de los Characiformes: *Prochilodus Marie*, *Mylossoma duriventre* y *Piaractus brachypomus* (Ramírez-Gil & Ajiaco-Martínez, 2011).

Así mismo, la ictiofauna abarca una gran variedad de nichos ecológicos, que se pueden agrupar en dos divisiones biogeográficas principales, asociadas a dos tipos distintos de aguas (Rodríguez, Winemiller, Lewis Jr., & Taphorn Baechle, 2007):

- Aguas blancas ricas en nutrientes concentrados, que se ubica en la parte norte de la cuenca, como el río Meta, cuyo origen es en la cordillera de los Andes.
- Aguas negras con baja productividad y biomasa, pero relativamente alta en diversidad de peces, que se ubica en la parte sur de la cuenca.

Los ríos de aguas blancas presentan este color tipo turbio por que transportan una gran cantidad de sedimentos inorgánicos desde el relieve montañoso de los Andes hasta la llanura, se caracterizan por presentar pH cercano al neutro (6,2-7,2) y porque contienen una gran cantidad

de nutrientes y electrolitos que resulta en una alta conductividad (Rosales, Suárez, & Lasso, 2010). Por otro parte, los ríos de aguas negras denominados de esta forma por la gran cantidad de materia orgánica que transporta, se caracterizan por presentan un pH ácido, baja conductividad y tienen su origen en la Orinoquia guayanésa o en las penillanuras (Rosales, Suárez, & Lasso, 2010).

En términos generales, los Siluriformes y Characiformes de la macrocuenca del Orinoco, se encuentran distribuidos principalmente en áreas inundadas (esteros y lagunas), que hacen parte de las rondas de los ríos de primer orden de la macrocuenca, de los dos tipos de aguas mencionadas previamente, así como en pequeños caños que tributan estos ríos (Waldron, Vieira-Muñoz, Díaz-Timoté, & Urbano-Bonilla, 2016).

De igual forma, ese tipo de características de la región inciden en los comportamientos de reproducción de la ictiofauna, ya que promueven las migraciones a largas distancias, especialmente en especies de Siluriformes del genero Pseudoplatystoma y Zungo, para ríos principales durante los períodos de aguas altas y desovar en las áreas cercanas al piedemonte; mientras que las poblaciones de Characiformes y otros Siluriformes, utilizan los caños y áreas inundables como áreas de desove (Usma, y otros, 2009). Durante las épocas secas, se presentan la maduración de las gónadas, lo que permite la reproducción al inicio de la temporada de lluvias y posteriormente, el desove se da generalmente en el canal principal del río, donde los huevos o larvas son arrastrados hacia las riberas, caños y áreas inundables (Machado-Allison, 2005).

La importancia de las condiciones del medio acuático, está dada por la resiliencia de los organismos a los medios cambiantes, lo que asegura la supervivencia de la ictiofauna. Sin embargo, los cambios repentinos y/o abruptos de algunas propiedades (físicas y/o químicas),

pueden generar un estrés considerable en cuanto a los mecanismos homeostáticos de las especies, ya que desencadenan respuestas metabólicas para compensar fisiológicamente los cambios externos (Espina & Vanegas, 2005). Si el estrés es demasiado severo, las respuestas metabólicas no serán suficientes y se verá reflejado en el aumento de sensibilidad de una especie frente a patógenos y en casos más extremos, se manifestará con la disminución del éxito reproductivo y la reducción global de la población por muerte (Espina & Vanegas, 2005).

En el capítulo a continuación, se realizará una descripción detallada sobre los efectos del agua producida y las afectaciones potenciales sobre la ictiofauna, así como el análisis de los parámetros físico-químicos de los casos de estudio de la presente monografía y su real carga contaminante aportada.

8 Capítulo 2: Determinar las afectaciones potenciales sobre la ictiofauna representativa de las zonas identificadas en la cuenca hidrológica de la Orinoquía colombiana, de acuerdo con las características físico-químicas de las aguas de producción.

El agua de producción es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos y su composición depende de las características de cada pozo en cuanto a la ubicación geográfica del terreno, su formación geológica, la vida útil del yacimiento y el tipo de producto de hidrocarburos que se producen (Forero, Echaverría, & Cardeñosa, 2017).

Para determinar si existen o no afectaciones potenciales sobre la ictiofauna, como primera medida se describieron las generalidades sobre las aguas de producción y de la macrocuenca de la Orinoquía, seguido de las propiedades particulares de los yacimientos en los Llanos Orientales, así como los parámetros fisicoquímicos de los casos de estudio; para finalizar con las posibles afectaciones según las condiciones de los vertimientos y en general hacia la ictiofauna por esta actividad.

8.1 Características generales de las aguas de producción

En términos generales, los compuestos orgánicos del petroleó corresponden a hidrocarburos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, naftaleno, fenantreno, dibenzotiofeno, hidrocarburos poliaromáticos y fenoles. A nivel específico, la mezcla y cantidades de estos componentes en el agua de producción depende de (Jiménez, Micó, Arnaldos, Medina, & Contreras, 2017):

- Composición del petróleo
- pH, salinidad, sólidos disueltos totales (TDS), temperatura
- Relación petróleo / agua

- Tipo y cantidad de productos químicos en yacimientos petrolíferos
- Tipo y cantidad de diversos compuestos estabilizantes (ceras, asfaltenos, sólidos finos)

La mayoría de los hidrocarburos no se disuelven en el agua, por lo que el crudo se dispersa en agua como una emulsión, o se separa en dos fases claramente identificables (Jiménez, Micó, Arnaldos, Medina, & Contreras, 2017).

Los compuestos inorgánicos son sales disueltas, metales pesados y materiales radiactivos naturales, que dependen de las características geoquímicas de cada pozo y en términos generales se identifican los siguientes (Jiménez, Micó, Arnaldos, Medina, & Contreras, 2017):

- Cationes: Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Ba^{2+}, Sr^{2+}, Fe^{2+}
- Aniones: Cl^{-}, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^{-}
- Metales pesados: cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, plata y zinc
- Materiales radiactivos naturales: radio (isótopos Ra-226 y Ra-228) y bario

El agua de producción también puede contener trazas de productos químicos no naturales de tipo aditivos (de uso en los equipos o residuales del proceso de perforación) como: inhibidores de corrosión, inhibidores de incrustaciones (para los depósitos minerales), biocidas, desmulsificantes, coagulantes, floculantes y clarificadores para eliminar sólidos, así como disolventes para la parafina (Veil, Puder, Elcock, & Redweik, 2004).

En la Tabla 4 a continuación, se resumen los componentes del agua producida en diferentes yacimientos petrolíferos del mundo y contempla rangos de valores de cada componente.

Tabla 4. Componentes y rango de valores del agua producida

Summary of oilfield-produced water parameters in world [136].

Parameter	Values	Heavy metal	Values (mg/L)
Density (kg/m^3)	1014–1140	Calcium	13–25800
Surface Tension (dynes/cm)	43–78	Sodium	132–97000
TOC (mg/L)	0–1500	Potassium	24–4300
COD (mg/L)	1220	Magnesium	8–6000
TSS (mg/L)	1.2–1000	Iron	<0.1–100
pH	4.3–10	Aluminum	310–410
Total oil (IR; mg/L)	2–565	Boron	5–95
Volatile (BTX; mg/L)	0.39–35	Barium	1.3–650
Base/neutrals (mg/L)	<140	Cadmium[a]	<0.005–0.2
(Total non-volatile oil and grease by GLC/MS) base (μg/L)	275	Chromium	0.02–1.1
Chloride (mg/L)	80–200,000	Copper	<0.002–1.5
Bicarbonate (mg/L)	77–3990	Lithium	3–50
Sulfate (mg/L)	<2–1650	Manganese	<0.004–175
Ammoniacal nitrogen (mg/L)	10–300	Lead[a]	0.002–8.8
Sulfite (mg/L)	10	Strontium	0.02–1000
Total polar (mg/L)	9.7–600	Titanium	<0.01–0.7
Higher acids (mg/L)	<1–63	Zinc[a]	0.01–35
Phenols (mg/L)	0.009–23	Arsenic[a]	<0.005–0.3
VFA's (volatile fatty acids) (mg/L)	2–4900	Mercury	<0.001–0.002
		Silver[a,b]	<0.001–0.15
		Beryllium	<0.001–0.004

[a] Analyzed by atomic absorption.
[b] Value should be regarded as a minimum due to poor solubilities.

Nota: tomado de "Review of technologies for oil and gas produced water treatment" (Razi Ahmaduna, y otros, 2009).

Con base en la tabla anterior, se puede apreciar que el rango de las concentraciones de los diferentes compuestos que pueden ser contaminantes al ser vertidos en un cuerpo de agua superficial, es variable; por lo cual el inadecuado manejo de las aguas de producción puede generan importantes afectaciones ambientales por su gran volumen generado, que solo en EE.UU. contempla alrededor de 15 a 20 mil millones de barriles anuales (Christie, 2012).

Aun así, las afectaciones dependerán de los parámetros físico-químicos de los vertimientos, que a su vez varían en su composición específica dependiendo de la región y los procesos industriales.

A continuación, se describen las propiedades la Cuenca petrolífera de los Llanos Orientales para Casanare y Meta, que confieren características propias a las aguas de producción generadas en la región.

8.2 Propiedades de la Cuenca Petrolífera de los Llanos Orientales

En virtud que la composición particular de las aguas de producción depende de las características geológicas de cada yacimiento, a continuación, se describen las formaciones

principales de la cuenca petrolífera de los Llanos Orientales, conformadas por rocas del Terciario y Cuaternario, con base en el documento "*Cuenca Llanos Orientales. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos*" (ANH, 2012).

La Formación Barco – Los Cuervos generada durante el Terciario Temprano, específicamente en el sector de Cansare, está conformado por depósitos continentales, que en la formación Barco corresponde a areniscas masivas pobremente clasificadas en la base; mientras que la formación Los Cuervos son areniscas suprayacidas por lutitas de color gris y gris verdoso, con intercalaciones locales de algunas capas delgadas de carbón y delgadas intercalaciones. Los espesores de estas formaciones aumentan regular y rápidamente hacia el Occidente, y superan los 1.000 pies en los primeros corrimientos de la cordillera.

La Formación Mirador hace parte del reservorio más importante de la cuenca y se caracteriza por areniscas masivas con diferentes granulometrías, generalmente granodecrecientes de base a techo, compuestas por cuarzo, algunas veces feldespato, materia orgánica leñosa y glauconita, hacia la parte superior de la secuencia. El espesor de esta formación aumenta hacia el Occidente, hasta alcanzar 950 pies.

La Formación Carbonera está ampliamente distribuida por la cuenca, y está conformada por depósitos transgresivos y regresivos de corta duración de un mar epicontinental. El sector del Casanare, se representa por una alternancia de rocas arcillosas, limosas y de arenisca, a veces con niveles de carbón. Esta formación se encuentra dividida, según Elf Aquitaine, en ocho unidades operacionales (denominadas C y el número de la unidad correspondiente) de la siguiente forma: los niveles pares son transgresivos, fino granulares e importantes sellos regionales, mientras que los niveles impares son regresivos, arenosos y desde el C7 al C3 son productores de hidrocarburos

A continuación, se realiza el análisis de calidad de aguas de vertimiento para los estudios de caso determinados en la presente monografía.

8.3 Parámetros físico-químicos de las aguas de producción de los casos de estudio

Para el análisis de la calidad hídrica de los efluentes reportados en los ICA (Petróleos Sudamericanos Energy, 2016 & Pacific Rubiales Energy, 2014) para los dos casos de estudio del Campo Entrerríos y Campo Rubiales, se tomó como referencia la Resolución 631 de 2015, que cita "*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*". Dicha resolución establece los parámetros límites máximos permisibles en cuanto a los vertimientos puntuales sobre las distintas aguas residuales, que deben ser de obligatorio cumplimiento para todos los generadores.

Para los dos casos de estudio, se analizaron las características de sus efluentes, respecto a su caracterización desde la generación de las aguas de producción, así como en su descarga (posterior a su tratamiento en superficie), versus la normativa vigente, como se puede observar a continuación en la Tabla 5.

Para las dos tablas mencionadas, se resaltan en rojo aquellos valores medidos que superan los límites permitidos establecidos en la legislación vigente.

Tabla 5. Parámetros físico-químicos estudios de caso

Parámetro	Unidad	Formación	Previo a vertimiento (Enterríos)	Previo a vertimiento (Rubiales)	Límité resolución 631 de 2015)
temperatura	°C	26,2	30,6	32,8	40
pH	unidades	6,43	7,52	8,19	6 a 9
conductividad	us/cm	5270	1846	1379	no definido
oxígeno disuelto	mg/L	3,73	1,04	6,72	no definido
salinidad	mg/L	2900	no medido	no medido	no definido

Parámetro	Unidad	Formación	Previo a vertimiento (Enterríos)	Previo a vertimiento (Rubiales)	Límité resolución 631 de 2015)
resistividad	ohm.m	1,9	no medido	no medido	no definido
densidad	g/mL	0,999	no medido	no medido	no definido
dióxido de carbono	mg/L	<10	no medido	no medido	no definido
hidróxido total	mg/L	<1	no medido	no medido	no definido
ácido sulfhídrico	mg/L	<0,1	no medido	no medido	no definido
alcalinidad	mg/L	302	63,73	no medido	no definido
dureza cálcica	mg/L	364	no medido	no medido	no definido
dureza magnésica	mg/L	141	no medido	no medido	no definido
dureza total	mg/L	505	98,8	no medido	no definido
bicarbonatos	mg/L	302	no medido	no medido	no definido
carbonatos	mg/L	<1	no medido	no medido	no definido
cloruros	mg/L	1830	409,87	no medido	1200
sulfatos	mg/L	<4	26,1	<5	300
sólidos disueltos	mg/L	2760	no medido	869,35	no definido
sólidos suspendidos	mg/L	98	28	3	50
sólidos totales	mg/L	2870	no medido	no medido	no definido
bario	mg/L	0,33	0,287	no medido	no definido
calcio	mg/L	140	8,2	no medido	no definido
estrocio	mg/L	1,91	no medido	no medido	no definido
hierro	mg/L	3,79	0,176	<0,073	3
magnesio	mg/L	37,3	2,62	no medido	no definido
potasio	mg/L	6,5	no medido	no medido	no definido
sodio	mg/L	384	no medido	no medido	no definido
silicio	mg/L	2240	no medido	no medido	no definido
DQO	mg/L	no medido	150	<20	180
DBO	mg/L	no medido	87	<5	60
sólidos sedimentables	mg/L	no medido	no medido	no medido	1
grasas y aceites	mg/L	no medido	0,97	<0,670	15
fenoles	mg/L	no medido	0,139	no medido	0,2
hidrocarburos totales	mg/L	no medido	0,81	<0,670	10
nitrógeno total	mg/L	no medido	no medido	no medido	10
cianuro total	mg/L	no medido	<0,002	no medido	1
sulfuros	mg/L	no medido	no medido	no medido	1
arsénico	mg/L	no medido	0,00032	<0,001	0,1
cadmio	mg/L	no medido	<0,09	no medido	0,1
cinc	mg/L	no medido	<0,033	<0,443	3
cobre	mg/L	no medido	<0,057	<0,055	1
cromo	mg/L	no medido	<0,0005	<0,01	0,5
mercurio	mg/L	no medido	<00021	<0,0023	0,01
niquel	mg/L	no medido	<0,064	<0,085	0,5

Parámetro	Unidad	Formación	Previo a vertimiento (Enterríos)	Previo a vertimiento (Rubiales)	Límité resolución 631 de 2015)
plomo	mg/L	no medido	<0,05	<0,052	0,2
selenio	mg/L	no medido	0,00015	<0,01	0,2
vanadio	mg/L	no medido	<0,36	<0,443	1
nitratos	mg/L	no medido	1,6024	0,9448	no definido
nitritos	mg/L	no medido	<0,003	0,0043	no definido
fosfatos	mg/L	no medido	0,03	<0,062	no definido
fluoruros	mg/L	no medido	no medido	6,21	no definido
aluminio	mg/L	no medido	no medido	<0,140	no definido
berilio	mg/L	no medido	no medido	<0,011	no definido
boro	mg/L	no medido	no medido	<0,137	no definido
cadmio	mg/L	no medido	no medido	<0,015	no definido
cobalto	mg/L	no medido	no medido	<0,048	no definido
litio	mg/L	no medido	no medido	<0,021	no definido
manganeso	mg/L	no medido	no medido	<0,079	no definido
molibdeno	mg/L	no medido	no medido	<0,05	no definido

Nota: elaboración propia con base en los ICA (Petróleos Sudamericanos Energy, 2016 & Pacific Rubiales Energy, 2014)

Se puede observar que de los 26 parámetros medidos en la generación de las aguas de producción (es decir antes de realizar algún tratamiento), tan solo seis tienen límites normativos (23%), de los cuales cuatro se encuentran por encima del valor permitido, es decir, incumplen la norma: cloruros, sólidos suspendidos, hierro y DBO.

En el monitoreo de verificación, posterior al tratamiento en superficie de las aguas residuales generadas (citado en las tablas como "*previo a vertimiento*" para los dos casos de estudio), todos los parámetros cumplen dentro del límite del valor establecido en la resolución, con lo cual se valida la eficiencia de los sistemas de tratamiento existentes en los Campos Entrerríos y Rubiales.

Respecto a los otros 19 parámetros restantes que establece la norma y que no son medidos en el punto de generación de las aguas de producción, generalmente ocurre cuando los efluentes no se generan como resultado del proceso de producción, sino como consecuencia del proceso de extracción de hidrocarburos en superficie.

En superficie, el campo Entrerríos mide 22 de los 25 parámetros que cuentan con limite normativo (88%), de los cuales tan solo uno de ellos se encuentra por fuera del rango admitido (DBO), debido a que las aguas residuales industriales son mezcladas en superficie con las aguas residuales domésticas.

Respecto al campo Rubiales, éste monitorea 18 de los 25 parámetros establecidos en la norma (72%) y todos se encuentran dentro de los límites permitidos.

Con base en la calidad fisicoquímica del vertimiento posterior a su tratamiento (Tabla 5), y los datos de las variables de caudal vertido y caudal del cuerpo de agua receptor del vertimiento (Tabla 3 y Tabla 2) para el mes de enero de 2014 (época seca en donde se tiene una de las mayores relaciones entre estas dos variables); a continuación, se presenta la determinación de la carga contaminante aportada por la descarga de las aguas de producción y la concentración de aumento de cada parámetro evaluado, hallada para aquellos contaminantes cuyo concentración es mayor al límite de detección, para ambos casos de estudio (Ver Tabla 6) .

La carga es relevante en cuanto a que expresa la masa de un compuesto que es transportado en una corriente hídrica, en un periodo de tiempo determinado y se calcula al multiplicar la concentración y el caudal (Ramírez Gonzalez & Viña Vizcaino, 1998).

Tabla 6. Determinación de carga contaminante y aumento de concentración real aportada por los vertimientos caso estudio Campo Entrerríos

Parámetro	Unidad	Previo a vertimiento (Enterríos)	Caudal vertido (m3/mes)	Carga contaminante aportada (Kg)	Caudal del cuerpo de agua receptor (m3/mes)	Concentración de aumento en el cuerpo de agua receptor (mg/L)
Alcalinidad	mg/L	63,73	5735	365,49155	11324275,2	0,03227505
dureza total	mg/L	98,8	5735	566,618	11324275,2	0,050035697
Cloruros	mg/L	409,87	5735	2350,60445	11324275,2	0,207572176
Sulfatos	mg/L	26,1	5735	149,6835	11324275,2	0,013217932
sólidos suspendidos	mg/L	28	5735	160,58	11324275,2	0,014180157
Bario	mg/L	0,287	5735	1,645945	11324275,2	0,000145347
Calcio	mg/L	8,2	5735	47,027	11324275,2	0,00415276
Hierro	mg/L	0,176	5735	1,00936	11324275,2	8,91324E-05

Parámetro	Unidad	Previo a vertimiento (Enterríos)	Caudal vertido (m3/mes)	Carga contaminante aportada (Kg)	Caudal del cuerpo de agua receptor (m3/mes)	Concentración de aumento en el cuerpo de agua receptor (mg/L)
Magnesio	mg/L	2,62	5735	15,0257	11324275,2	0,001326858
Fosfatos	mg/L	0,03	5735	0,17205	11324275,2	1,5193E-05

Campo Rubiales

Parámetro	Unidad	Previo a vertimiento (Rubiales)	Caudal vertido (m3/mes)	Carga contaminate aportada (Kg)	Caudal del cuerpo de agua receptor (m3/mes)	Concentración de aumento en el cuerpo de agua receptor (mg/L)
sólidos disueltos	mg/L	869,35	1450996,42	1261423,734	6026400	209,316297
sólidos suspendidos	mg/L	3	1450996,42	4352,989248	6026400	0,72232
Fluoruros	mg/L	6,21	1450996,42	9010,687743	6026400	1,4952024

Nota: elaboración propia con base en los ICA (Petróleos Sudamericanos Energy, 2016 & Pacific Rubiales Energy, 2014)

De acuerdo con la Tabla 6, se puede observar que para el caso del campo Entrerríos el mayor contaminante aportado serían los cloruros, cuya carga sería de 2350,604 Kg / mes, lo cual generaría un presunto aumento en la concentración de los cloruros en el río Charte de 0,204 mg/L, considerándose poco significativo (condición más crítica asociada con el vertimiento en la época seca).

Para el vertimiento del campo Rubiales, el parámetro de mayor interés corresponde a los sólidos disueltos, que al descargarse en el caño Rubiales a través de los cinco (5) puntos autorizados, aportarían una carga de 1261423,7 Kg/mes de este compuesto, con un aumento de la concentración del mismo, del orden de 209,3 mg/L.

Con base en lo anterior, se observa que la descarga de aguas residuales industriales en un cuerpo de agua como lo es el caño Rubiales (que no es de orden primario), tiene una mayor potencialidad de afectación a través del cambio de sus propiedades fisicoquímicas; tal es el caso de los sólidos disueltos evaluados.

A continuación, se realizará la descripción de las posibles afectaciones en la ictiofauna, de acuerdo con las características generales de las aguas de producción.

8.4 Descripción general de las posibles afectaciones en la ictiofauna

A nivel ambiental, la ictiofauna puede verse afectada por las aguas de producción, como consecuencia de la contaminación y toxicidad de los sistemas hídricos, que pueden causar efectos directos sobre la ictiofauna (letales o subletales) o por efectos indirectos a través de la perturbación de las relaciones ecológicas del ecosistema (por ejemplo incorporación de contaminantes que se transmiten a través de la cadena alimenticia) (IPIECA, 1997).

Los efectos letales son los que provocan la muerte de los organismos, principalmente por la toxicidad, o por efectos físicos del contaminante, mientras que los subletales se caracterizan por los efectos biológicos crónicos en términos de las dinámicas de una población, que afectan el comportamiento, crecimiento, fecundación, colonización y distribución de las especies (Monteiro, 2003).

En términos de impactos directos sobre los peces, las principales afectaciones se presentan en los mecanismos de adaptación intrínsecos de los organismos como la respiración, la osmoregulación y la regulación de sustancias tóxicas presentes en el medio (Svobodova, Lloyd, Machova, & Vykusova, 1993).

En cuanto a la respiración, los peces obtienen el oxígeno que necesitan para sus procesos metabólicos de acuerdo con la disponibilidad de oxígeno disuelto en el medio, por gradientes de difusión de contracorrientes, a través de un tamiz de laminillas paralelas compuestas por células epiteliales (branquias), que conforman una cavidad cóncava donde llega el flujo sanguíneo (en dirección opuesta al flujo de agua), lugar donde se realiza la absorción de oxígeno, y así mismo se produce la liberación de dióxido de carbono por el proceso inverso ((Svobodova, Lloyd, Machova, & Vykusova, 1993).

La osmoregulación es el mecanismo para mantener el equilibrio de las concentraciones del organismo por el proceso de osmosis, a través del flujo de líquidos y solutos entre el medio externo y el cuerpo (Svobodova, Lloyd, Machova, & Vykusova, 1993). Como generalmente la concentración interior es más alta que la de los sistemas de agua dulceacuícolas, los peces requieren de estrategias para evitar la excesiva pérdida de iones, como un epitelio superficial resistente, una cubierta de moco y una abundante descarga de orina para la liberación del exceso de agua, de la cual se ha reabsorbido la mayor cantidad de solutos necesarios a través de los riñones (Svobodova, Lloyd, Machova, & Vykusova, 1993).

La regulación de sustancias tóxicas, dependerá exclusivamente de los mecanismos intrínsecos asociados a los procesos bioquímicos que permitan que dichas sustancias puedan metabolizarse y desintoxicarse en el hígado y los residuos pueden excretarse en la orina o a través de la bilis en el intestino (Svobodova, Lloyd, Machova, & Vykusova, 1993). Aun así, este mecanismo es limitado si las concentraciones de dicha sustancia son muy altas o los tiempos de exposición a la misma son muy prolongados (Svobodova, Lloyd, Machova, & Vykusova, 1993)

Varios estudios en diversas especies acuáticas han demostrado que la exposición de la ictiofauna a los compuestos orgánicos de las aguas de producción, tiene una importante influencia en la generación de disrupciones endocrinas, que alteran los factores fisiológicos reproductivos ya que limitan el desarrollo gonadal, o desencadenan reacciones que inhiben la espermatogénesis y ovogénesis (Bakke , Klungsøyr, & Sanni, 2013).

Los efectos de los metales pesados en los organismos en general, se caracterizan por las perturbaciones que sufren una amplia variedad de sistemas enzimáticos en los compartimientos

intracelulares, las cuales han sido observadas en una gran variedad de casos estudiados, incluyendo a los organismos acuáticos (Páez Osuna, 2005).

Así mismo, los metales pesados pueden ocasionar desordenen del sistema nervioso que desencadenan reacciones violentas como por ejemplo espasmos o movimientos erráticos, así como del sistema respiratorio, por la adherencia de estas sustancias las estructuras del sistema o por la generación de moco que las recubre, que resulta en la afectación los procesos de absorción de oxígeno y expulsión de dióxido de carbono, que en casos críticos producen la muerte por asfixia (Svobodova, Lloyd, Machova, & Vykusova, 1993)

En términos de impactos indirectos, la composición del agua de producción le puede otorgar características tóxicas al sistema hídrico, ya que al entrar en contacto con el cuerpo de agua, sus componentes orgánicos reaccionan y consumen el oxígeno disuelto, limitando su disponibilidad para la ictiofauna, y así mismo aumenta la concentración de nutrientes, lo cual estimula el crecimiento excesivo de las plantas, dando como resultado una reducción en la calidad del agua, que repercute de manera directa en la reducción de la abundancia de las especies de peces y la alteración de sus dinámicas ecológicas (Okuthe, 2015).

Según lo anterior, se puede evaluar las afectaciones sobre ciclo hidrológico, en el cual convergen una gran variedad de factores bióticos y abióticos, tomando como fuente de afectación de la fase upstream del sector hidrocaburos, que interactúan con un determinado sistema hídrico y tiene un rol como motores de transformación (4D Elements Consultores , 2013).

De acuerdo con lo anterior, en el estudio realizado para la macrocuenca de la Orinoquía (4D Elements Consultores , 2013), se identificaron los principales componentes del ciclo hidrológico para realizar la evaluación: precipitación, escorrentía superficial de tipo laminar,

escorrentía superficial por cauces, escorrentía sub- superficial, infiltración, percolación, flujo y almacenamiento de agua superficial, flujo y almacenamiento de agua subterránea, almacenamiento de agua en los poros del suelo (sin saturación), interceptación, transpiración, evaporación, transporte y deposición de sedimentos, conectividad en la interface agua-tierra, pulsos de inundación, autodepuración, dinámica de cuerpos de agua superficiales, dinámica de cuerpos de agua subterráneos.

El estudio en mención, determinó que en la macrocuenca se presentan las siguientes relaciones entre el ciclo hidrológico y la producción de hidrocarburos en términos de la intensidad de la afectación (media, baja o alta), específicamente para las áreas hidrográficas Arauca, Meta y Casanare:

1) Afectación baja. Disminución de la escorrentía superficial de tipo laminar
2) Afectación baja. Disminución de la escorrentía superficial por cauces
3) Afectación baja. Aumento de la escorrentía sub- superficial,
4) Afectación baja. Aumento de infiltración
5) Afectación baja. Aumento de percolación
6) Afectación media. Disminución del flujo y almacenamiento de agua superficial
7) Afectación media. Disminución del flujo y almacenamiento de agua subterránea
8) Afectación media. Disminución almacenamiento de agua en los poros del suelo
9) Afectación baja. Disminución de interceptación
10) Afectación baja. Disminución de la transpiración
11) Afectación baja. Disminución de la evaporación
12) Afectación baja. Aumento del transporte y deposición de sedimentos
13) Afectación baja. Disminución de la autodepuración

14) Afectación baja. Disminución de la dinámica de cuerpos de agua superficiales

15) Afectación media. Disminución de la dinámica de cuerpos de agua subterráneos

Las afectaciones anteriores, aunque se relacionan con la configuración del sistema hídrico, contemplan cambios sobre la disponibilidad de agua y sus patrones de distribución, asociados a los cambios sobre el territorio por la instalación de la infraestructura de producción y por la presión sobre el sistema hídrico, para llevar a cabo dichas labores.

En términos de aguas de producción, los parámetros relacionados solo podrían estar asociados a los cambios en las dinámicas de los cuerpos de agua, por su eventual aporte de elementos y alteraciones de caudal que modificarían la composición y corriente natural.

En virtud de lo anterior, la distribución de la ictiofauna se condiciona con la disponibilidad de fuentes de alimento, el cual se ve alterado por régimen hidrológico y afecta la calidad y la cantidad de los mismos; lo que significa que las transformaciones en el ciclo hidrológico, indirectamente influirán en la composición y estructura de la ictiofauna (Villa-Navarro, Roa, Gabriel, & Montoya, 2015).

De acuerdo con la revisión previa, se puede establecer que los impactos potenciales de las aguas de producción en la ictiofauna se pueden dividir en tres grupos (ver Tabla 7):

Tabla 7. Tipos de impactos potenciales

Impactos		
Directos		Indirectos
Letales	Subletales	
Alteraciones fisiológicas	Alteraciones de las dinámicas de comportamiento	Alteraciones sobre el medio
Respiración Osmoregulación Regulación sustancias tóxicas Reproducción Sistema Nervioso	Patrones de movilización Desplazamiento de hábitat Estados de alerta Búsqueda de alimento Capacidad de respuesta ante estímulos	Ciclo hidrológico Configuración del sistema hídrico

Nota: elaboración propia.

Estos impactos se determinaron como los aspectos principales en una cadena de eventos, lo que significa que frente a una condición adversa, en este caso ante las sustancias nocivas que conforman las aguas de producción, cada tipo de impacto representa el primer contacto que se verá afectado y/o que desencadenará una serie de respuestas tanto a nivel físico, como conductual. Las alteraciones sobre el medio se contemplan bajo este mismo criterio, donde eventualmente una alteración del ciclo hidrológico y/o de la configuración de un cuerpo de agua, tendrá repercusiones también a nivel fisiológico y de comportamiento.

9 Capítulo 3: Establecer las alternativas de manejo de impactos de las aguas de producción

Es necesario que el tratamiento de las aguas de producción cumpla de manera estricta las características del agua tratada, dispuestas en la normativa vigente y que además contempla estrategias que en lo posible le permitan dar un destino útil a la misma.

Si el responsable de la operación de producción en un pozo, tiene como objetivo utilizar una opción de bajo costo de disposición, como por ejemplo la descarga en aguas superficiales, el agua de producción debe cumplir los límites fijados por la autoridad ambiental competente, sobre las concentraciones de parámetros claves como los metales pesados y los hidrocarburos, que pueden ser tóxicos para la biodiversidad.

Por otro parte, si el operador del yacimiento considera viable entregar el agua tratada a un usuario secundario, debe realizar una caracterización de la misma, para asegurar que sus parámetros cumplen con las especificaciones requeridas por dicho usuario.

A nivel internacional, se contemplan varias opciones como medidas de manejo para el agua de producción (Forero, Echaverría, & Cardeñosa, 2017):

- Reutilización en superficie
- Disposición final como desecho en superficie
- Inyección subterránea como disposición final
- Re-inyección al proceso productivo
- Re-inyección después de la separación en el fondo del pozo
- Inyección en un pozo que ya no produce

Previo a las medidas de manejo expuestas anteriormente, el operador debe realizar un plan de tratamiento del agua producida, para lo cual cuenta con tres alternativas de tratamiento: físico, químico y biológico (Razi Ahmaduna, y otros, 2009).

La necesidad del tratamiento de aguas de producción ha sido expuesta viras décadas atrás, donde se destaca un reporte del American Petroleum Institute en 1995, donde no sólo estipulo la urgencia y relevancia de los tratamientos, sino que adicional recomendó las mejores tecnologías para el manejo de estás aguas residuales (Jiménez, Micó, Arnaldos, Medina, & Contreras, 2017).

Los contaminantes más relevantes a ser tratados para eliminar o al menos disminuir considerablemente su grado de peligrosidad, corresponden a partículas micro y nanoescalares, salinidad, compuestos volátiles, compuestos orgánicos extraíbles (ácido, básico y neutral), amoníaco y sulfuro de hidrógeno (Jiménez, Micó, Arnaldos, Medina, & Contreras, 2017).

9.1 Descripción general de métodos de tratamiento

Los métodos de tratamiento se basan en combinaciones de diferentes tecnologías: Adsorción de Carbono (sistemas granulares modulares de carbón activado), Depuración de aire (torre compactada con burbujeo de aire a través de la corriente PW), Filtración de Membrana (nanofiltración y membranas poliméricas de ósmosis inversa), Luz ultravioleta (irradiación por lámparas UV), Químico Oxidación (ozono y/u oxidación con peróxido de hidrógeno) y tratamiento biológico (sistema aeróbico con biotower de película fija o crecimiento suspendido) (Jiménez, Micó, Arnaldos, Medina, & Contreras, 2017).

El plan de tratamiento de las aguas de producción debe contemplar los siguientes objetivos, para los cuales se describen los mecanismos típicos (Arthur, Langhus, & Patel, 2005; Razi Ahmaduna, y otros, 2009):

1) Eliminación de aceite y grasa dispersos (desengrase):
    a. Adsorción
    b. Separadores API
    c. Placas corrugadas embaladas en los tanques API
    d. Unidades de flotación de gas
    e. Centrifugadores y/o hidrociclones
    f. Polímero macroporoso (MPPE)
2) Eliminación de elementos orgánicos solubles
    a. Adsorción
    b. Condensado líquido in situ
    c. Oxidación química para descomponer los elementos a través de oxidntes como el Ozono o peróxido de hidrógeno.
    d. Filtros de arena
3) Eliminación de patógenos potenciales, especialmente microorganismos (desinfección).
    a. Técnicas avanzadas de filtración
    b. Tratamiento con luz UV
    c. Reacción de cloro o yodo
    d. Ozono
    e. Reducción del pH
4) Eliminación de sólidos suspendidos (partículas y arena)
    a. Sedimentación
    b. Filtración

5) Eliminación de sales disueltas (desalinización):

   a. Evaporación
   b. Destilación
   c. Filtración de membrana
   d. Separación eléctrica
   e. Precipitados químicos

A continuación, se describen los tipos de medidas adoptadas por los responsables de la gestión y manejo de las aguas de producción en los dos casos de estudio de la presente monografía.

9.2 Medidas de tratamiento identificadas en los estudios de caso

Para los dos casos de estudio de los vertimientos en el Río Charte y Caño Rubiales, de conformidad con lo reportado en los informes de cumplimento Ambiental –ICA (Petróleos Sudamericanos Energy, 2016 & Pacific Rubiales Energy, 2014), como parte del plan de manejo de las aguas residuales industriales y de conformidad con la regulación nacional, se realiza un tratamiento de dichos residuos previo a la disposición final.

En estos dos casos, las aguas de producción pasan por un sistema de tratamiento de separación de hidrocarburos mediante una caja API (eliminación de aceites y grasas, así como sólidos suspendidos) y posteriormente por un circuito de piscinas de aireación y oxidación (eliminación por degradación de elementos orgánicos solubles), que dan como resultado el efluente que correspondería al vertimiento, el cual puede ser descargado en el cuerpo hídrico siempre y cuando sus características se encuentren dentro de los rangos de los parámetros físico-químicos establecidos en la legislación vigente.

10 Análisis y discusión

Se debe tener en cuenta, que en la actualidad el petróleo es uno de los productos más comercializados en el mercado internacional y cumple un papel fundamental en la economía del país. Esto se debe a que no solo se contempla como una fuente de energía principal, sino que también es la base de muchos materiales, que se producen utilizando el petróleo como materia prima y además, con la refinación se obtienen una variedad de productos derivados en estados gaseosos, líquidos y altamente viscosos, que son utilizados en diversas industrias (Adebayo & Tawabini, 2012).

Según la identificación de los permisos de vertimiento identificados en el SIAC (ver área de estudio, numeral 6) y la revisión de expedientes asociados a los proyectos de explotación, desarrollo y producción como generadores de aguas de producción (ver capítulo 1, numeral 7), se evidenció que el sector petrolero, dentro de sus responsabilidades como industria extractiva, ha desarrollado una clara tendencia en la adopción de medidas que eviten la descarga directa de aguas residuales industriales en cuerpos de agua, como estrategia de prevención de impactos sobre el sistema hídrico, que a su vez evitan posibles afectaciones sobre la ictiofauna objeto de esta monografía.

Con base en lo anterior y de conformidad los estudios de caso sobre los puntos de vertimiento reportados asociaos al Campo Entrerríos (Rio Charte) y Campo Rubiales (Caño Rubiales), este último es el único que a la fecha reporta descargas directas de las aguas residuales tratadas, vertimiento que cuenta con permiso otorgado como parte de la licencia ambiental, expedida por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

Así mismo y teniendo en cuenta que la ictiofauna representativa (Siluriformes y Characiformes) de la Macrocuenca del Orinoco se distribuye principalmente en áreas inundadas

y pequeños caños afluentes de las cuencas de primer orden (ver numeral 7.3: Características de la ictiofauna representativa y las relaciones ecológicas), para reducir los posibles impactos por las descargas directas de vertimientos, específicamente para el caso del Campo Rubiales, es recomendable que la autoridad competente evalúe los sistemas hídricos de orden primario y el régimen climático asociado (época seca y de lluvias), para determinar los puntos de vertimientos en cuerpos lóticos que se vean menos afectados por presentar un mayor rendimiento hídrico; pues como se evidenció en este documento, el actual aporte estimado de sólidos disueltos para este caño por el vertimiento realizado, es en carga de 1261423,7 Kg/mes, con un aumento de la concentración de este parámetro del orden de 209,3 mg/L, aproximadamente (época seca).

En términos de calidad de agua de los vertimientos, se determinó que a pesar de la toxicidad de ciertos compuestos químicos de las aguas de producción (ver numeral 8.1: Características generales de las aguas de producción, que pueden generar algún tipo de afectación; especialmente la Tabla 4) en los rasgos físico-químicos que configuran un cuerpo lótico, su dinámica hídrica y la ictiofauna relacionada (ver numeral 8.4: Descripción general de las posibles afectaciones en la ictiofauna), como es parte de la regulación realizar tratamientos de las aguas residuales generadas previo a su descarga de disposición final, las concentraciones nocivas se reducen hasta minimizar el impacto, dando como resultado parámetros que cumplen los límites establecidos (ver numeral 8.3: Parámetros físico-químicos de las aguas de producción de los casos de estudio).

Lo anterior significa, que para la adecuada gestión del sistema hídrico en el área de influencia de las actividades upstream, especialmente sobre las labores de producción de hidrocarburos que generen aguas residuales industriales, siempre se deben implementar estrategias inmediatas para la reducción del riesgo y se debe adoptar un plan de monitoreo

frecuente sobre de las características físico-químicas de este desecho, para hacer un seguimiento riguroso sobre las concentración de los componentes más nocivos, relacionados con estos impactos.

De igual forma, los efectos nocivos sobre los organismos, reportados en los diversos estudios enfocados en evaluar la toxicidad, corresponden en su gran mayoría a análisis controlados, en los cuales se exponen diversas especies a ciertas concentraciones de sustancias tóxicas para evaluar su grado de resistencia, pero a nivel local, no hay información que respalde que las descargas de las aguas de producción tratadas en el medio natural, generan los mismos efecto naturales de los estudios controlados en laboratorio.

De esta manera, se debe aclarar que no se cuenta con una trazabilidad en un 100% entre los parámetros monitoreados de las aguas de formación, las aguas tratadas en superficie, y los compuestos que tienen un límite normativo según la legislación colombiana vigente, por lo cual, es probable que exista un potencial contaminante que no cuente con un límite legal ambiental.

Por otra parte, es importante destacar que el sector petrolero continuamente se encuentra realizando investigaciones para mejorar los estándares en cuanto al manejo de riesgos e impactos, así como para articular sus operaciones productivas con el contexto ambiental de cada territorio. Es así que, en Colombia actualmente Ecopetrol y Pacific Rubiales adelantan proyectos de reutilización de las aguas de producción para cultivos agrícolas en la Altillanura, en donde existe déficit hídrico que limita un adecuado desarrollo de su vocación agrícola.

De acuerdo con lo anterior, Ecopetrol adelanta en el Distrito de Castilla un cultivo experimental de 80 hectáreas entre palma africana y especies nativas, para lo cual han utilizado 80 mil barriles/día de agua proveniente del campo petrolero. Por su parte Pacific Rubiales se encuentra desarrollando el proyecto La Cascada, con el propósito de irrigar inicialmente 1.300

hectáreas de palma, con una proyección a 2.000 hectáreas adicionales, para lo cual han montado una planta con capacidad de dar tratamiento a 1 millón de barriles diarios del agua requerida.

La empresa CANACOL por su parte está instalando varias plantas de tratamiento integral de aguas residuales para potabilizarlas en el campo Leono, reduciendo a su mínima expresión el porcentaje de rechazo.

En virtud de lo mencionado anteriormente, se demuestra que no hay incompatibilidad entre el sector petrolero y otros sectores productivos, el medio ambiente, el agua y el petróleo; por el contrario, se pueden emplear estrategias que no solo vinculen diferentes actores, sino que también articulen el desarrollo económico con la vocación del territorio.

Por otra parte, es indispensable resaltar que, en términos generales, los ecosistemas acuáticos son muy vulnerables a procesos de contaminación ya que son escenarios donde convergen una gran diversidad de compuestos, ya sea por descargue a través de la atmósfera, o por arrastre terrestre que finalizan en las corrientes hídricas, y pueden ser de originen natural como consecuencia de fenómenos adversos, o también como resultado de acciones antrópicas. Es allí la importancia de identificar todos los aspectos y actores que se relacionan con episodios de contaminación y/o deterioro de los sistemas hídricos, para no asumir que se relacionan con un sector determinado, como es el caso del sector de hidrocarburos, que a la fecha cuentan con unos estándares de control y mitigación de impactos muy altos.

Finalmente, la bibliografía sobre los efectos toxicológicos en peces está enfocada principalmente en estudios asociados a contingencias de las actividades del sector, no relacionadas con las aguas de producción, sino más bien con siniestros como derrames durante el transporte y/o almacenamiento de hidrocarburos. Considerando el peor escenario, donde las aguas de producción no fueran tratadas y se descargara todo su volumen en un cuerpo de agua,

los impactos de mayor importancia para las poblaciones de peces estarían dados por alteraciones negativas asociadas a (Ramírez Gonzalez & Viña Vizcaino, 1998) lo mencionado a continuación, y que hacen parte de las descritas en el numeral 8.4: Descripción general de las posibles afectaciones en la ictiofauna:

- Cambios en los patrones de alimentación: pérdida de capacidad en la predación y disminución de la oferta alimentaria (muerte de otros organismos base de la cadena trófica).
- Procesos respiratorios: disminución en la tasa de respiración y acumulación de hidrocarburos en los epitelios (obstrucción mecánica).
- Reacciones fisiológicas: alteración metabólica por el desencadenamiento de acciones respuesta, como por ejemplo la producción de moco para limpiar la obstrucción mecánica del epitelio.
- Reproducción: alteraciones morfogénicas de huevos y larvas, que modifican o inhiben los patrones de reproducción.
- Alteraciones conductuales: cambios en los patrones de movilidad y estimulación del desplazamiento abrupto para huir de los contaminantes. Esto ocasiona episodios de invasión de hábitat de otras especies, así como alteración en la cadena trófica natural, los procesos ecológicos y conflictos de competencia.

La respiración, la regulación de sustancia tóxicas y el desplazamiento de hábitat, se interpretan como las alteraciones más esperadas de manera inmediata, ante una alta y prolongada exposición de las sustancias nocivas, que conforman las aguas de producción, como por ejemplo los metales pesados, los materiales radioactivos, así como los hidrocarburos, que podrían provocar una mayor cantidad de impactos.

11 Conclusiones y recomendaciones

En la macrocuenca de la Orinoquía se desarrolla la explotación de hidrocarburos de manera intensiva (136 bloques otorgados por el Estado para la producción, reserva y exploración de petróleo y sus derivados, en lo que se denomina cuenca petrolífera de Los Llanos Orientales, y de donde se extrae el hidrocarburo específicamente las formaciones Barco – Los Cuervos, Mirador y Carbonera); sin embargo, tan solo una empresa realiza vertimientos directos de aguas de producción mediante cinco (5) puntos sobre el caño Rubiales (cuenca del río Vichada), bajo la autorización otorgada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA. De dicha actividad se evidenció que ésta cumple con la legislación ambiental vigente (Resolución 0631 de 2015) respecto a los límites máximos de contaminantes descargados; sin embargo, es de anotar que el volumen de agua descargado representa como máximo un 40% del caudal del cuerpo de agua receptor, y un aumento estimado en la concentración de los sólidos disueltos (principal contaminante aportado) en esta corriente de alrededor de 209 mg/L en la condición más crítica (época seca).

Por otra parte, como otro vertimiento objeto de estudio se referencia el relacionado con el campo Entrerríos, que está en trámite para reactivarse (suspendido en el 2014); de éste también se evidencia cumplimiento de la normatividad en su descarga al río Charte (cuenca del río Meta) y que el aporte de cloruros como su principal contaminante generado, produciría un aumento de la concentración de este parámetro en el cuerpo de agua receptor de 0,207mg/L.

Respecto a las posibles afectaciones sobre la ictiofauna por componentes tóxicos, se identifican como potenciales impactos directos las alteraciones fisiológicas y las alteraciones de las dinámicas de comportamiento (letales y subletales) y como impactos indirectos la alteración sobre el medio; sin embargo, no es posible determinar su nivel de importancia o gravedad para

el alcance del presente estudio, ya que, aunque los vertimientos realizados en esta área se hacen cumpliendo la legislación vigente, vale la pena aclarar que no se cuenta con estudios específicos, indicadores, ni reportes locales, que provean evidencias de impactos puntuales, demostrables y verificables, asociados a los vertimientos en mención de esta monografía.

En la explotación de hidrocarburos existe una gran variedad de tratamientos para las aguas de producción previo a su vertimiento, los cuales desarrolla la industria para cumplir con la legislación vigente. Es de resaltar que la tendencia del sector corresponde a cero vertimientos a cuerpos de agua, según los lineamientos de la ANLA respaldados por las solicitudes de las comunidades en esta zona del país, que en la mayoría de casos se basan en los conflictos permanentes entre el petróleo y la conservación, asociados a la ausencia de información técnica adecuada y las eventuales percepciones sin fundamento que imposibilitan puntos de concertación y acuerdo entre empresa y comunidad en este aspecto.

Según lo anterior, no existe una relación directa demostrable entre la generación de las aguas de producción en la cuenca petrolífera de los Llanos Orientales, y las posibles afectaciones de la calidad del sistema hídrico y la ictiofauna asociada a la macrocuenca hidrológica de la Orinoquía, según los resultados de este estudio.

Así mismo, en casos de existir una presunta contaminación de algún cuerpo de agua que denote afectaciones de la calidad del sistema hídrico y la ictiofauna, en la zona donde se desarrolla la industria petrolera, es indispensable que como primera medida se identifiquen todos los actores que de manera directa o indirecta tengan alguna relación con dichas corrientes hídricas y su uso, para determinar la responsabilidad de otros sectores sobre sus actividades y el sistema hídrico (e.g. minero, agropecuario, turístico, infraestructura, centros poblados, actividades ilegales no reguladas, entre otros).

Con el fin de tener un análisis más robusto de información, se recomienda generar proyectos de investigación hacia las afectaciones específicas de la ictiofauna (asociados a análisis de toxicología) en cada uno de los vertimientos generados, que no solo cubren los autorizados por la ANLA, sino también por las Corporaciones Autónomas Regionales, y en las otras fases de exploración de los hidrocarburos, y /u contemplando otros sectores que hacen parte de la dinámica propia de la región.

12 Bibliografía

4D Elements Consultores . (2013). *Plan estratégico macrocuenca del Rio Orinoco fase I y II.* Bogotá D.C.: Inédito.

Adebayo, A. R., & Tawabini, B. (2012). Hydrocarbon Exploration and Production- a Balance between Benefits to the Society and Impact on the Environment. *Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology, 3*(122), 1-9.

ANH. (2009). *Colombia petróleo y futuro.* Bogotá: ANH.

ANH. (2012). *Cuenca Llanos Orientales. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos.* Bogotá D.C.: INGRAIN Inc. y Carl Zeiss Llc.

Arthur, J. D., Langhus, B. G., & Patel, C. (2005). *Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies.* Tulsa: ALL Consulting, LLC.

Bakke , T., Klungsøyr, J., & Sanni, S. (2013). Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry. *Marine Environmental Research, 92,* 154-169.

Calao Ruiz, J. (2007). *Caracterización ambiental de la industria petrolera: tecnologías disponibles para la prevención y mitigación de impactos ambientales (tesis de pregado).* Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Christie, C. (2012). Disposal of Produced Water from Oil & Gas Exploration: Environmental Impacts on Waterways in Western Pennsylvania (Master project). (pág. 53). Durham, North Carolina: Duke University.

Conesa, V. (2003). *Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental.* Madrid: Mundi-Prensa Libros, s.a.

Correa, H. D., Ruiz, S. L., & Arévalo, L. M. (2005). *Plan de acción en biodiversidad de la cuenca del Orinoco – Colombia / 2005 - 2015 – Propuesta Técnica.* Bogotá:

Corporinoquia, Cormacarena, I.A.v.H, Unitrópico, Fundación Omacha, Fundación Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF - Colombia, GTZ - Colombia.

ECOPETROL S.A. (26 de Septiembre de 2014). *Nuestra Empresa. Servicios de Información al Ciudadano*. Recuperado el 30 de Enero de 2018, de Glosario: https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/servicios-de-informacion-al-ciudadano/glosario

Espina, S., & Vanegas, C. (2005). Ecofisiología y contaminación. En A. V. Botello, J. Rendón von Osten, G. Gold-Boucht, & C. Agraz-Hernández, *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias* (págs. 53-78). Veracruz: Universidad Autónoma de Campeche.

Forero, J. E., Echaverría, V., & Cardeñosa, M. (2017). Oil produced Water a challenging resource, Use of new technology as management best practices. *Congreso Colombiano del Petróleo* (pág. 13). Bogotá D.C.: ACIPET.

HIMAT. (1978). *Resolución 0337 por medio de la cual se adopta un sistema de codificación para las estaciones hidrometereológicas.* Bogotá D.E.: Ministerio de Agricultura.

IDEAM. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia* . Bogotá D.C.: Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014.* Bogotá, D. C.: IDEAM.

IPIECA. (1997). *Biological impacts of oil pollution fisheries.* London: IPIECA.

Jiménez, S., Micó, M. M., Arnaldos, M., Medina, F., & Contreras, S. (2017). State of the art of produced water treatment. *Chemosphere, 192*, 186-208.

Machado-Allison , A., Lasso, C. A., Usma, J. S., Sánchez-Duarte, P., & Lasso-Alcalá, O. M. (2010). Peces. En C. A. Lasso, J. S. Usma, F. Trujillo, & A. Rial, *Biodiversidad de la*

cuenca del Orinoco: Bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad (págs. 217-257). Bogotá D.C.: IAvH, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquia UNAL.

MADS & IDEAM. (2015). *Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del estudio nacional del agua 2014 – año 2013.* Bogotá D.C.: IDEAM.

MADS. (2012). *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos –PNGIBSE.* Bogotá: Programa de Comunicaciones, Instituto Humboldt.

MADS. (2015). *Sistema de Información Ambiental para Colombia, SIAC*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2017, de Catálogo de Mapas: Capas ANLA: http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas

MADS; Programa Naciones Unidas para el Desarrollo. (2014). *Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Colombia ante el Convenio de Diversidad Biológica.* Bogotá D.C.: Linca y Nuevas Ediciones.

Malagón, J., Ruiz, C., & Montoya, G. (2016). *La competitividad del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia.* Bogotá: PNUD.

Martínez Ortiz, A. (2012). *Impacto socioecono mico de la minerí a en Colombia.* Bogotá D.C.: FEDESARROLLO.

MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.* Bogotá D.C.: Dirección de Ecosistemas Grupo de Recurso Hídrico.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.* Washington DC: Island Press.

Monteiro, A. G. (2003). *Metodologia de avaliacao de custos ambientais provocados por vazamento de óleo. Estudo de caso do complexo REDUC-DTSE (Dissertacao de Mestrado).* Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Naciones Unidas. (1987). Nuestro futuro común. Informe Brundtland. *Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*, (pág. 416). Tokio.

Okuthe, I. K. (2015). Environmental and Social challenges of oil and gas exploration in Kenya. *International Journal of Innovation and Scientific Research, 17*(1), 164-174.

Pacific Rubiales Energy. (2014). *Informe de Cumplimento Ambiental. Campo Rubiales.* Bogotá D.C.: Inédito.

Páez Osuna, F. (2005). Metales. En A. V. Botello, J. Rendón von Osten, G. Gold-Boucht, & C. Agraz-Hernández, *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias* (págs. 329-342). Veracruz: Universidad Autónoma de Campeche.

Petróleos Sudamericanos Energy. (2016). *INFORME DE CUPLIMEINTO AMBIENTAL N° 9. CAMPO DE PRODUCCIÓN ENTRERRIOS.* Mani: Inédito.

Ramírez Gonzalez, A., & Viña Vizcaino, G. (1998). *Limnología Colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis.* Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jose Tadeo Lozano.

Ramírez-Gil, H., & Ajiaco-Martínez, R. E. (2011). Diagnóstico de la pesquería en la cuenca del Orinoco. En C. A. Lasso, F. de Paula Gutiérrez, M. A. Morales-Betancourt, E. Agudelo Córdoba, H. Ramírez-Gil, & R. E. Ajiaco-Martínez, *II. Pesquerías continentales de Colombia: cuencas del Magdalena-Cauca, Sinú, Canalete, Atrato, Orinoco, Amazonas y vertiente del Pacífico* (págs. 169-198). Bogotá D.C.: IAvH.

Razi Ahmaduna, F., Pendashteha, A., Abdullaha, L. C., DAwang Biaka, D. R., Siavash Madaenic, S., & Abidina, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials, 170*, 530-551.

Rodríguez Becerra , M., Andrade Pérez, G. I., Castro Gutiérrez , L. G., Durán Durán, A., Rudas Lleras, G., Uribe Botero, E., & Wills Herrera, E. (2009). *La mejor Orinoquía que podemos construir. Elementos para la sostenibilidad ambiental del desarrollo.* Bogotá: Universidad de los Andes.

Rodríguez, M. A., Winemiller, K. O., Lewis Jr., W. M., & Taphorn Baechle, D. C. (2007). The freshwater habitats, fishes, and fisheries of the Orinoco River basin. *Aquatic Ecosystem Health & Management, 10*(2), 140–152.

Rosales, J., Suárez, C. F., & Lasso, C. A. (2010). Descripción del medio natural de la cuenca del Orinoco. En C. A. Lasso, J. S. Usma, F. Trujillo, & A. Rial, *Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: Bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad* (págs. 51-73). Bogotá D.C.: IAvH, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquia UNAL.

SENER. (02 de Junio de 2017). *Exploración y Extracción de Hidrocarburos*. Recuperado el 30 de Enero de 2018, de Glosario de Términos Petroleros: https://www.gob.mx/sener/articulos/exploracion-y-extraccion-de-hidrocarburos-107376?idiom=es#

Shadowxfox. (02 de Agosto de 2009). *Mapa de Colombia (ríos)*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2017, de Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AMapa_de_Colombia_(r%C3%ADos).svg

Svobodova, Z., Lloyd, R., Machova, J., & Vykusova, B. (1993). *Water quality and fish health* (Vol. 54). Rome: EIFAC, FAO.

UNESCO. (2003). *Water for people, water for life. Executive Summary of the UN World Water Development.* Paris: UNESCO Publishing - Berghahn Books.

Usma Oviedo, J. S., & Trujillo González, F. (2011). *Biodiversidad del Casanare: Ecosistemas Estratégicos del Departamento.* Bogotá: Gobernación de Casanare - WWF Colombia.

Usma, J. S., Valderrama, M., Escobar, M. D., Ajiaco-Martínez, R. E., Villa-Navarro, F., Castro, F., . . . Cipamocha, C. (2009). Peces dulceacuícolas migratorios en Colombia. En L. G. Naranjo , & J. D. Amaya Espinel, *Plan Nacional de las especies migratorias: Diagnóstico e identificación de acciones para la conservación y manejo sostenible de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia* (págs. 103-131). Bogotá D.C. : MAVDT, WWF Colombia.

Veil, J. A., Puder, M. G., Elcock, D., & Redweik, R. J. (2004). *A White Paper Describing Produced. Water from Production of Crude Oil,. Natural Gas, and Coal Bed Methane.* Pittsburgh: Argonne National Laboratory.

Villa-Navarro, F. A., Roa, M., Gabriel, A., & Montoya, D. (2015). Peces. En C. Osorio-Peláez, C. A. Lasso, & F. Trujillo, *XIII. Aplicación de criterios bioecológicos para la identificación, caracterización y establecimiento de límites funcionales en humedales de las sabanas inundables de la Orinoquia* (págs. 227-249). Bogotá D.C.: IAvH.

Waldron, T., Vieira-Muñoz, M. I., Díaz-Timoté, J., & Urbano-Bonilla, A. (2016). *Orinoquia viva. Biodiversidad y servicios ecosistémicos en el área de influencia del Oleoducto Bicentenario.* Bogotá D.C.: IAvH.