

**ESTRATEGIA PARA EL USO SOSTENIBLE DE AGUA DE PRODUCCIÓN
PARA RIEGO DE SUELOS, ADAPTADA DE LA EXPERIENCIA DEL DESIERTO
DE OMÁN A UN PATRÓN DE POZOS EN UN CAMPO COLOMBIANO**

ANGIE TATIANA ORTEGA RAMIREZ

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
MAESTRIA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD
BOGOTÁ D.C.
2019**

**ESTRATEGIA PARA EL USO SOSTENIBLE DE AGUA DE PRODUCCIÓN
PARA RIEGO DE SUELOS, ADAPTADA DE LA EXPERIENCIA DEL DESIERTO
DE OMÁN A UN PATRÓN DE POZOS EN UN CAMPO COLOMBIANO**

ANGIE TATIANA ORTEGA RAMIREZ

**Trabajo de grado para optar el título de Magister en
Gestión Ambiental para la Competitividad**

Director(a):

**MARÍA DEL ROSARIO GÓMEZ
Bióloga
MSc. Desarrollo Sustentable**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
MAESTRIA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD
BOGOTÁ D.C.
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director de la Maestría

Firma del calificador

Bogotá D.C., septiembre de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García -Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada

Dr. Luis Fernando Romero Suárez

Director Maestría en Gestión Ambiental

Dra. Emerson Mahecha Roa

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

DEDICATORIA

En primer lugar quiero dedicar el desarrollo de este proyecto a Dios, por sus inmensas bendiciones en mi vida, por ser el motor de mis sueños y de mis metas, por ser mi cómplice en tantos deseos del corazón y por mantenerme sujeta a su mano en cada etapa de mi vida, pero particularmente por darme los dones que me permite estar buscando el título de Magister.

A mis Padres María Eugenia Ramírez y Edgar de Jesús Ortega por ser mi inspiración, mi ejemplo y mis modelos a seguir, por todo su apoyo en cada una de las etapas de mi vida y en cada proyecto que emprendo, por ser mi compañía y soporte en todo momento, por ser quienes celebran mis triunfos y soporte en las dificultades, a ellos mil gracias por ser incondicionales y por permitirme ver la presencia de Dios a través de ellos.

AGRADECIMIENTOS

La autora presenta sus agradecimientos a todas las personas que brindaron su apoyo y parte de su tiempo para realizar este trabajo de grado.

A la directora de este proyecto María del Rosario Gómez por su acompañamiento, apoyo y confianza en el desarrollo de esta iniciativa, así como por el compartir de sus conocimientos y experiencia en el tema.

A todos los docentes de la Maestría en Gestión Ambiental para la competitividad de la Fundación Universidad de América quienes a lo largo del periodo de formación han transmitido su conocimiento y experiencia.

A la Fundación Universidad de América por su apoyo y acompañamiento en el desarrollo de esta etapa profesional.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. METODOLOGÍA	22
2.1 FASE 1: DIAGNOSTICO DE LA GESTIÓN ACTUAL DEL AGUA DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO COLOMBIANO	22
2.2 FASE 2: GENERALIDADES DE LA ESTRATEGIA DE AGUAS DE RIEGO PARA SUELOS EN NIMR-OMÁN	22
2.3 FASE 3: IDENTIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE VARIABLES DE LA ESTRATEGIA DE OMÁN	22
2.3.1 Metodología para la identificación y priorización de variables.	23
2.3.2 Pasos de la matriz de expertos.	24
2.3.3 Tipos de sesgo.	25
2.3.4 Métodos estadísticos de análisis multicriterio.	26
2.3.5 Tipos de análisis multicriterio.	27
2.3.6 Descripción del método seleccionado.	28
2.3.7 Cuestionario.	28
2.3.8 Metodología de Selección de expertos.	29
2.4 FASE 4: VARIABLES PARA PROMOVER LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL, ECONÓMICA Y SOCIAL DE LA ESTRATEGIA DE AGUA DE PRODUCCIÓN ADAPTADA A UN CAMPO COLOMBIANO	29
2.5 FASE 5: ESTRATEGIA PARA EL USO SOSTENIBLE DE AGUA DE PRODUCCIÓN PARA RIEGO DE SUELOS EN UN CAMPO COLOMBIANO	29
3 MARCO TEÓRICO	31
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR PETROLERO MUNDIAL	31
3.1.1 Cifras de producción.	31
3.1.2 Principales campos y productores.	33
3.1.3 Problemáticas ambientales, sociales y económicas.	36
3.1.4 Derivados del petróleo.	36
3.1.5 Tasa de crecimiento del sector frente a la demanda.	37
3.2 SECTOR PETROLERO EN COLOMBIA	37
3.2.1 Cifras de producción.	38
3.2.2 Aporte del sector de hidrocarburos al Producto Interno Bruto – PIB-colombiano.	39
3.2.3 Empresas de mayor producción en Colombia.	39
3.2.4 Marco Normativo del Proyecto.	40
3.3 CUENCAS SEDIMENTARIAS EN COLOMBIA	42
3.3.1 Generalidades de la Cuenca Sedimentaria de los Llanos Orientales.	44
3.3.2 Caracterización del agua y estrés hídrico.	44

3.3.3 Beneficios del manejo del recurso hídrico.	46
3.4 CASOS EXITOSOS DEL MANEJO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.	46
4 DISCUSIÓN Y RESULTADOS	48
4.1 FASE 1: DIAGNOSTICO DE LA GESTIÓN ACTUAL DEL AGUA DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO COLOMBIANO.	48
4.1.1 Localización geográfica de la Cuenca de los Llanos Orientales.	48
4.1.2 Caracterización ambiental.	50
4.1.3 Poblaciones cercanas.	50
4.1.4 Sectores Productivos de la zona.	51
4.1.5 Parámetros de agua.	51
4.1.6 Gestión del Recurso Hídrico.	53
4.1.7 Caracterización del agua de fondo.	53
4.1.8 Problemáticas del Campo Castilla en manejo de aguas.	54
4.2 FASE 2: GENERALIDADES DE LA ESTRATEGIA DE AGUAS DE RIEGO PARA SUELOS EN NIMR – OMÁN.	56
4.2.1 Localización geográfica de la planta tratadora de agua en el desierto de Nimr– Omán.	56
4.2.2 Caracterización de la planta de tratamiento de Nirm – Omán.	58
4.2.3 Diseño de humedales artificiales.	59
4.2.4 Phragmites australis.	60
4.2.5 Caracterización del agua de producción.	61
4.2.6 Ruta de tratamiento del agua.	62
4.2.7 Aplicaciones finales del agua de producción.	65
4.2.8 Potencial de réplica en Colombia.	65
4.3 FASE 3: IDENTIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE VARIABLES PARA LA ESTRATEGIA DE OMÁN EN COLOMBIA	66
4.3.1 Selección de expertos.	66
4.3.2 Resultados Preliminares de Identificación.	67
4.3.3 Resultados preliminares de Priorización.	69
4.3.4 Diagrama de análisis estadístico.	70
4.4 FASE 4: VARIABLES PARA PROMOVER LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL, ECONÓMICA Y SOCIAL DE LA ESTRATEGIA DE AGUA DE PRODUCCIÓN ADAPTADA A UN CAMPO COLOMBIANO	72
4.4.1 Variables ambientales.	72
4.4.2 Elementos Financieros.	82
4.4.3 Elementos Sociales.	86
4.5 FASE 5: ESTRATEGIA PARA EL USO SOSTENIBLE DE AGUA DE PRODUCCIÓN PARA RIEGO DE SUELOS EN UN CAMPO COLOMBIANO.	90
4.5.1 Variables técnico – Económicas.	90
4.5.2 Variables Sociales.	91
4.5.3 Variables Ambientales.	92
REFERENCIAS	94
ANEXOS	104

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Mapa de cuencas colombianas propuesto por la ANH	43
Figura 2. Localización del área de estudio correspondiente a la Cuenca de Llanos Orientales, Colombia	49
Figura 3. Localización de los bloques dentro de la cuenca de Llanos Orientales, Colombia	49
Figura 4. Tratamiento de agua en la Cuenca de los Llanos Orientales	55
Figura 5. Localización geográfica del Sultanato de Omán y Nimr	57
Figura 6. Plantas acuáticas más utilizadas en la construcción de humedales	59
Figura 7. Carrizales del desierto de Omán	60
Figura 8. Diseño de la planta de tratamiento de agua de Nimr	63
Figura 9. Proceso de la planta de tratamiento de agua de Nimr	64

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. <i>Estadísticas de países productores petroleros y Colombia</i>	33
Gráfica 2. <i>Producción promedio anual de crudo</i>	38
Gráfica 3. Resultados para la primera pregunta, orden de priorización	67
Gráfica 4. Resultados de interacción entre variables	68
Gráfica 5. Gráfica de variables	71
Gráfica 6. Interacciones entre variables	71
Gráfica 7. Diagrama de la triple cuenta	93

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Campos Petroleros de mayores reservas recuperables de Petróleo	32
Tabla 2. Campos Petroleros de mayores reservas recuperables de Petróleo	34
Tabla 3. Empresas con mayor volumen de petróleo producido	35
Tabla 4. Caracterización del agua de fondo Cuenca Llanos Orientales	53
Tabla 5. Premios obtenidos por el proyecto de los humedales de Nimr	58
Tabla 6. Condiciones climáticas de Nimr	58
Tabla 7. Características del agua de producción de los campos de PDO	61
Tabla 8. Peso para cada variable	69
Tabla 9. Peso para cada interacción de variables	70
Tabla 10. Criterios de calidad del agua admisibles para uso agrícola	74
Tabla 11. Tabla comparativa de las propiedades del agua de Omán vs. Caso colombiano	76
Tabla 12. Tabla comparativa de las propiedades del agua de Omán vs. Normatividad Colombiana	77
Tabla 13. Tabla comparativa de las propiedades del agua caso colombiano vs. Normatividad Colombiana	77
Tabla 14. Clasificación botánica caña de azúcar	80
Tabla 15. Composición química de la caña de azúcar <i>Saccharum officinarum</i> L	81
Tabla 16. Tabla comparativa de las características biológicas de la caña colombiana y la caña de Omán	82
Tabla 17. Análisis de costos Unitarios para la construcción de un humedal en Colombia	83
Tabla 18. Análisis de costos Unitarios para plantas, abonos e insumos	85
Tabla 19. Análisis de costos mantenimiento de un humedal	85
Tabla 20. Costos de mano de obra	86
Tabla 21. Compañías petroleras que operan en la cuenca llanos orientales	88
Tabla 22. Distribución del área sembrada por departamento	89

GLOSARIO

BIOTRATAMIENTO: son los métodos que emplean insumos o materiales naturales de plantas o tipos de microorganismos característicos como las bacterias y hongos con el fin último de realizar una transformación o neutralización de contaminantes. (Wikilengua, s.f)

CAJA API: también denominado separador API, el cual cumple la función de separar las gotas de aceite suspendidos así como los sólidos provenientes de las aguas residuales del proceso de producción de petróleo (Sumio Water Systems, s.f)

CAMPO MADURO: hace referencia a campos petroleros que han llegado a su punto máximo de producción y presentan declinaciones en la cantidad de barriles producidos. (Expansion, 2015)

CELDA QUÍMICA: corresponde a un recipiente o dispositivo que tiene la capacidad de almacenar sustancias químicas, teniendo la posibilidad de realizarse procesos internos como reacciones químicas. (López O. , 2010)

COLIFORMES: es la especie bacteriana que comprende a las bacterias entéricas y que se encuentran asociadas a la contaminación del agua y alimentos. Se basa en la especie *Escherichia coli* (OSMAN, 1994)

CONIFICACIÓN: se relaciona al cambio presentado en el contacto agua/petróleo de un yacimiento o como a la caída de presión durante la fase de producción de hidrocarburos (La Comunida Petrolera, 2009)

DISPOSAL: es la inyección realizada a rocas de la corteza terrestre que no involucra un contacto con los acuíferos activos o por conexiones hidráulicas. (Collins, s.f)

HUMEDAL: zona de tierra que se encuentra inundada de manera permanente o por periodos de tiempo. Pueden ser de tipo natural o artificial (Pérez & Gardey, 2018).

LIGNINA: es una sustancia de origen y tipo natural presente en las paredes celulares de células vegetales. (Gonzalez, 2011)

MULTICRITERIO: instrumentos que permiten evaluar posibilidad de soluciones a un problema, incógnita o hipótesis propuesta. (ECURED, s.f)

OASIS: corresponde a una sección o zona en el desierto en el cual se puede encontrar agua y vegetación, condiciones no típicas del mismo. (Florencia, 2010)

OSMOSIS INVERSA: comprende una tecnología de purificación de agua mediante el empleo de membranas semipermeables y por donde bajo el fenómeno de presión se controla la eliminación de iones, moléculas y partículas. (Textoscientificos.com, 2007)

PLÁNTULA: hace referencia al desarrollo del esporófito o el embrión de una semilla, es decir es la primera fase de crecimiento de una planta o especie vegetal (ECURED, s.f)

RESERVAS: comprende a la cantidad de petróleo que se puede encontrar en un yacimiento y es recuperable para extraer en superficie. (La Comunidad Petrolera, 2008)

RIEGO: es el aporte de agua a cultivos mediante la infiltración en suelo, para satisfacer las necesidades hídricas de la zona (Pérez & Merino, 2016)

VERTIMIENTO: corresponde a la disposición que se realiza de fluidos, solidos o materiales residuales a cuerpos de agua o suelos. (Educalingo, s.f)

YACIMIENTO: espacio físico rocoso en el subsuelo en donde se encuentran e forma natural minerales, rocas o material fósil. (WordReference, s.f)

RESUMEN

La industria petrolera es un sector que emplea alta cantidad de agua en sus operaciones, generando retos en el manejo hídrico y disposición final de dichos volúmenes. La preocupación es tan importante que a nivel mundial se desarrollan alternativas para el uso adecuado del agua producida, diferente a la reinyección tradicional a las formaciones para métodos de recuperación secundaria.

Este proyecto analiza la viabilidad de reproducir en Colombia una estrategia desarrollada por la empresa Petroleum Development Omán en el desierto de Nirm – Omán, diseñando humedales artificiales para tratamientos biológicos que permitan el uso de agua para riego.

Para analizar la viabilidad de la estrategia de Omán en Colombia, se seleccionó el Campo Castilla sobre la cuenca de los llanos orientales, tomando como referencia la producción de agua y ruta de disposición de este, seguido de un análisis por matriz de expertos, quienes cuentan con experiencia y formación en las áreas de la ingeniería de petróleos y ambiental, para que partiendo del concepto de dichos expertos y por métodos estadísticos, se estableció una priorización de variables, realizando una descripción de parámetros ambientales, económicos y sociales, vinculando a las partes interesadas del proyecto en la aplicación de la estrategia de humedales artificiales para el tratamiento de aguas de producción en un Campo Colombiano.

Finalmente, el estudio de caso se resume en un gráfico de la triple cuenta de resultados, mostrando las variables estudiadas y su interacción, visualizando la sostenibilidad de la propuesta de humedales artificiales para uso de riego en Colombia para la industria petrolera.

Palabras Claves: Agua, petróleo, producción, sostenibilidad, riego, campo petrolero, Omán, Castilla.

ABSTRACT

The oil industry is a sector that uses high amounts of water in its operations, generating challenges in water management and final disposal of these volumes. The concern is so important that alternatives are developed worldwide for the proper use of the produced water, different from the traditional reinjection to the formations for secondary recovery methods.

This project analyzes the feasibility of reproducing in Colombia a strategy developed by Petroleum Development Oman in the Nirm - Oman desert, designing artificial wetlands for biological treatments that allow the use of water for irrigation.

To analyze the viability of the Oman strategy in Colombia, the Castilla Field on the eastern plains basin was selected, taking as reference the water production and disposal route of this, followed by an analysis by matrix of experts, who count With experience and training in the areas of petroleum and environmental engineering, so that based on the concept of these experts and by statistical methods, a prioritization of variables was established, making a description of environmental, economic and social parameters, linking the parties interested in the project in the application of the strategy of artificial wetlands for the treatment of production waters in a Colombian Field.

Finally, the case study is summarized in a graph of the triple bottom line, showing the variables studied and their interaction, visualizing the sustainability of the proposal of artificial wetlands for irrigation use in Colombia for the oil industry.

Key Words: Water, oil, production, sustainability, irrigation, oil field, Oman, Castilla.

INTRODUCCIÓN

Dada la necesidad y urgencia del control de producción de agua desde el yacimiento, la industria del petróleo ha generado estrategias mecánicas y químicas, como tapones de cemento, geles, polímeros, camisas inflables, fluidos inteligentes, pozos con tramos laterales, desviaciones de trayectorias, completamientos dobles, entre otras (Bailey, y otros, 2000), las cuáles se emplean actualmente en la industria para procesos de control de producción en fondo de pozo.

Aunque estas estrategias han dado soluciones rápidas al control de la producción de agua en yacimiento, no se ha profundizado o analizado otro tipo de estrategias que impacten el problema de la acumulación de agua de producción en la superficie, es decir, en las denominadas facilidades y las implicaciones ambientales, sociales y económicas que estas puedan traer, refiriéndose a metodologías de gestión (cambios operacionales, inversiones en mecanismos nuevos, búsqueda de reutilización de volúmenes o alianzas con otras industrias, etc.), económicas (Inversión del proyecto, tasas de rentabilidad, TIR, entre otras) y/o sociales (Apoyo a la comunidad en volúmenes disponibles, facilidades de plantas de acueducto, entre otras).

A nivel internacional se han desarrollado estrategias como tratamientos en superficie de plataformas petroleras, como es el caso de Nimr en el desierto de Omán, lugar en donde se ha caracterizado por ser una zona productora de petróleo, pero con altos volúmenes de agua asociados a ellos, aproximadamente de 250.000 m³/d que permiten mantener la operación de recuperación petrolera (Breuer, Al-Asmi, SPE, Bauer Nimr, & Petroleum Development Oman, 2010). El tratamiento que se ha implementado en esta zona comprende al diseño de humedales en el desierto que permitan realizar un tratamiento físico y biológico de manera natural para que permita el nuevo uso de las aguas extraídas de pozo (Arnold et al., 2004).

Dentro de este contexto, el presente proyecto propone una metodología que permite adaptar la estrategia de Nimr del desierto de Omán bajo las condiciones geográficas, operacionales, ambientales y sociales particulares de Colombia, tomando al campo Castilla como estudio de caso para el análisis.

Estudiar este tipo de estrategias en Colombia es de enorme prioridad debido a que mantener la seguridad energética del país en los próximos años llevará a la aplicación de recuperación de hidrocarburo en campos maduros y en zonas más profundas, que tendrán una relación directa con el contacto a los acuíferos. Por ejemplo, la explotación de reservas de esquisto (gas y petróleo), es decir, no convencionales, han aumentado en las últimas décadas, situación positiva para la seguridad energética de los países (Hickman, 2012), pero que conlleva a una producción de agua mayor que para las operaciones de explotación actuales.

Finalmente, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 del gobierno Nacional Colombiano, establece adoptar medidas para proteger las fuentes de agua y garantizar su sostenibilidad en el tiempo, con un enfoque de Economía Circular, en relación con potenciar el uso sostenible de agua subterránea como fuente de abastecimiento (DNP, 2018), donde el uso de agua para riego se convierte en una estrategia útil en el cumplimiento de las actividades descritas en el Plan de gobierno.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Formular una estrategia para el uso sostenible del agua de producción para riego de suelos, adaptada de la experiencia del desierto de Omán, a un patrón de pozos en un Campo Colombiano.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diagnosticar la gestión actual del agua de producción en un Campo Colombiano.
- Analizar la estrategia de uso de agua de producción para riego de suelos aplicada en Nimr – Omán.
- Priorizar las variables necesarias para la aplicación de la estrategia de Nimr – Omán en el Campo Colombiano, mediante análisis estadístico.
- Plantear los elementos técnicos, financieros y sociales claves para la formulación e implementación de la estrategia de gestión de agua de producción en el campo colombiano
- Establecer la estrategia para el uso sostenible de agua de producción para riego de suelos en un Campo Colombiano.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria del petróleo en sus operaciones se enfrenta a desafíos que requieren de estrategias eficientes para el manejo y control de sus procesos, procurando que dichos mecanismos sean sostenibles económica, social y ambientalmente.

Dentro de la dinámica petrolera una de las partes críticas o fundamentales es la explotación de yacimientos y los fluidos presentes en él (petróleo y agua principalmente), pues de ésta depende la cantidad de aceite que pueden llevar a superficie y relacionarlo con el beneficio económico que se desea. Lo ideal para la industria es obtener un alto volumen de hidrocarburos y una baja cantidad de agua. Sin embargo, la realidad de la industria en Colombia es otra, en el año 2016 por cada barril de crudo en superficie se obtienen aproximadamente 13 barriles de agua (Ecopetrol, S.A, 2017), proporción que evidencia costos adicionales en el tratamiento y disposición final del volumen de agua.

La producción elevada de agua proveniente de yacimiento puede tener diferentes causas asociadas a problemas como: Fuga en la tubería de producción, flujo detrás de la tubería de revestimiento, contacto agua/petróleo desplazado en sentido ascendente, capa de alta permeabilidad sin flujo transversal, fisuras entre el pozo inyector y el pozo productor, fracturas presentando agua subyacente, conificación, barrido areal pobre, entre otros adicionales (Arnold, 2004). Dependiendo del problema presentado, tendrá mayor o menor eficiencia de la técnica empleada.

El inadecuado manejo del agua de producción en la industria del petróleo puede acarrear riesgos ambientales debido al contenido de grasas y aceites, metales pesados como el cadmio, plomo, estroncio, cromo, mercurio y otros, gases disueltos como el oxígeno, el cloro y el ácido sulfhídrico; sulfatos, carbonatos y bicarbonatos, además de microorganismos como las bacterias sulforreductoras (Mancilla & Mesa, 2012), mostrando así la necesidad de controlar y manejar los volúmenes de agua producida para una disposición adecuada.

En Colombia el agua de producción de la industria del petróleo es llevada a disposición subterránea con un 58.2% equivalente a 120.03 millones de m³ para Disposal, mientras que, para procesos de recuperación secundaria como reinyección, el volumen es equivalente a 50,94 millones de m³. El porcentaje de volumen dispuesto para vertimientos es del 40.2% (Ecopetrol, 2016), volúmenes importantes que requieren manejarse de manera eficiente y rápida, que permita mantener el equilibrio entre la rentabilidad de los proyectos petroleros y los requerimientos ambientales

Finalmente, debido a los altos volúmenes de aguas producidos por la industria petrolera en Colombia, los riesgos ambientales que puede conllevar una mala gestión del recurso hídrico y el riesgo en la rentabilidad de los proyectos, se hace necesario el estudio de nuevas estrategias que permitan una administración

eficiente. Cabe resaltar, que el presente proyecto es un gran aporte para la política Nacional para la gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia, debido a que este instrumento incluye las aguas subterráneas y establece como objetivo garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, considerando el agua como un factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente (MADS, 2014), por ende una propuesta de uso eficiente de aguas de producción en la industria petrolera Colombiana, garantiza la sostenibilidad hídrica.

El estudio de caso se delimita geográficamente en la cuenca de los llanos orientales, específicamente en el campo Castilla ubicada al Sureste del país, debido a su cercanía a zonas de alto desarrollo potencial agrícola, presencia de puntos de interés para implementación de proyectos ambientales, zonas con alto desarrollo petrolífero y particularmente por la facilidad de acceso a la información que se cuenta para este campo petrolero.

La selección de la estrategia del desierto de Omán es realizada por su reconocimiento mundial como una iniciativa exitosa, así como por su alto contenido bibliográfico y sus múltiples reportes documentados.

2. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto se definieron las siguientes fases metodológicas, las cuales se detallan a continuación:

2.1 FASE 1: DIAGNOSTICO DE LA GESTIÓN ACTUAL DEL AGUA DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO COLOMBIANO

Para diagnosticar la gestión actual del agua de producción en un campo Colombiano, en este capítulo se describen las generalidades y la caracterización geográfica de la cuenca de los llanos orientales de acuerdo a los planteamientos realizados por la ANH, que son los parámetros seguidos actualmente por la industria del petróleo. En esta sección (3.1), se encuentra la información geológica y ambiental de la cuenca de estudio del presente proyecto, la cual fue desarrollada a partir de información secundaria y bajo motores de búsqueda como Google Scholar, Researchgate, Science direct, base de datos de la Universidad Nacional, Universidad de América. Universidad Industrial de Santander, documentos corporativos de empresas del sector petrolero, entre otros. La información reportada enfatiza sobre: localización geográfica (3.1.1), aspectos ambientales (3.1.2), población (3.1.3), con las principales actividades económicas desarrolladas en la región (3.1.4), gestión del recurso hídrico (3.1.5 - 3.1.6 – 3.1.7) y sus problemáticas (3.1.8). La organización de la información se realizó enfocada en el detalle y relación con la cuenca de los llanos orientales.

2.2 FASE 2: GENERALIDADES DE LA ESTRATEGIA DE AGUAS DE RIEGO PARA SUELOS EN NIMR-OMÁN

En esta sección (3.2) se describe el proceso a la que es sometida el agua de producción en el desierto de Omán, teniendo en cuenta factores como la localización geográfica (3.2.1) y características (3.2.2) de la planta tratadora de agua, Humedales artificiales (3.2.3), la vegetación de la zona (3.2.4), las características químicas del agua (3.2.5), la ruta de tratamiento (3.2.6) que realizan las corrientes hídricas, así como también las disposiciones finales (3.2.7) que puede tener dichos flujos al terminar el proceso. Todo lo anterior, con el fin de evaluar la técnica de aguas de riego y su viabilidad de aplicación en un campo colombiano. La recopilación de la información se hace a base de fuentes secundarias y bajo motores de búsqueda como Google Scholar, Researchgate, Science direct, base de datos y documentos corporativos de empresas del sector petrolera, especialmente de Petroleum Development Omán.

2.3 FASE 3: IDENTIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE VARIABLES DE LA ESTRATEGIA DE OMÁN

Se realizó una evaluación detallada sobre los requerimientos y las variables que se deben tener en cuenta a usar en el proceso de tratamiento de aguas producidas por

la extracción petrolera, en lo que concierne a la calidad del agua, condiciones climáticas, tratamiento y uso final del agua. Para ello se quiere implementar y adaptar acertadamente en territorio colombiano la estrategia empleada en el desierto de Nirm Omán con el fin de disminuir el efecto sobre el medio ambiente. La identificación y priorización de las variables son planteadas a partir de una revisión bibliográfica, consulta a expertos y la selección y aplicación de un método estadístico, todo esto con el objetivo de seleccionar rigurosa y adecuadamente las variables para el éxito del presente proyecto.

2.3.1 Metodología para la identificación y priorización de variables.

Actualmente con el avance científico y tecnológico no hay espacio para incertidumbres que se puedan generar a raíz de alguna problemática o riesgo, se conocen dos tipos de incertidumbres, las aleatorias que corresponden a magnitudes físicas o químicas que pueden ser observadas mediante monitoreos o equipos; y la incertidumbre del conocimiento, como su nombre lo indica tienen que ver con el conocimiento, la cantidad y el manejo de la información. Con el fin de disminuir o eliminar dichas incertidumbres existe una herramienta para recopilar de manera exacta la información, denominada matriz de expertos.

La matriz de expertos es un método de validación ampliamente usado en la cual se indagan de forma cualitativa o cuantitativa temas a profundidad o de interés para una investigación, mediante la consulta a un experto donde este aporta desde su experiencia, trayectoria y conocimiento puntual sobre un tema específico, el cual a partir de un contexto real brinda información y evidencia que no se encuentra en datos históricos y son de difícil inclusión dentro de los modelos matemáticos, convirtiéndose en un punto fundamental para reconocer los aspectos más relevantes e importantes brindando fiabilidad, jerarquía y validez ante los criterios que se estudian. (Hurtado, 2012)

Las respuestas de la matriz de expertos surgen a raíz del proceso de observación, aprendizaje y desarrollo del experto dentro del entorno de interés, de manera que este pueda hacer juicios, conjeturas y ajustes sobre el proceso, contradictoriamente esto también se muestra como una limitación, pues el juicio está basado en la mente del experto y lo que este piensa, así como su manera de percibir las cosas a través de su experiencia personal, sus emociones, sentimientos y su conocimiento subjetivo haciendo que el pronóstico se vea afectado por la mente humana. (Hogarth, 1994) (León, 1994).

Cabe resaltar que este método de validación es de importancia para el ajuste, verificación y elaboración de simulaciones, adaptaciones, implementaciones o ajustes a procesos. (Calduch, 2014)

2.3.2 Pasos de la matriz de expertos. Cuando se establece una incertidumbre, se aconseja emplear protocolos formales, de manera estructurada mediante una interacción de un experto con el analista de la situación, tal como lo representa la matriz de expertos.

Concretamente para desarrollar una matriz de expertos se tienen en cuenta una serie de pasos, de manera que se reúna la información necesaria, y se analice de forma óptima en el contexto planteado, tal como se describen a continuación:

- Paso 1: En este primer paso se hace un estudio detallado del tema a tratar, se evalúa si es adecuada la matriz de expertos para resolver incertidumbres planteadas, y se adapta esta herramienta al tema al que se quiere dar solución. Posterior a esto se definen de variables o influencias de las que dependa el problema o el tema a tratar mediante preguntas que serán solucionadas con la ayuda de los expertos las cuales pueden ser implementadas mediante un cuestionario o una entrevista al experto.
- Paso 2: A partir de las variables definidas en el paso 1, se procede a elaborar un cuestionario teniendo en cuenta la claridad de las preguntas, estas pueden ser cerradas o abiertas, con una escala de probabilidades, de opción múltiple etc.
- Paso 3: Una vez se tenga el cuestionario listo, el siguiente paso es seleccionar a las personas expertas que resolverán la incertidumbre planteada, que realmente tengan conocimiento en el tema y que se desenvuelvan en el área de interés, de no ser así se corre el riesgo que la información brindada sea errónea o carezca de importancia, lo que se traduce en una pérdida de costos y tiempo por parte de quien está en búsqueda de información, pues se desean obtener resultados que se ajustan a la realidad del problema que se quiere resolver o al tema del cual se está indagando de manera correcta y asertiva. Existen tres tipos de expertos: especialistas los cuales son buenos conocedores del tema en su mayoría investigadores; generalistas quienes tienen conocimientos del problema general y específicos en alguna de las disciplinas a tratar; y analistas son buenos con la teoría y las probabilidades de algún evento particular.
- Paso 4: Considerando cual es el perfil de los expertos que responderán el cuestionario, se puede establecer una ponderación entre los perfiles de los expertos, en función de los criterios que el investigador requiera o considere importantes, por ejemplo, la opinión del experto que lleva más de 30 años en el área de la temática a tratar tendrá mayor importancia que la de un experto que apenas lleva 5 años en dicha área. Sin embargo, para efectos del presente proyecto, las respuestas de todos los expertos tendrán en mismo peso en el momento de la tabulación de respuestas.

- Paso 5: Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, este paso consiste en aplicar dicha encuesta, bien sea en forma escrita o verbal con el experto, en esta fase se recopila toda la información que conduce a la información que se desea, para comenzar se le explica al experto el contexto general del tema a tratar y el uso que tendrá la información que él pueda brindar, se hace saber al experto que el objetivo es hacer un juicio crítico y preciso y a continuación se hace entrega del cuestionario o se comienza con la entrevista para obtener los resultados.
- Paso 6: Posteriormente se recopila la información obtenida mediante las respuestas de los expertos, descartando los expertos que decidieron no participar del cuestionario.
- Paso 7: En este punto se realiza un análisis de la información obtenida de los cuestionarios, mediante algún modelo de análisis dando a lugar resultados y conclusiones que son extraídas del conocimiento y la experiencia de los expertos, para el futuro manejo de información verídica obtenida. En este punto se pueden obtener tres tipos de resultados: convergentes en las cuales todos los expertos llegan al mismo punto en común, el consenso se da cuando la mayoría de los expertos responde cosas en común pero no son el total de los expertos como en los resultados convergentes y finalmente el desacuerdo, en el que los expertos opinan de manera diferente y no es posible llegar a un consenso o convergencia, dadas las opiniones divididas de los expertos.

Entre algunas recomendaciones de este método se encuentran, brindar toda la información relevante, identificar y minimizar los sesgos que el experto pueda presentar, definir y explicar el tema a evaluar con total claridad sin presentar confusiones o ambigüedades en el texto, además de vigilar la coherencia del experto en sus respuestas, y finalmente realizar una explotación y verificación de la información obtenida por los expertos. También es importante que el experto argumente y describa las razones de sus respuestas, pues esto contribuye al buen manejo de la información evitando la sobre confianza del experto permitiendo obtener resultados confiables.(Calduch, 2014)

2.3.3 Tipos de sesgo. Un punto importante para tener en cuenta son los posibles sesgos que se puedan presentar por parte de los expertos, entre los cuales se encuentran sesgos por conocimiento y sesgos motivacionales los cuales son descritos en detalle a continuación:

Por un lado, están los sesgos motivacionales están relacionados directamente al experto, y su objetividad al responder al cuestionario donde podemos encontrar: (Ibañez, Lantarón, & Bolado , 1999)

- Sesgo de conflicto de intereses: su causa principal es porque el experto se ve comprometido a dar una opinión beneficiosa, si el experto recibe parte o la mayoría de los ingresos por parte de quien solicita la matriz de expertos, también se da cuando su veredicto afecta su situación actual o la de algún conocido con el fin de sacar provecho de la situación.
- Sesgo de gestor: sucede cuando el experto no analiza la situación en general sino se enfoca en un solo parámetro, dejando a un lado la incertidumbre que se desea resolver.
- Sesgo de conservadurismo: puede ser descrito de dos maneras, una en la que el experto prefiera ser conservador en el parámetro, o por el contrario extender el rango del parámetro, evidentemente en juntos casos el experto se deja llevar y no es preciso en sus respuestas.
- Sesgo de experto: Se da cuando el experto siente que va a decepcionar a quienes lo han elegido para resolver el cuestionario si no sabe algo, por lo cual siente que debe responder todo, dejando de responder de manera objetiva.

Por otro lado, están los sesgos de conocimiento, y estos hacen referencia al manejo de la información, están divididos de la siguiente manera:

- Sesgos por fuentes de información: los resultados pueden verse afectados por la selección, la confiabilidad y robustez de algunos datos erróneos o fuera de contexto, por lo cual analizar profundamente la información es un punto crítico en el correcto desarrollo de la encuesta. Este tipo de sesgo se encuentra marcado por dos pautas, la primera es la interpretación errónea de la fiabilidad y la consistencia, y la otra es las diferentes interpretaciones que se le puede dar a la información de acuerdo con la manera en la que se presenta, Afectando directamente los resultados y la futura toma de decisiones.
- Sesgos por interpretación casual del mundo: está caracterizado por que el experto busca dentro de su conocimiento problemas similares al planteado, por lo cual trata de hacer semejanzas entre el proceso actual y alguna experiencia pasada, con el fin de buscar una solución y tratar de predecir cuál será el mejor panorama, buscando causas y soluciones dejando de lado las respuestas objetivas de lo que se le pide, además de hacer un pronóstico que puede ser errado o no aplicable al contexto.(Bolado et al., 1999)

2.3.4 Métodos estadísticos de análisis multicriterio. En esta sección se describen y los posibles métodos de análisis multicriterio se selecciona un método y se aplica para los resultados obtenidos a partir de la matriz de expertos desarrollados en la sección anterior.

Para poder tomar una decisión sobre un proceso debe existir un objetivo con diferentes soluciones, para seleccionar la mejor alternativa, dicha decisión debe ser tomada de manera racional y sistémica. La toma de decisiones a partir del análisis multicriterio es una herramienta de apoyo, la cual permite reunir diferentes criterios de acuerdo con la opinión de actores para dar una visión completa de la solución y hacer clara la toma de decisiones.

El análisis multicriterio es ampliamente usado por su facilidad para describir, seleccionar, jerarquizar e identificar variables de un problema o proceso, reconocer el peso de cada variable pues no todas afectan de la misma manera el resultado final o proceso, identificar los vínculos entre las variables y finalmente propone una solución racional de toma de decisiones escogiendo la mejor alternativa.

2.3.5 Tipos de análisis multicriterio. A continuación, se describen los principales métodos de análisis multicriterio, junto con sus ventajas y desventajas.

- **Modelo de utilidad Multiatributo:** este método está diseñado para obtener la utilidad de alguna alternativa que tiene más de un parámetro importante y deben ser evaluados en diferentes criterios, funciona de acuerdo con una ponderación en la cual se agrega una utilidad a cada parámetro, con el objetivo de conseguir una utilidad general para cada alternativa.
- **Ponderación Lineal (scoring):** es un método fácil y muy utilizado se basa en construir una función de valor para cada parámetro, permite manejar bajos niveles de información y manipular las alternativas de acuerdo al peso asignado a cada parámetro.
- **Relaciones de superación:** busca comparar dos alternativas parámetro a parámetro, donde se construye un coeficiente de concordancia y de esta manera escoger la mejor alternativa o solución.
- **Proceso de análisis jerárquico:** como lo indica su nombre, busca soluciones a partir de un modelo jerárquico, estructurando el problema en forma visual, permitiendo la comparación entre cada nivel de este para posteriormente agregarle valores numéricos a las respuestas de cada experto, logrando medir como contribuye cada parámetro en la solución final, también se pueden interpretar los cambios que pueden surgir a partir de cada parámetro.
- **Maximin:** trabaja en un entorno pesimista, es decir escoge las valoraciones más bajas de todos los parámetros, y a partir de esto escogemos el más alto de los peores y de esta manera se escoge la solución, no es tan fiable pues no se tienen en cuenta los demás resultados ni interacciones entre los parámetros.

- **Maximax:** funciona bajo el mismo esquema de maximin, diferenciándose en que este es un aspecto positivo, es decir de todos los parámetros se escogen los más altos y la solución es el más alto de estos valores seleccionados, al igual que maximin, puede llevar al sesgo al no tener en cuenta las demás alternativas.
- **Regime:** Se caracteriza por ser un método discreto de análisis cualitativo, donde se analiza cada parámetro y se le asigna un peso y de esta manera poder medir el efecto y la importancia de cada parámetro, respecto a las diferentes alternativas que se están evaluando.

2.3.6 Descripción del método seleccionado. En este caso se toma en cuenta un modelo que permita la interpretación de variables cualitativas debido al desarrollo de la matriz de expertos, en el cual se puedan jerarquizar las respuestas obtenidas con el fin de visualizar claramente cual alternativa es mejor, para lo cual el modelo escogido es Regime el cual surge a partir de dos datos de entrada: un grupo de pesos y una matriz de expertos y tiene una salida de una alternativa dada de la organización recolectada. Este método se lleva a cabo calculando los pesos de las correspondientes variables correspondientes a cada atributo, donde se hace una sumatoria de dichos pesos y finalmente se escoge aquella alternativa que tenga la puntuación más alta, permitiendo que se puedan jerarquizar los modelos independientemente de la unidad de medida, unidas a un criterio global. (La Paix, Eugenia López-Lambas, & Eugenia , 2010)

2.3.7 Cuestionario. Se realiza una matriz de expertos donde son tomadas en cuenta las opiniones de conocedores del sector petrolero con énfasis en temas ambientales, con el propósito de tener el contexto claro y tener una mejor visión sobre lo que pasa día a día en el campo petrolero, dado que el experto tiene una aproximación muy cercana a problemáticas y retos a los que se enfrenta una petrolera colombiana, de tal manera obtener como resultado un comparativo con el desierto de Nirm Omán, y ajustar de manera satisfactoria el modelo planteado.

El instrumento es un cuestionario mostrado en el Anexo A, donde inicialmente se hace una descripción de la planta de tratamiento de Nimr, con algunas características y puntos clave en el proceso de dicha planta. En relación con esto se les pide a diez expertos que respondan de manera objetiva el cuestionario que consta de tres preguntas, dos de ellas con opción múltiple y una pregunta abierta, descritas a continuación:

- La primera pregunta consiste en que el experto según su criterio evalué cual sería el orden de prioridad que daría a aspectos tales como: Calidad del agua, plántulas de tratamiento en un humedal artificial, condiciones climáticas, sistemas adicionales de tratamiento de agua y uso final del agua; calificando dichos aspectos de 1 a 5, siendo 5 como el parámetro más importante y 1 para el de

menor importancia; con la finalidad de resaltar el aspecto más importante para los expertos.

- La segunda pregunta abarca la interacción entre cada variable respecto a las demás descritas en la primera pregunta, se le pide al experto que califique dichas interacciones de la siguiente manera: 1 Nada de interacción, 2 Interacción débil y 3 Interacción fuerte; con el objetivo de identificar cual es la interacción que el experto considera más importante.
- La tercera y última pregunta es abierta, donde se desea saber por parte del experto si hay alguna variable adicional que el considere importante y no esté descrita anteriormente para la implementación satisfactoria de un humedal artificial en un campo petrolero en Colombia.

2.3.8 Metodología de Selección de expertos. Para la selección de expertos se consideró que fueran profesionales, adicional a esto se eligieron varias profesiones con el fin de obtener unas respuestas significativas en cada área de interés tales como química, biología, petróleos entre otras. Fue importante que al menos la mitad de los encuestados tuviera algún tipo de posgrado, entre los que se encuentran especializaciones, maestrías y doctorados

2.4 FASE 4: VARIABLES PARA PROMOVER LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL, ECONÓMICA Y SOCIAL DE LA ESTRATEGIA DE AGUA DE PRODUCCIÓN ADAPTADA A UN CAMPO COLOMBIANO

Se realizó una descripción detallada de cada una de las variables que representan mayor grado de importancia según los resultados obtenidos mediante la matriz de expertos entre las cuales se encuentran la calidad del agua (3.4.1) y el uso de la misma, junto con diferentes elementos financieros (3.4.2) y sociales (3.4.3)

2.5 FASE 5: ESTRATEGIA PARA EL USO SOSTENIBLE DE AGUA DE PRODUCCIÓN PARA RIEGO DE SUELOS EN UN CAMPO COLOMBIANO

De acuerdo a lo desarrollado a lo largo del presente proyecto se establece la estrategia para el uso sostenible de agua de producción para riego de suelos en el Campo Castilla mediante el desarrollo de un humedal artificial para el cultivo de caña de azúcar tomando como referencia la experiencia de un campo de Omán; logrando identificar la viabilidad de dicho proyecto teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la región donde se ubica el campo colombiano la cual presenta una temperatura media de 25-27°C siendo esta la más adecuada para una mayor producción; asimismo la calidad del agua y el tipo de suelo son óptimos para el desarrollo de este proyecto teniendo en cuenta que se deben evaluar posibles tratamientos previos del agua de producción con el fin de alcanzar los límites permitidos para un agua de riego según la normatividad colombiana; de igual forma

se debe tener presente que los cultivos de caña de azúcar afectan rápidamente las condiciones de suelo por el alto requerimiento de nutrientes siendo necesario un programa adecuado de fertilización.

Se consideró en análisis de variables técnico – Económicas (3.5.1), sociales (3.5.2) y Ambientales (3.5.3).

3 MARCO TEÓRICO

Para desarrollar el presente proyecto, se requiere realizar una contextualización del sector petrolero a nivel mundial y en Colombia con el objetivo de comprender el impacto que puede generarse de un estudio de uso sostenible del agua de producción de los campos petroleros, por ende, se realiza una introducción, la revisión de cifras y campos de producción de hidrocarburos, derivados del recurso fósil, generalidades del sector económico del petróleo en Colombia, normatividad Colombiana referente al sector y finalmente descripción de las principales cuencas del país relacionadas con la producción petrolera.

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR PETROLERO MUNDIAL

El petróleo y sus derivados son recursos energéticos importantes puesto que juegan un papel crucial en la economía mundial al ser materia base del funcionamiento de la mayoría de los sectores productivos. Para cumplir dicho objetivo la cadena de suministro de la industria petrolera comprende operaciones de exploración, explotación, perforación, producción, transporte, procesamiento, almacenaje, refinación, venta y distribución (Rubio, 2016).

Sus aplicaciones se observan en sectores como el transporte en material carburante, el doméstico en combustibles (Gas Licuado de Petróleo, gasóleo, entre otros), el industrial como combustibles, fueloil y otros, la industria petroquímica como materia prima de otros productos tales como plásticos, detergentes, fertilizantes, colorantes, caucho sintético, productos farmacéuticos, entre otros (Dirección General de Industria Energía y Minas, 2002)

En función de la caracterización del sector petrolero es necesario conocer la producción de hidrocarburos por países, así como los principales campos y empresas productoras; sus problemáticas ambientales, sociales y económicas; los derivados y su relación de oferta y demanda; los cuáles son descritos a lo largo del presente capítulo.

3.1.1 Cifras de producción. Los países con mayor producción petrolera están ubicados en su mayoría en el oriente medio, debido al tipo de yacimiento, es decir, sus condiciones de almacenamiento y generación de petróleo. Arabia Saudita junto con países como Kuwait, Irak, Irán y los Emiratos Árabes Unidos han sido en la denominación de “El Golfo Pérsico”, en donde se encuentran las dos terceras partes de reserva petrolera mundiales (López A. , 2008) . Al respecto, la **Tabla 1** presenta los 12 países con mayor producción petrolera en el mundo y su porcentaje en relación con la producción mundial total.

Tabla 1. Campos Petroleros de mayores reservas recuperables de Petróleo.

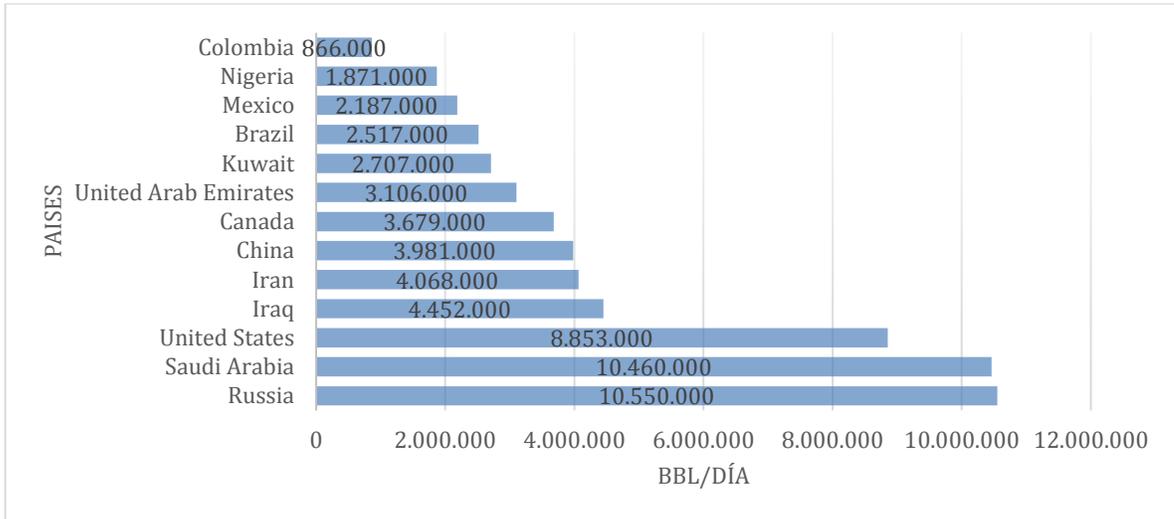
Posición	País	Producción de Petróleo (bbl/día)	% Producción
1	Rusia	10.550.000	12,87
2	Arabia Saudita	10.460.000	12,76
3	Estados Unidos	8.853.000	10,80
4	Iraq	4.452.000	5,43
5	Irán	4.068.000	4,96
6	China	3.981.000	4,86
7	Canadá	3.679.000	4,49
8	Emiratos Árabes Unidos	3.106.000	3,79
9	Kuwait	2.707.000	3,30
10	Brasil	2.517.000	3,07
11	México	2.187.000	2,67
12	Nigeria	1.871.000	2,28

Fuente: Elaboración propia basado en información obtenida de Indexmundi, 2017.

Cabe resaltar de la tabla anterior que los 3 países con mayor producción de hidrocarburos son Rusia, Arabia Saudita y Estados Unidos quienes en conjunto superan el 35% de la producción. Sin embargo, es necesario conocer que los datos analizados no están relacionados con la calidad del hidrocarburo producido ni tampoco con sus porcentajes o volúmenes de exportación, información que será evaluada más adelante.

Es necesario establecer un punto de referencia de estos países productores de petróleo con el caso Colombiano, que es donde se establece la evaluación del presente proyecto. En el año 2017, Colombia ocupó el lugar número 23 en producción petrolera, con una participación de 1,06% de toda la producción de barriles de petróleo a nivel mundial. En la **Gráfica 1**, se observa la cantidad de barriles producidos de los primeros 12 países petroleros del mundo de manera descendente, con Colombia como punto de referencia para analizar el desarrollo de la economía mundial en términos de producción de hidrocarburos.

Gráfica 1. Estadísticas de países productores petroleros y Colombia.



Fuente: Elaboración propia basado en datos de Indexmundi, 2016.

Colombia es un país que cumple con sus requerimientos de demanda energética por combustible fósil. Sin embargo, a partir de los análisis realizados por el Marco Fiscal de Colombia en cuanto a las reservas vigentes, se sabe que la tasa de agotamiento del recurso, las inversiones en ejecución que desarrolla el país, las proyecciones de recobro mejorado por yacimientos no convencionales y nuevos proyectos en desarrollo, puede estimarse para el año 2026 una tendencia a la baja debido a una proyección promedio de 723 Miles de barriles promedio día (Marco Fiscal de Mediano Plazo. MFMP, 2016), con lo cual puede verse en riesgo la autosuficiencia Colombiana, generando la necesidad de la mejora del factor de recobro, la compra o importación de combustible fósil.

3.1.2 Principales campos y productores. A nivel mundial existen mega campos petroleros, que se encargan no solo de satisfacer las demandas petroleras internas de los países a los que le pertenecen, sino que también permiten potencializar los mercados internacionales con la venta del combustible fósil, es decir, tanto crudo como gas natural. Estos Campos petroleros en orden de cantidad de reservas recuperables de petróleo son descritos en la **Tabla 2:**

Tabla 2. Campos Petroleros de mayores reservas recuperables de Petróleo.

CAMPO	PAÍS	RESERVAS RECUPERABLES (MMb*)
Ghawar	Arabia Saudita	83.000
Burgan	Kuwait	72.000
Cuenca Somera Mesopotámica	Kuwait	72.000
Tengiz	Kazakhstan	40.000
Costero Bolívar	Venezuela	32.000
Prudhoe Bay	Alaska, USA	25.000
West Qurna	Irak	21.000
Cantarell	México	18.000
Romashkino	Rusia	17.000
Rumailia	Irak	17.000

*MMb: Millones de Barriles

Fuente: Elaboración propia basado en “Los 10 Campos petroleros más grandes del mundo” de Miningpress, 2015. EnerNews.

De acuerdo a la tabla anterior los campos con más reservas recuperables se encuentran en Arabia Saudita y Kuwait, lo que permite inferir los potenciales petroleros de estos países para mantener la economía del oro negro vigente, así mismo, es necesario resaltar que la calidad de los crudos de estos campos petroleros son diversos entre sí, factor que no será analizado en este punto del proyecto.

En el sector petrolero el indicador dominante para observar y analizar la capacidad de producción son las reservas, debido a que se convierten en la base de confianza y credibilidad del negocio, que llevan a obtener los fondos necesarios para ejecutar los proyectos de recuperación de hidrocarburos e iniciativas innovadoras que den respuesta al crecimiento de la demanda (Rodríguez, 2013). Así mismo, estos campos son operados por empresas petroleras que se encargan de llevar el hidrocarburo desde fondo hasta la superficie, dando el respectivo tratamiento, para su comercialización. En la **Tabla 3** se presentan algunas de las principales empresas petroleras en relación a sus volúmenes de producción de crudo.

Tabla 3. Empresas con mayor volumen de petróleo producido.

EMPRESA	VOLUMEN DE PRODUCCIÓN PETRÓLEO (mbpce*)
Saudí Aramco	12
Gazprom	8.3
National Iranian Oil Co	6
Exxon Mobil	4.7
PetroChina	4
BP	3.7
Royal Dutch Shell	3.7
Petróleos Mexicanos	3.6
Kuwait Petroleum	3.4
Chevron	3.3
Abu Dhabi Nacional Oil	3.1
Total	2.5
Petrobras	2.4
Qatar Petroleum	2.4

*mbpce: miles de barriles equivalentes de crudo

Fuente: Recuperado de “Las 21 empresas petroleras más grandes del mundo” de Christopher, H, 2015. Revista Forbes.

De la Tabla 3 se puede resaltar que la empresa más grande a nivel mundial es Saudí Aramco, lo cual tiene relación con la presencia de esta organización en Medio Oriente principalmente y el reporte de los mega campos petroleros en la zona, por ello es evidente la relación de que a mayor cantidad de reservas recuperables la actividad de una empresa petrolera será mayor.

Es necesario resaltar que la industria petrolera cada día es más inestable, debido a que en la medida que se va explotando recursos convencionalmente, se disminuye la cantidad de reservas disponibles en los yacimientos, por lo que es necesario buscar nuevas estrategias tanto técnica como económicamente viables, que permitan mantener el mismo o mayor volumen de hidrocarburos producidos en superficie, garantizando la seguridad energética del país. Sin embargo, para ello es obligación tener inversiones para el desarrollo de estas iniciativas y dar respuesta a los desafíos propios de la operación.

3.1.3 Problemáticas ambientales, sociales y económicas. La evolución y crecimiento de la humanidad, ha estado ligado al modelo energético que ha traído el petróleo consigo, es decir, en el uso de combustibles fósiles. Aplicaciones como fertilizantes, pesticidas, productos petroquímicos para el cultivo de alimentos, asfaltos y plásticos, productos farmacéuticos, prendas de vestir diseñadas con fibras sintéticas, combustibles para medios de transporte, electricidad, calefacción e iluminación, entre otros, tienen como base los hidrocarburos (Rifkin, 2012). Por ende el petróleo afecta todo el sistema de desarrollo, la supervivencia de la humanidad y con ello su entorno, dada la falta de implementación de planes de manejo así como el control en las operaciones y actividades involucradas en esta industria, generando problemáticas de tipo ambiental, social y económico.

El sistema social y político de un país se ve impactado por la explotación y producción de petróleo, generando situaciones como las divisiones en los poderes, aumento de la deuda externa y afectación del presupuesto del Estado por la caída de precios del barril, dado el importante aporte del sector energético, particularmente por el petróleo, a los ingresos del estado (Díaz, 2015).

Dentro de este contexto es considerado obligación de un estado con producción petrolera incluir en su plan de gobierno políticas para el sector de hidrocarburos, que fomenten el desarrollo económico del país, el bienestar de la ciudadanía y la protección del medio ambiente, priorizando el bienestar de aquellas personas que se ven directamente afectadas por la operación de estas compañías.

3.1.4 Derivados del petróleo. El petróleo es el combustible más importante del mundo, debido a que aporta el mayor porcentaje de energía que se consume diariamente por las actividades de los seres humanos. Este recurso natural no renovable consiste en una mezcla de hidrocarburos, presentes en yacimientos subterráneos de los estratos superiores de la corteza terrestre (Díaz, 2015).

Los productos derivados del petróleo crudo, se obtienen de un proceso de refinación denominado craqueo (ruptura de moléculas), por el cual, a partir de altas temperaturas y presión, se obtienen compuestos de hidrocarburos de composición más simple, para posteriormente producir gasolinas de alto octanaje, aceites combustibles livianos y gases ricos en olefinas.

En este proceso los compuestos pesados se obtienen por fondos debido a su elevado punto de ebullición, mientras que los materiales que cuentan con menor punto de ebullición conocidos como compuestos livianos se recuperan en forma de vapor por la cima de la torre o columna.

Entre los principales derivados se encuentran: gases, éter de petróleo, gasolinas y naftas, queroseno, gasóleos y fuelóleos (Repsol YPF, 2002).

3.1.5 Tasa de crecimiento del sector frente a la demanda. El petróleo domina en gran medida la economía mundial, al aportar el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo, indispensable para el sector productivo (Rubio, 2016).

Sin embargo, existe un gran desequilibrio en el mercado a tener una oferta superior a la demanda mundial, la cual se debe en gran medida al consumo de otras fuentes energéticas más económicas que sustituyen el petróleo, como lo son el carbón y el gas natural, así como la implementación de energías renovables con niveles de contaminación casi nulas sobre el medio ambiente como lo son la energía solar, eólica, geotérmica, mareomotriz y biomasa (Rifkin, 2012). Estas alternativas han cobrado mayor importancia debido a la toma de conciencia con respecto a los fenómenos naturales causados por el cambio climático global, los cuales se presentan cada vez más con mayor intensidad, frecuencia e impacto.

3.2 SECTOR PETROLERO EN COLOMBIA

En Colombia, la industria de hidrocarburos representa el 23% del promedio de los ingresos (Peñaloza, 2017). Sin embargo, el sector ha venido presentando fuertes crisis que han impactado altamente la economía del país.

Un estudio revelado por la Contraloría General expone que la producción de petróleo, es insuficiente para abastecer las refinerías en 2021, lo que podría implicar que no haya autoabastecimiento (Contraloría, 2017), colocando al país en un escenario en el cual perdería una de sus principales fuentes de ingreso.

Frente a la optimización de los procesos el Acuerdo 02 de 2017 de la Agencia Nacional de hidrocarburos, que establece el nuevo procedimiento para la asignación de áreas de exploración y explotación de hidrocarburos, mejorando de esta manera la competitividad del sector (Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH, 2017).

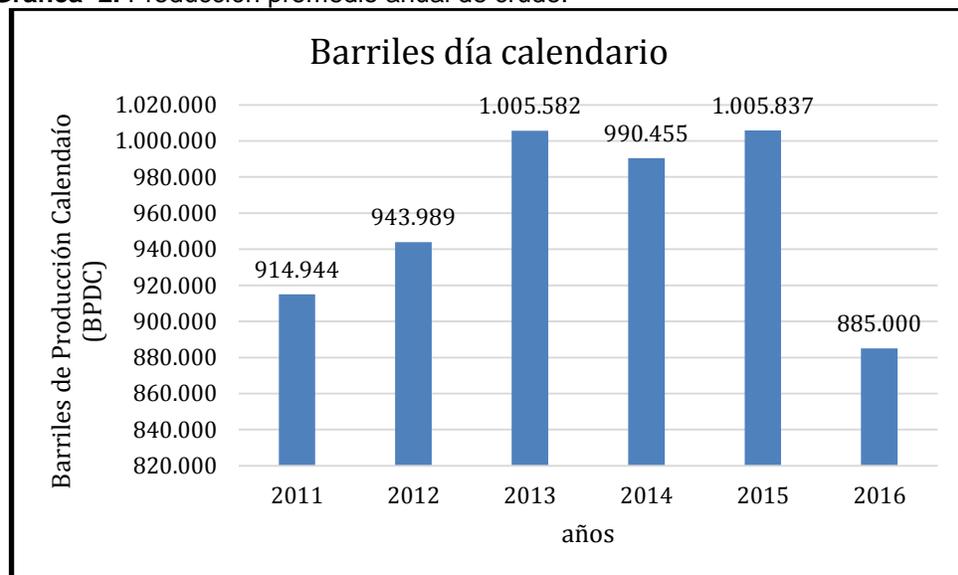
Igualmente, la implementación eficiente y responsable de tecnologías como perforación costa afuera (Offshore), recobro mejorado y yacimientos no convencionales permitirían encontrar un panorama más favorable para el desarrollo de la industria petrolera en el país.

Finalmente, es importante resaltar que el sector de hidrocarburos en Colombia se encuentra en constante desarrollo, para optimizar sus procesos en relación con la operación, producción y exportación; de manera que permita aumentar la rentabilidad de las compañías petroleras.

3.2.1 Cifras de producción. Colombia es el cuarto productor de petróleo en Iberoamérica, ubicándose después de Venezuela, Brasil y México, los cuales ocupan los 3 primeros puestos respectivamente. Sin embargo, en términos de exportación, Colombia, lleva el primer lugar a nivel de Sudamérica, superando a Venezuela, debido a que el uso de petróleo internamente en el país es menor que en otros de la región. (The World Factbook, 2018).

Del 2015 al 2016 la producción de hidrocarburos en Colombia disminuyó en un 12%, pasando de 1.005.837 barriles promedio a 885.000 barriles (Gráfica 2), siendo esta la producción más baja registrada en los últimos 5 años. Lo anterior debido a la disminución de reservas convencionales en el país y la no inversión en procesos no convencionales hasta el momento. Para el 2018, la producción de crudo promedio en Colombia fue de en 858.000 Barriles por día - BPD (ANH, 2018).

Gráfica 2. Producción promedio anual de crudo.



Fuente: Recuperado de Agencia Nacional de Hidrocarburos, Asociación colombiana de Petróleo, 2016

Como se observa en el Gráfico 2, el año 2013 y 2015 han sido los de mayor producción petrolera en Colombia con valores superiores al millón de barriles diarios, generando una preocupación para el año 2016, en donde la producción cae notablemente a 885.000 Barriles, dando una tendencia a la baja que requiere de una urgente inversión para potenciar la generación de hidrocarburos.

De otro lado y complementando con la información descrita anteriormente, en Colombia para el año 2015 la participación del sector petrolero en las exportaciones totales era del 40%. Sin embargo, para el año 2016 este porcentaje disminuyó en

un 7%, llegando a una participación del 33%, tendencia a la baja que es proyectada para el 2017 en un porcentaje de incluso el 20% de las ventas al exterior para todo el sector petrolero (Superintendencia de Sociedades, 2017).

3.2.2 Aporte del sector de hidrocarburos al Producto Interno Bruto – PIB-colombiano. El Producto Interno Bruto - PIB, definido como el valor total de la producción de todos los bienes y servicios de un país en un periodo de tiempo determinado, se toma como un indicativo del desempeño económico del mismo.

El sector de hidrocarburos es uno de los más productivos del país en tema de generación de divisas y de ingresos, aportando el 18% del PIB para el 2011 (Martínez , 2012). Para el año 2016 el aporte al PIB disminuyó a un 11,1% como resultado de una reducción en la producción de crudo. Sin embargo, es importante resaltar que para el periodo 2010-2017 se generó un incremento del 65% en la producción diaria de crudo, al producir más de 920.000 barriles por día en promedio en el rango de los 7 años especificados, gracias también al aporte de la exploración costa afuera en el Caribe (Monterrosa, 2018).

Adicionalmente, la industria del petróleo genera aproximadamente 95.000 empleos de tipo directo e indirecto, aportando de manera significativa en el desarrollo y crecimiento de la economía colombiana. Esta industria basa su operación en actividades de producción, exportación e importación, así mismo en subsectores de ingeniería, extracción de petróleo crudo, gas natural y otros combustibles fósiles, comercio de hidrocarburos y lubricantes, obtención y comercialización de derivados del petróleo y gas, entre otros (Superintendencia de Sociedades, 2017).

3.2.3 Empresas de mayor producción en Colombia. A continuación, se mencionan las principales empresas petroleras en Colombia medidas por producción diaria de hidrocarburos de forma descendente.

El primer lugar en producción es para Ecopetrol, cuya participación llega al 36% con una producción promedio de 322.718 Barriles de crudo por día.

La petrolera Meta Petroleum Limited, la cual opera los campos petrolíferos Quifa y Cajua en la cuenca de los Llanos Orientales, ocupa el segundo lugar con una producción promedio de 195.930 BPD.

Occidental de Colombia, con una producción de 74.161 BOPD se ubica en el tercer puesto, operando el campo Caño Limón en la cuenca Llanos Norte ubicada en el departamento de Arauca y la cuenca Magdalena Medio ubicada en el departamento de Santander (Revista Dinero, 2011).

Los campos que continúan registrando los mayores niveles de producción diaria son: Rubiales y Castilla (Meta), Caño Limón (Arauca), Quifa (Meta), La Cira Infantas (Santander), Chichimene (Meta) y Rancho Hermoso (Casanare).

3.2.4 Marco Normativo del Proyecto. Algunas disposiciones regulatorias vigentes aplicables a la operación y actividades de gran impacto ambiental del sector de hidrocarburos son:

- Constitución Política de Colombia: Artículo 8. “Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación” (Asamblea Nacional Constituyente, 1991)
- Constitución Política de Colombia: Artículo 80. “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados”
- Constitución Política de Colombia: Artículo 95. En relación al presente artículo y lo concerniente al sector petrolero es deber del colombiano enaltecer, engrandecer y dignificar a todos los miembros de la comunidad nacional, reconociendo los derechos y libertades de la Constitución teniendo las principales responsabilidades de:
 - ✓ Respetar los derechos ajenos y no abusar de los propios.
 - ✓ Obrar conforme al principio de solidaridad social, respondiendo con acciones humanitarias ante situaciones que pongan en peligro la vida o la salud de las personas.
 - ✓ Participar en la vida política, cívica y comunitaria del país.
 - ✓ Proteger los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano.
 - ✓ Contribuir al financiamiento de los gastos e inversiones del Estado dentro de conceptos de justicia y equidad.
- Decreto 1728 de 2002. Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre la Licencia Ambiental. (Ministerio del Medio Ambiente, 2002)

- Decreto 155 de 2004. Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones. (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2004)
- Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010)
- Decreto 1640 de 2012. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2012)
- Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015)
- Normatividad de la Gestión sostenible del Suelo: A continuación, se describirá la Normatividad Colombiana relacionada con la gestión sostenible del suelo, la cual busca promover el manejo sostenible del mismo en Colombia en un contexto donde converja la conservación de la diversidad, el agua y el aire, el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo aportando al desarrollo sostenible y al bienestar de la población colombiana. (MINAMBIENTE, 2016). Tomando como referencia el informe presentado por el ministerio de ambiente titulado “políticas para la gestión sostenible del suelo” algunas de las normas que están relacionadas con la gestión sostenible del suelo son:
 - ✓ Constitución Política de Colombia: el capítulo 3 de la constitución plantea los derechos colectivos y del medio ambiente estableciendo que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente sano garantizando la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo y garantizando un desarrollo sostenible.
 - ✓ Ley 2 de 1959: esta ley plantea la política de bosques basándose en la economía forestal de la nación y conservación de recursos naturales renovables (Congreso de Colombia, 1959)
 - ✓ Ley 23 de 1973: mediante esta ley se concede al presidente de la república facultades extraordinarias para expandir el código nacional de los recursos naturales y de protección al medio ambiente, el cual se presenta en el decreto Ley 2811 de 1974. (Congreso de Colombia, 1973)

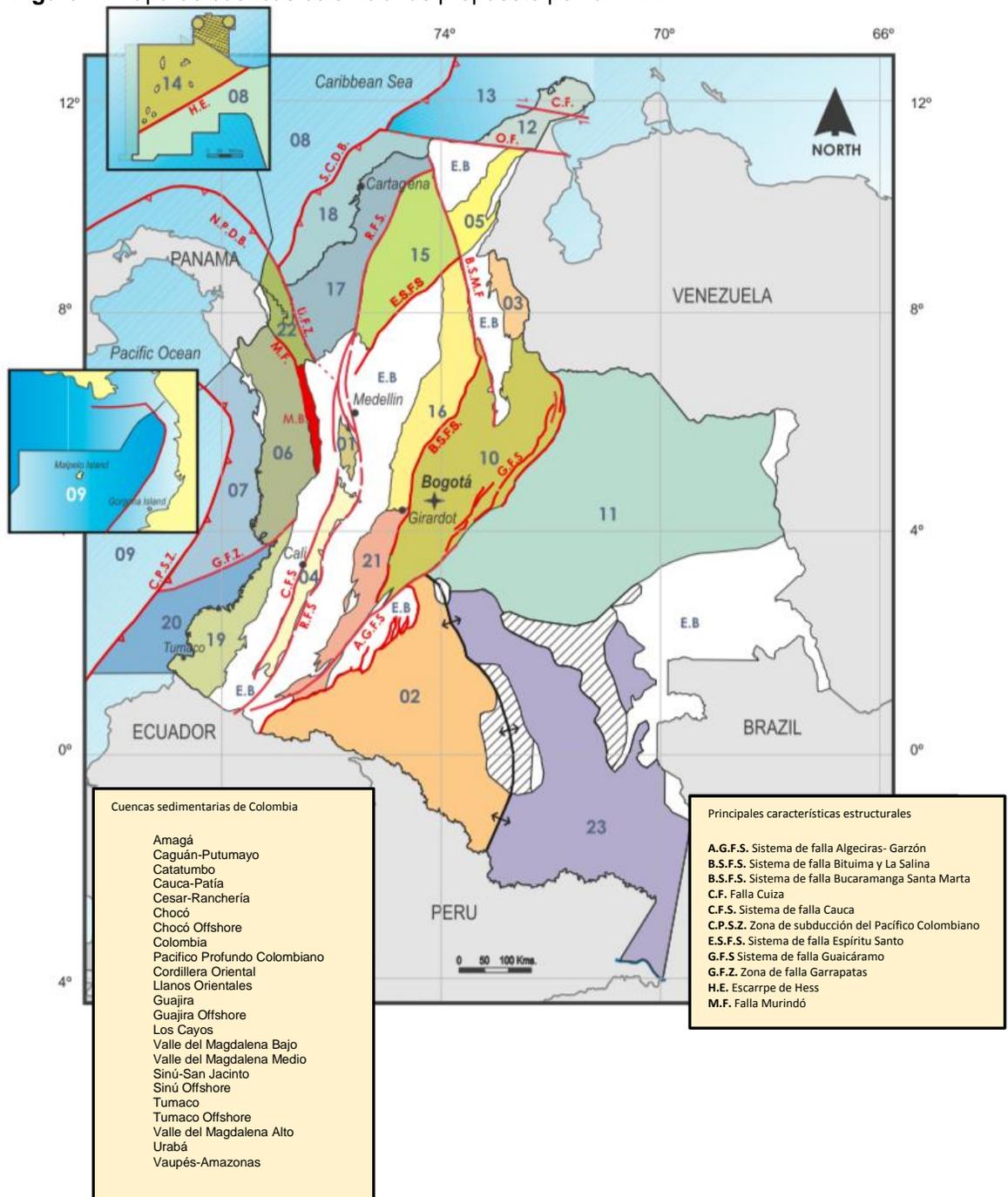
- ✓ Ley 9 de 1989: mediante esta ley se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, compraventa y expropiación de bienes y se dictan otras disposiciones. (Congreso de Colombia, 1989)
- ✓ Ley 99 de 1993: esta ley reordena el sector público el cual se encuentra encargado de la gestión de los recursos naturales renovables, organiza el sistema nacional ambiental y se crea el ministerio de medio ambiente. (Ministerio de medio Ambiente, 1993)
- ✓ Ley 685 de 2001: esta ley presenta el código de minas planteando la reglamentación del uso del suelo en actividades del sector minero. (Ministerio de Medio Ambiente, 2001)
- ✓ Ley 1454 de 2011: mediante esta ley se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifican otras disposiciones. Esta ley plantea que es competencia del municipio reglamentar los usos del suelo en áreas urbanas y rurales de acuerdo con las leyes. (Congreso de Colombia, 2011)
- ✓ Ley 1523 de 2012: mediante esta ley se adoptan la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres. (Congreso de Colombia, 2012)
- ✓ Ley 2551 de 2012: mediante esta ley se dictan normas con el fin de modernizar la organización y el funcionamiento de los municipios con el fin de garantizar un uso eficiente del suelo. (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2012)
- ✓ Ley 1625 de 2013: mediante esta ley se expide el régimen para áreas metropolitanas planteando diferentes parámetros que garanticen la gestión del suelo. (Congreso de Colombia, 2013)
- ✓ Ley 1753 de 2015: mediante la presente ley se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “todo por un nuevo país”. (Congreso de Colombia, 2015)

3.3 CUENCAS SEDIMENTARIAS EN COLOMBIA

De acuerdo a la nueva propuesta de la ANH, bajo la cual se desarrollan los proyectos petroleros en Colombia, el territorio colombiano se divide en 23 cuencas sedimentarias, como se observa en la Figura 1: Amagá, Caguán-Putumayo, Catatumbo, Cauca-Patía, Cesar-Ranchería, Chocó, Chocó Offshore, Colombia, Pacifico Profundo Colombiano, Cordillera oriental, Guajira, Guajira Offshore, Los Cayos, Valle del Magdalena Bajo, Valle del Magdalena Medio, Sinú-San Jacinto, Sinú Offshore, Tumaco, Tumaco Offshore, Valle del Magdalena alto, Urabá,

Vaupés-Amazonas y la cuenca de los Llanos orientales, la cual es objeto de estudio del presente proyecto.

Figura 1. Mapa de cuencas colombianas propuesto por la ANH.



Fuente: Recuperado y adaptado de “Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology”, a New Proposal, de ANH, 2007.

De la Figura 1 se destaca la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, será el objeto de estudio del presente proyecto y para el cual se requiere la descripción detallada de la misma, que se encuentra en los siguientes apartados.

3.3.1 Generalidades de la Cuenca Sedimentaria de los Llanos Orientales. La cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, es considerada como la cuenca de hidrocarburos más prolífica.

Es una depresión topográfica plana, de orientación suroeste - noreste, con alturas que oscilan entre 200 y 500 metros. Sus límites geomorfológicos son la cuenca Apure - Barinas, al norte; la Serranía de La Macarena y el Arco del Vaupés, al sur; el sistema de fallas de Guaicáramo y la Cordillera Oriental, al oeste; y el Escudo de Guyana, al este. Está recubierta, en gran parte, por rocas del Terciario Superior y Cuaternario (Ecopetrol, 2002).

El límite entre las Cordilleras y los Llanos Orientales, se conoce como el piedemonte Llanero, el cual cuenta con sistemas de fallas antitéticas que permite generar grandes acumulaciones de petróleo, por ello, este sector es considerado como altamente productivo (ANH, 2012).

Desde el punto de vista ambiental, la región de los llanos cuenta con una gran biodiversidad y diferentes ecosistemas estratégicos, dentro de los cuales se han identificado 154 diferentes tipos de ecosistemas prioritarios para la protección y conservación. En este sentido, el desarrollo de actividades productivas como la ganadería, la agricultura y la explotación petrolera, deben considerar desde su planeación y desarrollo la altísima sensibilidad de la región en lo que a la dimensión ambiental se refiere (MADS, 2012).

3.3.2 Caracterización del agua y estrés hídrico. El agua es uno de los recursos naturales vitales más importantes para la humanidad, no solamente como materia prima de diversos sectores industriales e incluso como motor económico de una sociedad, sino también, para la supervivencia de las especies, incluyendo la humana.

El uso y consumo insostenible del agua, las complejidades de su manejo y el cambio climático han derivado en una disminución en la disponibilidad de este recurso hídrico, lo cual impacta negativamente sobre los sistemas socioeconómicos y ecológicos. El Estudio Nacional del Agua – ENA, realizado en el 2018 por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.- IDEAM, ha evidenciado en el país, la existencia de 318 municipios susceptibles de quedarse sin este recurso por la falta de conservación ambiental para enfrentar fenómenos climáticos, la modificación de cuencas y la deforestación. Este estudio busca aportar al desarrollo productivo del país con información y conocimiento sobre la oferta, la demanda, la

calidad, el riesgo, las respuestas hidrológicas a la variabilidad climática, las aguas subterráneas y la huella hídrica. Estos análisis e información de valor agregado son fundamentales para la gestión integral, la planificación, la formulación de políticas públicas y la toma de decisiones en los diferentes sectores productivos.

Dentro de este esfuerzo, se han implementado políticas sectoriales que buscan garantizar su conservación para abastecer los sistemas de acueducto, agropecuarios y forestales, industriales y agroindustriales e igualmente al sector de hidrocarburos (Hernández, 2014). Estas políticas reconocen la necesidad de mantener un seguimiento constante de las fuentes, la cantidad y la calidad del agua, así como de las actividades humanas que afecten a ese recurso.

En la actualidad, en la provincia hidrogeológica de los Llanos orientales, se explota agua subterránea para abastecimiento y fines industriales de las formaciones Guayabo Superior, especialmente para el sector agrícola (75%), sector doméstico (9%) y sector industrial (7%) (IDEAM, 2010); y aguas de producción de las formaciones Carboneras y Mirador en los campos petroleros.

En el Estudio Nacional del Agua (ENA 2018), presentado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y el IDEAM, se integra la demanda hídrica, con la participación de los sectores en el uso de agua como el agrícola, pecuario, piscícola, minero e hidrocarburos, energía, industria manufacturera, doméstico, comercio y servicios; así como la calidad, el riesgo, las respuestas hidrológicas a la variabilidad climática, las aguas subterráneas y la huella hídrica.

Algunas cifras relevantes entregadas por el ENA a finales del 2018 fueron:

- En el país el 0,8% del territorio nacional es ocupado por lagunas, las cuales cumplen un importante papel en el balance de los ecosistemas acuáticos.
- Colombia cuenta con una gran riqueza hídrica, al contar con el 5% de los recursos hídricos mundiales. Sin embargo, en un año promedio, este recurso se reparte de manera desigual en el territorio.
- Los resultados del monitoreo demuestran que en el período 2016-2017, se extinguió el 6,4% del área glaciar colombiana, correspondiente a 2,5 Km².
- Los departamentos con mayor potencial a la erosión hídrica en Colombia son: Antioquia, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Caldas, Risaralda, Quindío, Chocó, Tolima, Cauca y Nariño.
- La mayor proporción de agua subterránea, se encuentra destinada a uso agrícola con volúmenes concesionados de 1263 millones de metros cúbicos.

- El riego solo satisface aproximadamente el 10% del requerimiento hídrico - agrícola. Este porcentaje minoritario considera el Uso de Agua para Riego de la Agricultura. El 90% de requerimiento de agua de los cultivos se suple con agua lluvia.
- Antioquia, Huila y Santander participan en su orden con (11.3%), (9.5%) y (7.8%) del volumen total de agua demandada en el país durante el año 2016.
- La demanda total de agua se incrementó de 2012 a 2016 en un 5%. Los sectores con mayor crecimiento fueron el piscícola, el hidroenergético y el sector de servicios.

3.3.3 Beneficios del manejo del recurso hídrico. El aprovechamiento del recurso hídrico que representan las aguas subterráneas en la mayor parte del territorio colombiano, es una temática muy poco desarrollada debido a la limitada cantidad de estudios y conocimiento de la disponibilidad de tales recursos.

Es de gran importancia ampliar los estudios referentes a esta temática ambiental debida a su elevada demanda, sabiendo que la disponibilidad en superficie de este recurso es muy variada, y se rige por la presencia de contaminación, crecimiento poblacional, cambios climáticos, entre otros. Por ejemplo, el nivel de contaminación del recurso hídrico es elevado por vertimiento puntual de carga doméstica, vertimiento e infiltración de aguas residuales de la actividad extractiva del petróleo, así como la contaminación de suelos por la producción agrícola (MADS, 2010).

Es por ello que el conocimiento de su distribución y dinámica, constituyen la base para la planificación del territorio y permite determinar su funcionalidad e integralidad para su aprovechamiento (IDEAM, 2018).

Todo esto permitirá al país, avanzar hacia un desarrollo sostenible, satisfaciendo las necesidades del día a día de este recurso tan vital y esencial, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

3.4 CASOS EXITOSOS DEL MANEJO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.

Colombia se ha beneficiado gracias a la implementación de estudios relacionados con el agua que han permitido identificar zonas de recargas de acuíferos, calidad, estado y cantidad, para su posterior uso. Esta agua producida puede ser reutilizada como inyección al subsuelo o destinada para fines diferentes a partir de procesos de pre tratamiento.

Conociendo que el agua es un recurso escaso, se proponen en la actualidad proyectos que permitan tratar las aguas de producción consideradas como no aptas para verter, en un recurso utilizable.

Dentro de estos se destaca Omán, país conocido por su alto nivel de reservas petroleras y por su compromiso en la disminución de las operaciones de extracciones y en acatar normatividades que regulen el sector energético, especialmente en la consecución de acceso universal al agua potable. Para ello llevaron a cabo operaciones en la cual convertirían el agua producida en una de buena calidad a través de una combinación de biotratamiento con agricultura biosalina para el riego en un ambiente desértico, lo cual supondría menores costos para las compañías operadoras (Arnold et al., 2004). El agua producida irriga además de forma continua a cultivos de caña, representando un beneficio para cultivos agrícolas presentes en esta región.

Otro caso exitoso del reúso de efluentes, se basa en la desalinización y tratamientos basados en membrana como la ósmosis inversa (proceso de separación) para su uso en la fabricación de microcircuitos y productos farmacéuticos, los cuales requieren de agua ultra pura. Otras industrias que se benefician de este tratamiento de membrana incluyen el procesamiento de alimentos y bebidas (Fluence, 2018).

4 DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Este capítulo se presenta en el mismo orden de las fases metodológicas propuestas anteriormente (Sección 1: Metodología)

4.1 FASE 1: DIAGNOSTICO DE LA GESTIÓN ACTUAL DEL AGUA DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO COLOMBIANO.

Esta sección hace referencia a la descripción de las generalidades de la zona de estudio, es decir, la cuenca de los llanos Orientales, para un Campo Colombiano.

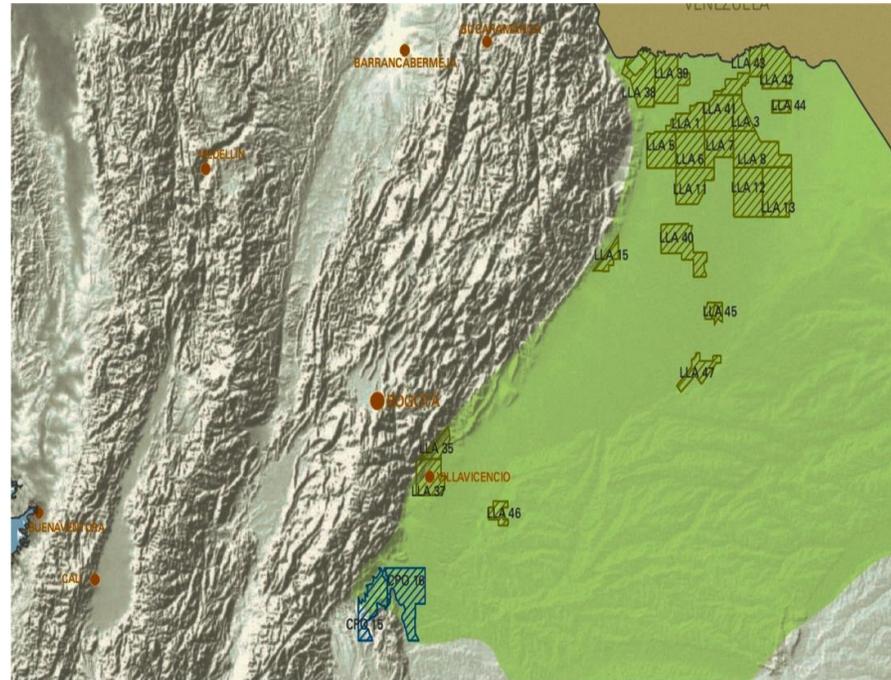
4.1.1 Localización geográfica de la Cuenca de los Llanos Orientales. La cuenca de los llanos orientales, como se observa en la Figura 2, se encuentra ubicada en el oriente colombiano, abarcando los departamentos de Arauca, Vichada, Casanare y Meta (Lozano, 2014), con un área total de 225.603 km². Ocupa una de las seis regiones naturales de Colombia, la Orinoquía, la cual constituye aproximadamente el 53% del área del país (Graterol, 2009). Limita al oeste por la cordillera Oriental, hacia el Este por el escudo de Guyana, y hacia el sur por la Serranía de la Macarena y el arco basamento del Vaupés. Es una cuenca tipo antepaís (foreland), consideradas como importantes contenedoras de hidrocarburos, con un número de pozos perforados que llegan a los 1506 a través de 81 campos menores, 2 campos gigantes (Caño limón y Rubiales) y 2 campos mayores entre los cuales encontramos Apiay y Castilla (Cortés, 2018).

Está compuesta en su mayoría por rocas del Terciario Superior y Cuaternario (Ingrain, 2012). Por otra parte, en la Figura 3 se observa la localización de los bloques petroleros presentes y asignados en la cuenca de los Llanos Orientales, en donde la mayoría se encuentran ubicadas en la zona noroccidente de la región y por ende, donde se concentra la mayor actividad de exploración, explotación y producción de petróleo.

Figura 3. Localización del área de estudio correspondiente a la Cuenca de Llanos Orientales, Colombia.



Figura 2. Localización de los bloques dentro de la cuenca de Llanos Orientales, Colombia.



Fuente: Adaptado de "Estadísticas de Producción" de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2018, Colombia.

4.1.2 Caracterización ambiental. En general, en la región de los Llanos Orientales, domina el clima tropical de la sabana, con un espacio plano y relativamente homogéneo característico de su vegetación de sabanas. Además, incluye una alta diversidad biológica (peces, aves y gramíneas tropicales) y ecosistémicos, representada en humedales, selvas húmedas y ecosistemas de montaña, entre otros.

Cuenta con 32 tipos de sabana que se agrupan en dos grandes grupos o categorías: la sabana de altillanura entre los ríos Meta y Vichada y la “sabana inundable” que cubre una porción importante de los departamentos de Arauca y Casanare. Sus recursos de agua equivalen al 33% de los existentes en el país y se encuentran cubiertas por redes de bosque que ocupan el 20% de su extensión (Rodríguez, 2013).

Las aguas presentes en esta región poseen una composición química alterada, por lo cual su uso en estado natural se encuentra bastante restringido. Algunas causas de esta contaminación son (UNAL, 2014):

- La descarga de los desechos industriales y domésticos en ríos, lagos y mares.
- El uso de plaguicidas, fertilizantes, herbicidas y otros productos químicos durante la ejecución de actividades agropecuarias.
- Derrames de petróleo por actividades del sector de hidrocarburos.

La contaminación ambiental ha sido un problema presente en todos los ecosistemas donde se desarrolla el ser humano. Sin embargo, los mayores niveles de contaminación se han originado en las ciudades o zonas con altos niveles de urbanización e industrialización, debido a la continua y permanente explotación y transformación de los recursos naturales.

4.1.3 Poblaciones cercanas. Las principales ciudades de los llanos orientales son en su orden: Villavicencio (Meta), Yopal (Casanare), Arauca (Arauca), Granada (Meta), Tame (Arauca), Aguazul (Casanare), Puerto Carreño (Vichada), Acacias (Meta) y Puerto López (Meta).

Las subregiones naturales que abarcan esta cuenca son: Llanuras del Meta, Llanuras del Guaviare, Pantanos del Arauca, Serranía de la Macarena y piedemonte llanero, donde se concentra la mayor producción de hidrocarburos.

4.1.4 Sectores Productivos de la zona. La cuenca de los llanos orientales es una de las productoras de hidrocarburo más grandes del país. Sin embargo, el sector energético no es el único presente en esta cuenca.

El boletín económico regional muestra la evolución de las principales actividades económicas de las regiones en Colombia. Para el caso de la región de los Llanos se encuentra que una de las actividades altamente desarrolladas es la agricultura, en donde los principales cultivos son el arroz, palma africana, plátano, maíz, soya, algodón, sorgo y caña de azúcar.

La piscicultura, también conocida como la acuicultura, es otra base de la economía en esta zona, en la cual se encuentran grandes cantidades de bagres, blanquillo, bocachico y cachama. De otro lado, el sector ganadero se basa en la oferta considerable de la carne bovina ubicada en las zonas de la sabana y piedemonte llanero, la cual es de gran demanda en el mercado nacional.

Adicionalmente existe el desarrollo de la silvicultura, para la producción de bejucos leñosos y las epífitas, así como la producción de madera.

De acuerdo con lo anterior, diferentes actividades comerciales se han venido desarrollando en altas proporciones en la zona, lo que ha llevado a la necesidad de construir vías que permitan el transporte de materias primas de manera más fácil y en menor tiempo, promoviendo así el progreso económico y el desarrollo en la región (Banco de la República, 2009)

Respecto a la exploración petrolera, las empresas que desarrollan actividades de exploración y producción en esta cuenca son Ecopetrol, Talismán Energy y MONTECZ (Llano, 2014). Sin embargo, las comunidades de los municipios del departamento del meta que abarcan esta cuenca se manifiestan en contra de los proyectos exploratorios dada la elevada contaminación de los recursos hídricos de la zona por derrames de hidrocarburo y sedimentos, afectación de las especies vegetales y animales, daños en las vías y acueductos, entre otros.

4.1.5 Parámetros de agua. Para el desarrollo del presente proyecto, es importante conocer, caracterizar y analizar las condiciones del recurso hídrico presente en la zona de la cuenca de los llanos orientales, tanto a nivel superficial como de fondo o para el caso petrolero denominado yacimiento.

La debida caracterización de las aguas subterráneas presentes en la región de estudio permite validar las condiciones de salida del yacimiento frente a los requerimientos necesarios para su aprovechamiento en otras actividades, que para el proyecto hacen referencia a usos diferentes a reinyección, vertimientos o disposal y más relacionados con un potencial uso en la agroindustria para lo cual se requiere

evaluar los tratamientos químicos, físicos o biológicos necesarios que permitan el uso de este recurso en estos cultivos.

Por otro lado, es necesario conocer los patrones hídricos de la zona, debido a que, en algunas épocas del año, como por ejemplo los tiempos de sequía, será más necesario el uso de las aguas subterráneas para los riegos, que en temporada de lluvias. Por ende, bajo el conocimiento de estos patrones se deberá manejar planes de contingencia o desvío de las corrientes de aguas tratadas.

- **Caracterización Agua Superficial:** el agua de producción contiene trazas de productos químicos a diferentes rangos de valores, los cuales al ser vertidos en cuerpos de agua superficiales pueden contaminar en gran medida el medio ambiente y las poblaciones circundantes, por su gran volumen generado. En consecuencia, este residuo industrial requiere de tratamientos físicos, químicos y/o biológicos para su posterior vertimiento al medio. Cabe aclarar que las características de las aguas de vertimiento, varían según la geología de cada yacimiento del cual proceden. La resolución 631 de 2015, *“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”*, establece los límites permisibles de temperatura, pH, conductividad, salinidad, oxígeno disuelto, densidad, mg/L de sólidos, dureza, entre otros parámetros, de las aguas de producción vertidas a cuerpos de agua superficiales (Mendoza, 2018).
- **Patrones Hídricos de la Zona:** por lo general la mayoría de los parámetros de las aguas de producción después del tratamiento físico-químico se encuentran dentro de los límites permisibles por la resolución 631, evidenciándose una alta eficiencia de los sistemas de tratamiento utilizados en campos de esta zona, donde los flujos se disponen para su posterior vertimiento. Esto permite identificar la existencia de contaminantes que pueden generar afectaciones de la calidad del sistema hídrico e identificar el responsable directo de ello, es decir, ya sea por la actividad de la industria petrolera o por la dinámica de otros sectores (minero, agropecuario, turístico, infraestructura, centros poblados, actividades ilegales no reguladas, entre otros). El parámetro de mayor interés son los sólidos disueltos, al ser el mayor contaminante aportado por las aguas de producción, generando como consecuencia la contaminación y toxicidad de los organismos y como consecuencia de la población aledaña (Mendoza, 2018).

4.1.6 Gestión del Recurso Hídrico. Es de vital importancia incluir una adecuada gestión del recurso hídrico y de esta manera asegurar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la zona; considerando que este sector es responsable en gran medida de la contaminación y toxicidad de agua; pero a su vez es altamente dependiente de la disponibilidad del agua para su correcta operación.

A continuación, se presenta la caracterización de agua de pozo y la gestión del recurso hídrico del campo Castilla, foco de estudio del presente proyecto.

4.1.7 Caracterización del agua de fondo. El flujo de fluido de fondo es sin lugar a duda un excelente parámetro para evaluar correctamente el sistema de producción de hidrocarburo, en vista de que su análisis contribuye a la caracterización completa del sistema de agua. Por ejemplo, aquellos pozos maduros y heterogéneos pueden conducir a problemas relacionados con el agua de fondo de pozo, afectando la calidad para su vertimiento al medio (Arnold, 2004).

La composición química de esta agua se obtiene por medio de la concentración de cada constituyente analizado presente en esta, los cuales dependerán de ciertas condiciones como la temperatura, presión, saturación del agua, entre otras características.

Algunos parámetros fundamentales del agua de fondo presente en la zona de los llanos orientales se encuentran resumidos en la tabla 4, los cuales fueron establecidos experimentalmente por el autor de una muestra tomada del Campo Castilla para el año 2018.

Tabla 4. Caracterización del agua de fondo Cuenca Llanos Orientales.

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

Fuente: Elaboración propia basado en pruebas de laboratorio de calidad de agua, 2018.

La tabla anterior, describe las condiciones tradicionales de un agua de tipo salobre, característica de la zona de los llanos orientales y bajo la cual no se ha realizado ningún tipo de tratamiento químico o biológico.

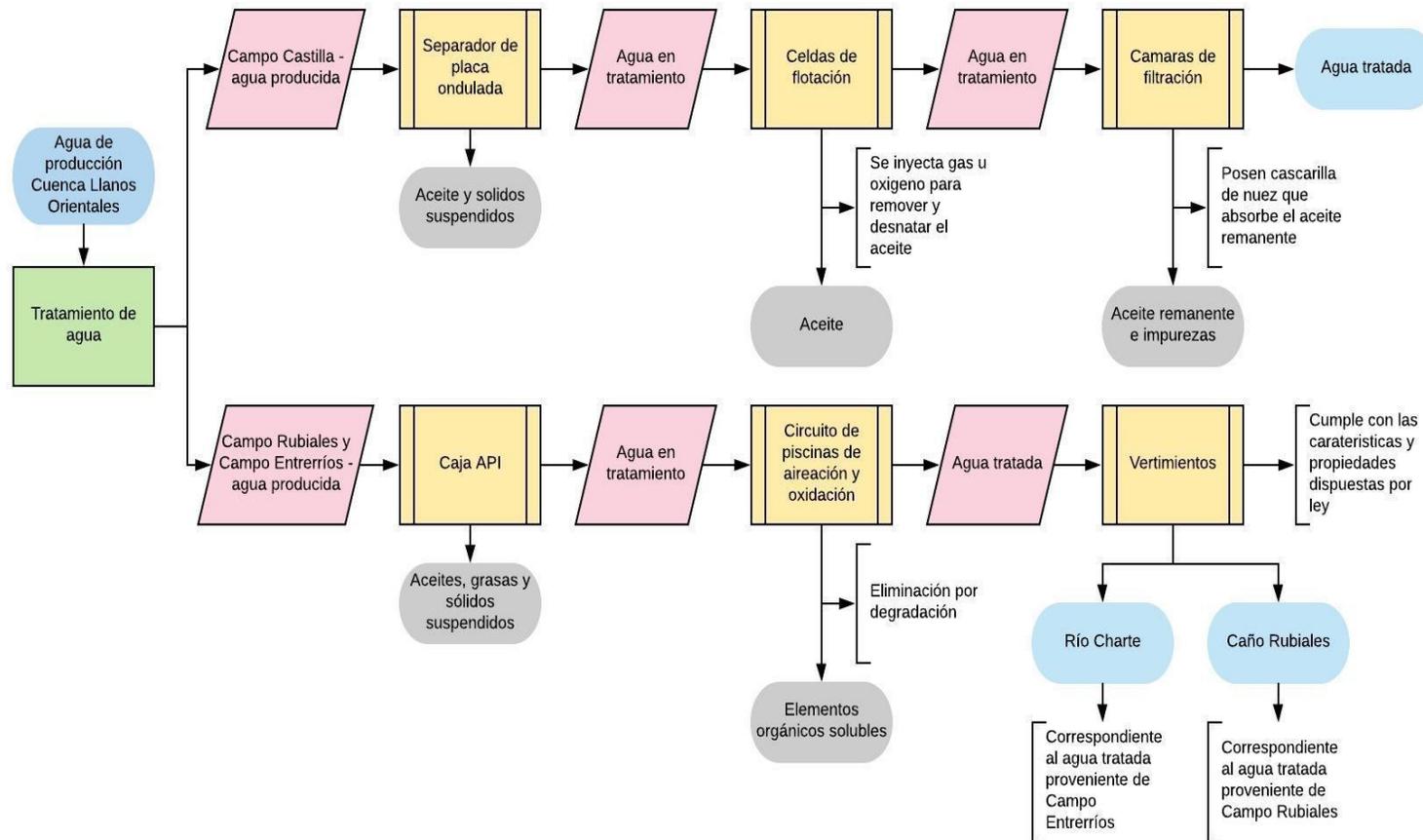
4.1.8 Problemáticas del Campo Castilla en manejo de aguas. Para el campo Castilla se estima que por cada 170.000 barriles de crudo extraído se producen 4 millones de barriles de agua (Franco, 2017). Lo anterior evidencia un problema económico, medioambiental y social por cuenta de las aguas de producción altamente contaminadas; por lo que las empresas deben propender la gestión eficiente de aguas subterráneas en cumplimiento de las normas ambientales exigidas por la nación. Lo descrito es importante en campos como Castilla, al encontrarse dentro de los más productores del país.

En este sentido, los principales retos a los que se enfrentan las industrias se encuentran en los inmensos volúmenes de agua producida, los cuales requieren de equipos e instalaciones especiales.

Entre los grandes avances y alternativas de solución se encuentran los desarrollados por la compañía Siemens en los procesos de purificación de las aguas de producción para su posterior vertimiento o reinyección. Los principales avances se han concentrado en zonas de Mesoamérica y se ha caracterizado por su innovación en gestión del recurso hídrico (Siemens, 2018).

Como se ha enunciado en párrafos anteriores, los volúmenes de agua producidos durante la explotación de un yacimiento petrolero, siempre viene acompañada por grandes cantidades de agua, la cual viene contaminada; por esta razón siempre se debe llevar a cabo el tratamiento de la misma. En la **figura 4** se observa el proceso por el cual pasa el agua producida de los campos Castilla, Rubiales y Entrerríos.

Figura 4. Tratamiento de agua en la Cuenca de los Llanos Orientales.



Fuente. Campo Castilla, recuperado de “El Desafío de Tratar el Agua”, by Kraul, C. 2013. Campos Rubiales y Campo Entrerrios, Recuperado de “Afectaciones Potenciales Por Las Aguas De Producción De La Industria De Hidrocarburos Sobre La Ictiofauna”. By Mendoza, E. 2018, Cuenca De Los Llanos Orientales, Región De La Orinoquía, Colombia.

Por otro lado los volúmenes de agua tienden a aumentar durante la vida productiva de un pozo y el campo Castilla presenta este comportamiento al tener volúmenes de agua elevados, generando un sobre flujo no compensado entre las disposiciones de vertimiento, reinyección y disposal actualmente utilizadas por las empresas operadoras del campo; siendo necesario buscar soluciones para un mejor manejo hídrico en esta zona. Dentro de estas soluciones a nivel internacional se destacan iniciativas como los humedales artificiales implementados en Nimr– Omán en zonas desérticas, en las cuales se han realizado tratamientos de tipo químico y biológico, finalizando en el empleo de las aguas tratadas en el riego de cultivos como por ejemplo la caña.

Por todo lo anterior, el presente proyecto se enfoca en el análisis de la estrategia de Omán y su posible adaptación de elementos claves en Colombia para el Campo Castilla, direccionado principalmente a mejorar la calidad del agua producida y así permitir su uso en otros sectores relacionados con la agroindustria, en donde los requerimientos de agua establecidos puedan ser validados para procesos productivos.

4.2 FASE 2: GENERALIDADES DE LA ESTRATEGIA DE AGUAS DE RIEGO PARA SUELOS EN NIMR – OMÁN.

La implementación de nuevas estrategias que permitan la reutilización o nuevos mecanismos de disposición del agua de producción obtenida durante la explotación de hidrocarburos no solo traen beneficios ambientales, sino que a su vez permite la optimización de los procesos de tratamiento del agua en la industria petrolera. En este apartado se presentan los resultados referentes a la revisión bibliográfica para la identificación de las generalidades de la planta de tratamiento de Omán

4.2.1 Localización geográfica de la planta tratadora de agua en el desierto de Nimr– Omán. El Sultanato de Omán, está situado al sudeste de la península Arábiga, cuyos límites son: por el oeste, los Emiratos Árabes Unidos (E.A.U); por el este, Arabia Saudí y Yemen; el norte y el sur limita con el mar de Omán y el mar de Arabia en el Océano Indico, respectivamente; además una parte de su territorio se encuentra separado por los E.A.U, situado en la península de Musandam. La capital de Omán es Mascate, donde se encuentra ubicada la mayor parte de la población. La geografía del país es representada principalmente por cuatro regiones naturales; la llanura costera, un desierto, Dhofar y las cadenas montañosas de Al Hajar (Oficina de información Diplomática - Gob España, 2018)

En el desierto de Omán la compañía Petroleum Development Omán (PDO) junto con la empresa alemana Bauer, completó en el 2011 la planta tratadora de agua de Nimr. Este proyecto tenía como objetivo la construcción del humedal más grande del mundo para el tratamiento de aguas industriales, el cual se ha

denominado como el oasis de la industria del petróleo (Trading Petroleum, 2018). En la **figura 5**, se muestra la ubicación geográfica de Omán y de Nimr.

Figura 5. Localización geográfica del Sultanato de Omán y Nimr.



Fuente. Recuperado de Google maps (2019). Localización geográfica del Sultanato de Omán y Nimr. Recuperado de: <https://maps.google.com>

La planta de tratamiento, fue diseñada para tratar una 45000 m³/día de agua, producida proveniente de los pozos cercanos (Breuer, Al-Asmi, SPE, Bauer Nimr, & Petroleum Development Oman, 2010).

4.2.2 Caracterización de la planta de tratamiento de Nirm – Omán.

La planta de tratamiento de agua Nirm ha sido uno de los proyectos más innovadores y amigables con el medio ambiente, además de esto ha ganado múltiples premios los cuales se muestran en la Tabla 5. Actualmente este sitio trata más de 700.000 barriles de agua de producción por día, la cual proviene de los pozos petroleros del sur del desierto de Omán (Petroleum Development Omán, 2017).

Tabla 5. Premios obtenidos por el proyecto de los humedales de Nirm

Premio	Categoría	Año
Premio de Oro – Emirates Energy Awards	Proyecto de energía más grande	2015
ADIPEC	Mejor Proyecto - MENA Oíl & gas HSE	2012
MEED Quality Awards	GCC y ganador nacional en la categoría de sostenibilidad	2012
Global Water Awards	Proyecto de agua industrial del año	2011

Fuente. Adaptado de Petroleum Development Omán, 2017.

Uno de los primeros premios ganados después de la construcción de la planta de tratamiento de agua de Nirm fue el Global Water Award, este fue concedido a razón de que nunca antes se había intentado el tratamiento de agua con humedales artificiales a esta escala, lo cual hizo del proyecto algo novedoso y dio solución a los problemas de tratamiento de aguas de producción obtenida del campo petrolero de Nirm (Global water awards, 2011).

En el sur de Mascate, donde se encuentran ubicado los pozos petroleros de PDO y la planta de tratamiento de agua de Nirm, la temperatura puede superar los 50°C. Además, esta región presenta gran cantidad de días soleados con muy pocos periodos de lluvia (Breuer R. *et al.*, 2010), lo cual caracteriza este lugar como una zona árida, con poca presencia de vegetación, debido a las altas temperaturas que se pueden presentar diariamente. En la tabla 6 se observa las condiciones climáticas del campo petrolero de Nirm.

Tabla 6. Condiciones climáticas de Nirm

Ítem	Mínimo	Máximo
Temperatura en la sombra	5°C	60°C
Variación diaria de la temperatura		25°C
Velocidad del viento por hora, promedio	15 m/s	
Humedad relativa	30%	98%
Lluvia		0 mm 25 mm por hora
Radiación solar		120 mW/cm ³
Dirección predominante del viento	Mar-Abr: Noroeste	May-Jun: Suroeste Resto: Sureste

Fuente. Recuperado de “Nirm water treatment project -- up scaling A reed bed trail to industrial” de Román Breuer, *et al.*, 2010, Paper presented at the doi:10.2118/126265-MS Recuperado de <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-126265-MS>

Como se puede observar en la tabla anterior, las condiciones climáticas del desierto de Omán son extremas en relación a las temperaturas elevadas y las pocas precipitaciones.

4.2.3 Diseño de humedales artificiales.

Los humedales artificiales construidos en el mundo, tienen como fin imitar los humedales naturales, tienen el objetivo de tratar aguas residuales. Los sistemas de humedales están compuestos por vegetación, sustratos, agua y microorganismos; y emplean diferentes procesos biológicos, químicos y físicos que permiten la eliminación de algunos contaminantes, mejorando la calidad del agua (Haiming Wu, Jian Zhang, Huu Hao Ngo, & Wenshan Guo, 2014)

La selección de las plantas para el desarrollo del humedal es una decisión importante durante el diseño y la construcción del sistema, puesto que las condiciones a las que estarán sometidas requieren que tengan una capacidad de adaptación y mayor tolerancia tanto a los contaminantes a los que van a ser expuestas, como a los cambios de temperatura o a los climas extremos de la zona del proyecto. En la **figura 6** se observan las plantas más utilizadas en los humedales construidos.

Figura 6. Plantas acuáticas más utilizadas en la construcción de humedales.

<p style="text-align: center;">Emergentes</p> <p>Plantas acuáticas ancladas al fondo, pero sus tallos y hojas se encuentran fuera del agua.</p> <p><i>Phragmites</i> <i>Typha</i> <i>Sagittaria</i></p>	<p style="text-align: center;">Sumergidas</p> <p>Plantas que están totalmente debajo del agua.</p> <p><i>Hydrilla verticillata</i> <i>Ceratophyllum demersum</i> <i>Vallisneria spiralis</i></p>
<div style="border: 2px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; display: inline-block;"> Plantas para los humedales </div>	
<p style="text-align: center;">Hojas Flotantes</p> <p>Plantas cuyas hojas están fuera de la superficie del agua, pero no están ancladas al fondo.</p> <p><i>Nymphaea tetragona</i> <i>Nymphoides peltata</i> <i>Terna bicolor</i></p>	<p style="text-align: center;">Flotación Libre</p> <p>Plantas que flotan de espontáneamente sobre la superficie del agua.</p> <p><i>Eichhornia crassipes</i> <i>Salvinia natans</i> <i>Hydrocharis dubia</i></p>

Fuente. Elaboración propia adaptada “A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation” de Haiming Wu, Jian Zhang, Huu Hao Ngo, & Wenshan Guo. 2014.

De la **Figura 6** se puede evidenciar las múltiples opciones disponibles de plantas acuáticas para emplear en los humedales. Sin embargo, para finalidades del presente proyecto y como estudio de caso del humedal de Omán, se analizará la especie *Phragmites australis*, que fue la empleada en el desierto de Nimr, aunque convendría estudiar otra especie nativa similar, propio del trópico colombiano.

4.2.4 Phragmites australis. Esta planta acuática también conocida como caña o carrizo, tiene la capacidad de crecer en zonas húmedas además de soportar diferentes grados de salinidad (Oilfield Review, 2004). Dadas las características del desierto de Nimr Omán, la *Phragmites australis* o caña común, fue la especie seleccionada, plantándose aproximadamente 240 hectáreas con esta caña (Breuer R; et al, 2010). Durante el proceso de plantación en el humedal de la planta de tratamiento de Nimr se establecieron más de 1.2 millones de plántulas de esta especie, las cuales fueron sembradas con una separación de un metro cuadrado entre cada plántula (Breuer R; et al, 2010). En la **figura 7** se observan los carrizales sembrados en el desierto de Omán.

Figura 7. Carrizales del desierto de Omán.



Fuente. Recuperado de “Manejo de la producción de agua: De residuo a recurso” de Arnold, R et al. 2004. Revista Oilfield Review.

Una de las ventajas de utilizar la *P. australis* en la planta de tratamiento, es que sus tallos actúan como un filtro que atrapa el petróleo que flota sobre la superficie del agua de producción y este posteriormente se comienza a biodegradar a través de microorganismos presentes en los tallos de la caña, en sus raíces y en la superficie del suelo (Breuer R. *et al.*, 2010).

Adicionalmente esta planta tiene la capacidad de colonizar lugares inhóspitos fácilmente y es de difícil extinción, proporcionando hábitat para algunas especies de aves, invertebrados, pequeños mamíferos, anfibios y reptiles. También previene la degradación de los suelos expuestos a la erosión (Shawn William Meyer, 2003).

Las demás plántulas referenciadas en la **Figura 6** no son estudiadas en el presente proyecto, debido a que no corresponden al alcance del mismo al no ser empleadas en el humedal artificial de Omán.

4.2.5 Caracterización del agua de producción. En el pasado para controlar y desechar los grandes volúmenes de agua producida, esta se disponía en acuíferos someros a través de pozos de disposición; pero esto conllevaba a múltiples problemas como la pérdida económica por el desecho de petróleo junto con el agua, un alto consumo de combustibles fósiles para las bombas que llevaban el fluido a través del pozo de disposición y consecuencias ambientales presentes y futuras por la eliminación de agua salada contaminada con grandes volúmenes de hidrocarburos. Por las razones anteriores la compañía PDO decidió buscar una alternativa más amigable con el medio ambiente y lanzó el proyecto de la planta de tratamiento de agua de Nimr, cuya construcción empezó en mayo del 2009, donde el reto más grande era poder mejorar la calidad del agua de producción (Breuer, R. et al, 2010). En la **Tabla 7** se muestran las características del agua de producción de la empresa PDO obtenida de los pozos del campo Nimr para el año 2011.

Tabla 7. Características del agua de producción de los campos de PDO.

Parámetro	Concentración (mg/l)
Aluminio	0.07
Bario	0.16
Boro	4.59
Calcio	62
Hierro	<0.01
Plomo	<0.001
Litio	0.11
Magnesio	22
Manganeso	0.063
Fosfato, total como P	<0.01
Fosforo, total como P	<0.1
Potasio	53
Sodio	2470
Zinc	33.87
Bicarbonato alcalino	189
Amoniaco nitrogenado	1.8

Tabla 7. (Continuación)

Parámetro	Concentración (mg/l)
Cloruro	3201
Nitrato, como N	<0.2
Nitrógeno, total como N	<0.1
Carbono orgánico disuelto	6.3
Azufre total como SO ₄	283
Sólidos disueltos totales	6200
Sólidos suspendidos totales	8
Demanda química de oxígeno	65
Demanda biológica de oxígeno	38
Aceite y grasa total	480
Sulfuro, como S	0.73

Fuente. Recuperado de “*Nimr water treatment project -- up scaling A reed bed trail to industrial*”. De Breuer R; et al, 2010. Recuperado de <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-126265-MS>

La tabla anterior describe los parámetros del agua de producción de Omán que deben ser comparados con los de Colombia, con el objetivo de permitir una evaluación de compatibilidades y determinar si la metodología utilizada en medio oriente puede ser viable en el país, por lo menos en términos de las calidades de agua revisadas.

4.2.6 Ruta de tratamiento del agua. En el año 2000, PDO comienza la construcción de un humedal piloto, donde se tenía como objetivo volver “verde” el desierto. Es así cómo se evalúa la degradación de los hidrocarburos, la eliminación de metales pesados, la adsorción del suelo y el potencial que presentaba el agua tratada para ser utilizada en la agricultura (Roman Breuer et al, 2010). Después de los resultados obtenidos con el primer estudio se dio inicio a la construcción de la planta de tratamiento de agua de Nimr cuyo diseño se puede observar en la **figura 8**.

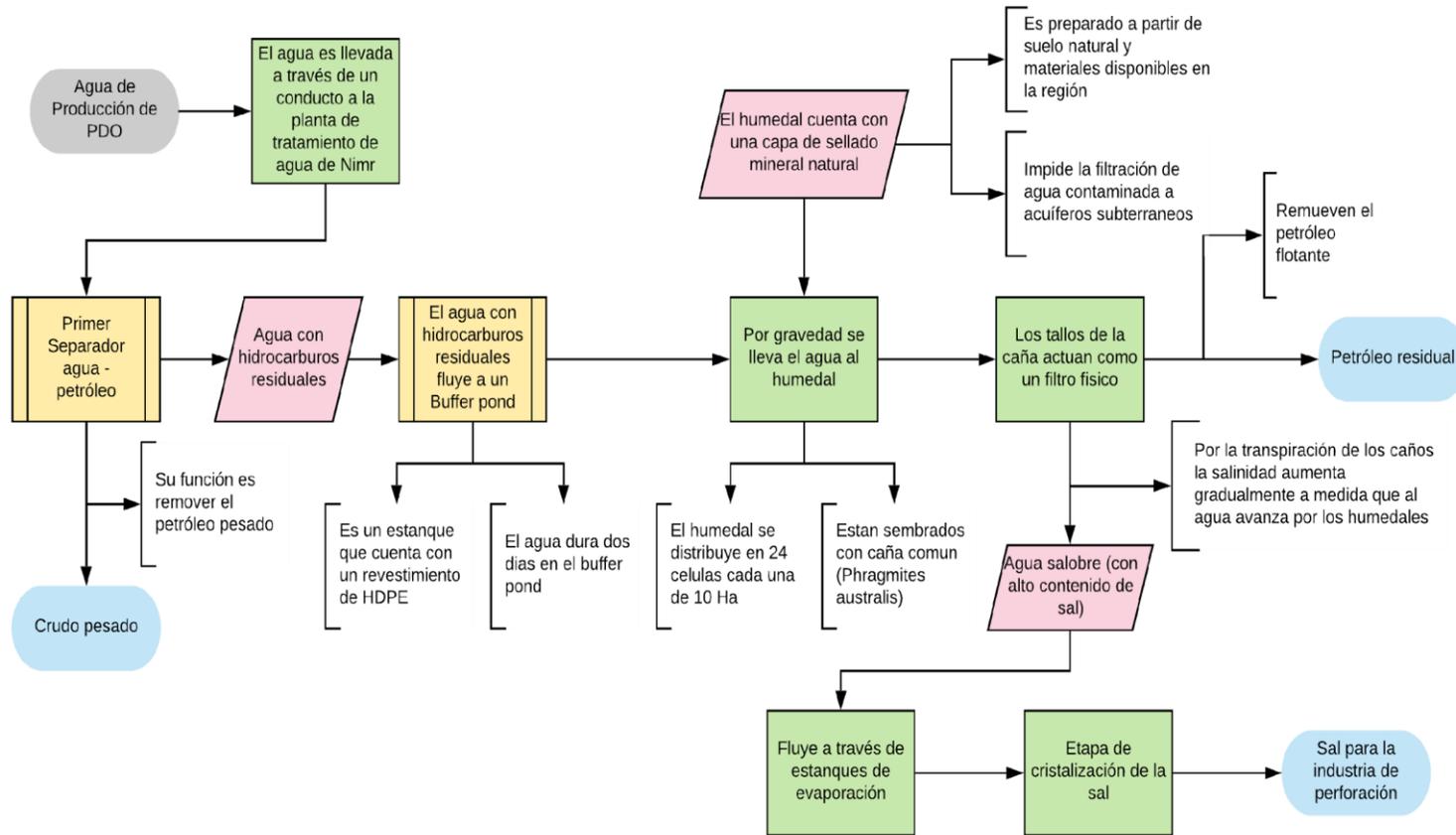
Figura 8. Diseño de la planta de tratamiento de agua de Nimr.



Fuente: Recuperado de “Nimr water treatment project -- up scaling A reed bed trail to industrial.” De Al-Asmi, S. R., Breuer, R., SPE, Bauer Nimr, L., & Petroleum Development Oman, L. (2010).

La construcción del humedal tiene dos funciones principales. La primera es la eliminación de los hidrocarburos residuales y la segunda la disminución de la cantidad de agua, debido a la alta tasa de evaporación y transpiración de las plantas (Breuer R; et al, 2010), en la **figura 9** se observa la ruta que tiene el agua de producción después de que llega a superficie en las facilidades de PDO.

Figura 9. Proceso de la planta de tratamiento de agua de Nimr.



Fuente. Recuperado de “Nimr water treatment project -- up scaling A reed bed trail to industrial.” De Al-Asmi, S. R., Breuer, R., SPE, Bauer Nimr, L., & Petroleum Development Oman, L. (2010).

4.2.7 Aplicaciones finales del agua de producción. Los beneficios que ha traído la planta de tratamiento de agua de Nimr en Omán son ambientales y económicos. Gracias a esta, se ha podido reducir de forma considerable la contaminación del recurso hídrico en la zona y se ha fortalecido una mejor gestión del mismo. Paralelamente se ha llegado a un aumento en la rentabilidad económica de los proyectos petroleros al tener un mayor control del agua de producción y aumentado el petróleo disponible para su transporte y posterior procesamiento.

Para el 2011 la concentración de aceite y grasa totales del agua de producción que entraba a la planta de tratamiento de Nimr estaba entre 32 a 1112 g/m³, con un promedio de 282 g/m³. En el primer separador agua- petróleo se logra remover el 88% del petróleo residual, por ende, la concentración de aceite y grasas que entra a los humedales está en un promedio de 5 g/m³, el cual se reduce a 0.5 g/m³ después de pasar por todo el sistema; mostrando así la efectividad del proyecto y abriendo una puerta para utilizar el agua de producción tratada en riego de cultivos tolerantes a la sal, cultivo de algas, creación de ecosistemas tipo manglar que permiten la captura de carbono y riego de cultivos ornamentales después de un tratamiento por osmosis inversa (Breuer R; et al, 2010).

4.2.8 Potencial de réplica en Colombia. Como se mencionó en la sección final del segundo capítulo, el presente proyecto evaluó la viabilidad de la implementación en Colombia de una planta de tratamiento de agua similar a la desarrollada en el desierto de Omán en los campos de Nimr, teniendo en cuenta la construcción de humedales que permitan mejorar la calidad del agua de producción que se obtiene durante la extracción de petróleo en la cuenca de los Llanos Orientales y su posterior aprovechamiento para riego de cultivos apropiados.

Para esto se tuvo en cuenta que la región de la Orinoquía del país cuenta con un clima tropical debido a su ubicación sobre la zona ecuatorial, por lo tanto tiene periodos de sequía entre diciembre y febrero, caracterizados por vientos alisios que desecan la sabana, con clima cálido con temperaturas entre los 22 y 30°C en la zona del piedemonte y los llanos (Fedesarrollo & Ecopetrol, 2018), que se asemejan a la del desierto de Omán. Lo anterior favorece el desarrollo del humedal gracias a las similitudes climáticas ambientales que se presentan en la zona.

Las plántulas sembradas en el humedal de Nimr es la especie *Phragmites australis*, está catalogada dentro de una distribución cosmopolita, es decir que esta caña está repartida o se puede encontrar en casi todo el planeta, este carrizo tiene gran adaptabilidad a los climas extremos y soporta bien la salinidad en el agua y en el suelo donde se realiza su plantación; condiciones y características que deben ser evaluadas en las plántulas potenciales a ser ubicadas en el caso Colombiano para la cuenca de los Llanos Orientales.

Para evaluar la viabilidad de la réplica de la metodología en Omán en el Campo Castilla, es necesario partir de una identificación de las variables críticas a ser consideradas en el diseño de humedales artificiales y su comportamiento en ambientes como el colombiano, lo cual será abordado en el siguiente capítulo, junto con las herramientas de análisis de variables de tipo estadístico requeridas para el análisis.

4.3 FASE 3: IDENTIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE VARIABLES PARA LA ESTRATEGIA DE OMÁN EN COLOMBIA

A continuación, se presentan los resultados referentes a la identificación y priorización de variables para evaluar la implementación de la estrategia del desierto de Omán en un campo petrolero colombiano, ubicado en la cuenca de los llanos orientales.

4.3.1 Selección de expertos. A continuación, se hace un breve resumen del perfil de cada uno de los expertos con el fin de evidenciar su importancia en el desarrollo de este capítulo.

- Ángela Romero: Ingeniera de petróleos, experta en manejo de aguas de producción
- Carolina Ortiz: Ingeniero Civil, con Magister en Ingeniería y recursos hidráulicos, con experiencia en hidrología e hidráulica superficial y subterránea, hidrogeología y planificación y evaluación ambiental.
- Claudia Barridos: Ingeniero Químico, con Magister en Ingeniería Química, con experiencia en Corrosión interna y tratamiento químico.
- John Parra: Ingeniero de Petróleos experto en yacimientos y simulación de fluidos de pozo
- Johys Buitrago: Ingeniera de Petróleos, Especialista en Yacimientos, con experiencia en manejo de aguas, Ingeniera de Yacimientos y Simulación.
- Jorge Forero: Ingeniero de petróleos experto en producción petrolera.
- Jorge Tovar: Ingeniero químico e ingeniero de petróleos experto en manejo de fluidos de pozo, Perforación.
- José María Gómez: Ingeniero Sanitario y Ambiental con Magister en Gestión Ambiental para el desarrollo sostenible, con experiencia en control de Procesos fisicoquímicos y biológicos, Investigación, evaluación ambiental, producción más limpia y desarrollo Sostenible.

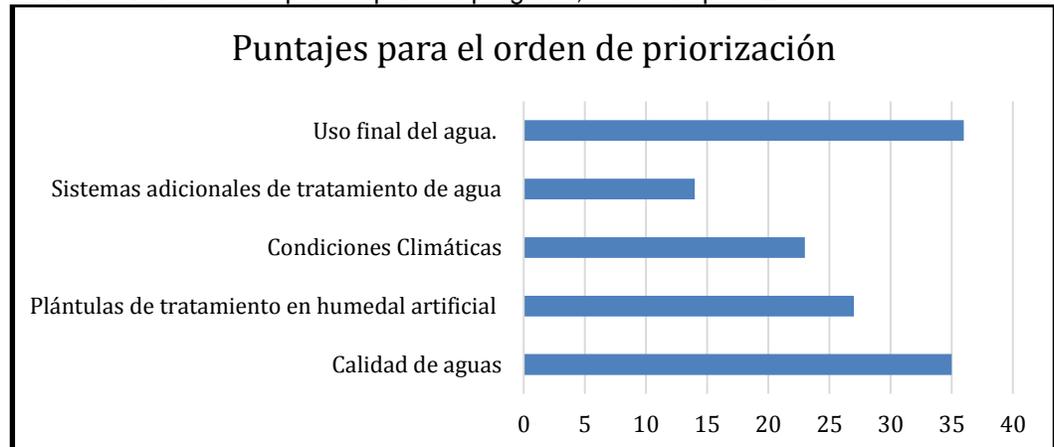
- Juliana Delgado: Bióloga con Doctorado en Ciencia y Tecnología ambiental con experiencia en Gestión Integral de cuencas y recurso hídrico, evaluación de impactos de infraestructura y planificación.
- Samuel Valovis: Ingeniero de Petróleos. Ingeniero de Yacimientos, experto en manejo de fluidos de yacimientos.

4.3.2 Resultados Preliminares de Identificación. De los 10 participantes todos completaron la encuesta de manera satisfactoria, donde posteriormente se analizan las respuestas y se hace una priorización de variables.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la matriz de expertos. En la gráfica 3, se muestran los datos obtenidos en la primera pregunta, donde el uso del agua obtiene el puntaje más alto con 36 puntos, seguido de la calidad del agua, que obtuvo 35 puntos, posteriormente estas plántulas de tratamiento en humedal artificial con 27 puntos, seguido de condiciones climáticas con 23 puntos y finalmente los sistemas adicionales de tratamiento de aguas con 14 puntos.

Se ha decidido eliminar las respuestas de un experto con el fin de tener datos confiables y poner analizar los resultados de manera objetiva, dado que el experto presenta dos tipos de sesgo, el primer sesgo es de gestor, en el cual el experto no analiza la situación en general sino se enfoca en una sola variable, descuidando el contexto que se quiere resolver, y el sesgo de conservadurismo en la cual el experto busca extender el rango del parámetro, dejando de ser objetivo en las respuestas que brinda. En las siguientes preguntas sus respuestas serán tomadas en cuenta pues los sesgos solo se presentaron en la primera pregunta.

Gráfica 3. Resultados para la primera pregunta, orden de priorización.



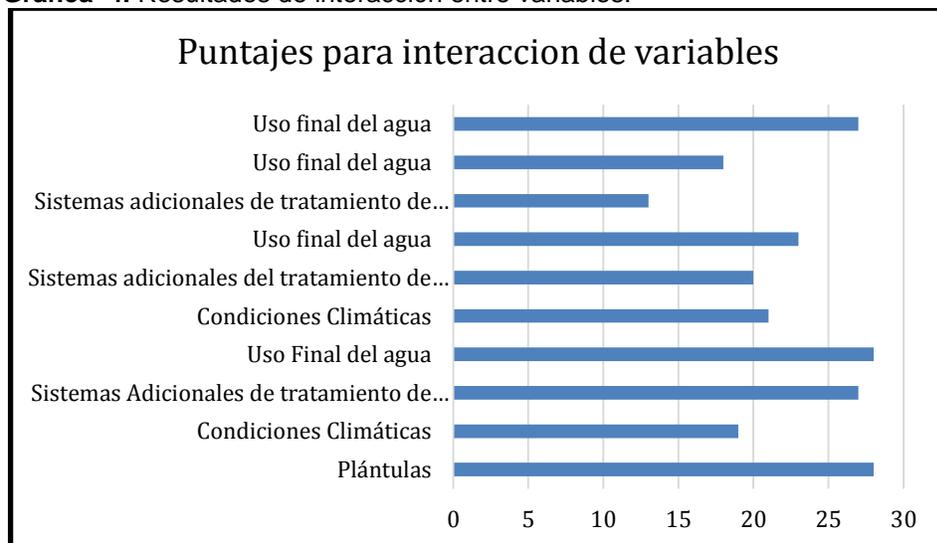
Fuente: Elaboración propia.

En esta sección se analizan los resultados obtenidos y mostrados anteriormente donde se puede concluir que la jerarquía de variables para los expertos es:

- Calidad del agua
- Uso final del agua
- Plántulas de tratamiento en humedal artificial
- Condiciones climáticas
- Sistemas adicionales de tratamiento de agua
- Uso final del agua

En la gráfica 4, se puede ver un resumen de las respuestas de cada uno de los expertos para la segunda pregunta que corresponde a la interacción entre las variables dadas en el primer punto, se muestra el total de las respuestas de cada interacción entre las variables. Se obtuvieron dos interacciones con el mayor puntaje que fueron: calidad de agua- plántulas y calidad del agua- uso final del agua, en el siguiente puesto con el mismo puntaje, se encuentra la calidad del agua- sistemas adicionales de tratamiento de agua y sistemas adicionales de tratamiento de agua- Uso final del agua, siendo estas cuatro interacciones como las que los expertos consideraron más relevantes. Dicha información se tiene en cuenta al momento de aplicar el modelo estadístico.

Gráfica 4. Resultados de interacción entre variables.



Fuente: Elaboración propia.

En la segunda pregunta se puede observar que las cuatro interacciones a las que los expertos dieron más peso son:

- Calidad del agua- Plántulas de tratamiento en humedal artificial
- Calidad del agua-Uso final del agua

- Calidad del agua-Sistemas adicionales de tratamiento de agua
- Sistemas adicionales de tratamiento de agua- Uso final del agua

En cuanto a la tercera pregunta de carácter abierto, se enlistan las variables que sugirió cada experto, las cuales serán tenidas en cuenta al momento de análisis de las variables y en el modelo estadístico con el fin de complementar la información obtenida en las preguntas anteriores, donde varios expertos consideraron algunos aspectos importantes tales como el impacto a la flor y fauna de la zona, evaluación económica, controles sobre el proceso y normatividad.

Esta información será organizada y tratada en el modelo estadístico multicriterio con el fin de obtener la mejor alternativa en la implementación de la estrategia para el uso sostenible de agua de producción, tomada del desierto de Omán en campos colombianos

4.3.3 Resultados preliminares de Priorización. Con los resultados obtenidos para la primera pregunta mostrados en la sección anterior se sumaron los puntajes que había dado cada experto para poder obtener una jerarquía de las variables, ahora se analizarán los datos y se aplicará el modelo estadístico Regime, el cual asigna un peso a cada variable. Para dicho proceso se realiza un promedio entre los resultados brindados por los expertos para cada parámetro, con el fin de que sea el mismo experto el encargado de dar el peso que considere, el promedio obtenido será el peso que se le asigne a cada variable, tal como lo muestra la **Tabla 8** mostrada a continuación:

Tabla 8. Peso para cada variable.

Variable	Calidad de aguas	Plántulas de tratamiento en humedal artificial	Condiciones Climáticas	Sistemas adicionales de tratamiento de agua	Uso final del agua.
Promedio	3,9	3,0	2,6	1,6	4,0

Fuente: Elaboración propia.

Se debe tener en cuenta que para los resultados de la primera pregunta el máximo puntaje teórico es 5. Para poder aplicar el método en los resultados de la segunda pregunta se realiza el mismo procedimiento que la pregunta anterior, esta vez mostrado en una matriz con de fácil entendimiento donde el máximo puntaje teórico es 3. Los resultados se muestran en la Tabla 9 mostrada a continuación, donde el peso más alto fue obtenido por dos interacciones con 2.8 puntos: la calidad del agua-plántulas de tratamiento en humedal artificial y calidad del agua-uso final del agua, luego nuevamente se encontraron dos interacciones con 27 puntos: calidad del agua-sistemas adicionales de tratamiento de agua y uso final del agua- sistemas adicionales de tratamiento de agua, seguidas de las demás interacciones que tienen pesos más bajos.

Tabla 9. Peso para cada interacción de variables.

	Plántulas de tratamiento en humedal artificial	Condiciones Climáticas	Sistemas adicionales de tratamiento de agua	Uso final del agua.
Calidad de agua	2,8	1,9	2,7	2,8
Plántulas de tratamiento en humedal artificial		2,1	2	2,3
Condiciones Climáticas			1,3	1,8
Sistemas adicionales de tratamiento de agua				2,7
Uso final del agua.				

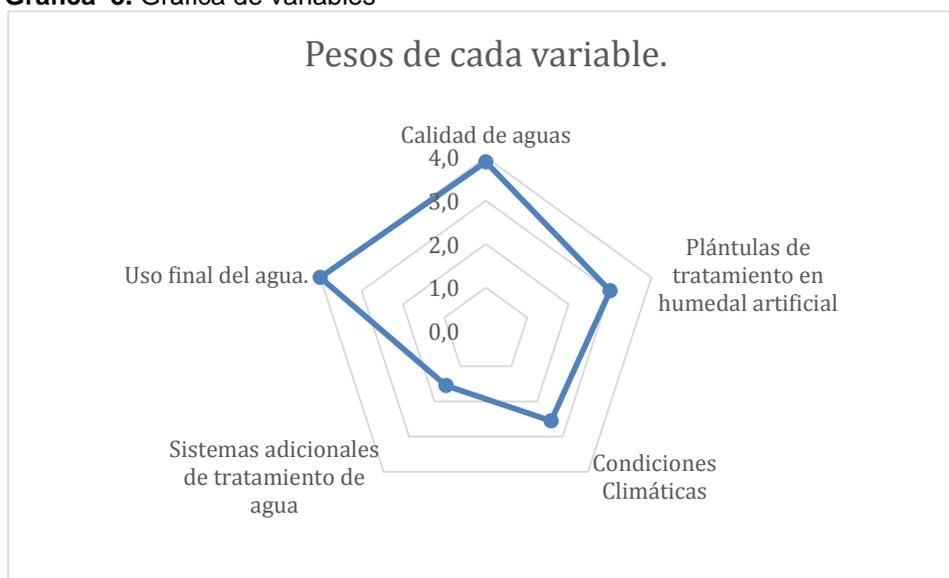
Fuente: Elaboración propia.

Para los resultados de la tercera pregunta se puede observar que la variable que la mayoría de los expertos tuvieron en común, fue una evaluación económica y como esta estrategia de tratamiento de aguas iba a afectar en entorno, en lo que respecta a flora, fauna y condiciones del suelo.

En análisis de los obtenidos de la matriz de expertos y la aplicación del modelo estadístico, se puede concluir que las variables más importantes para la primera pregunta son calidad y uso final del agua, para la segunda pregunta dentro de las interacciones encontramos cuatro importantes: calidad del agua-plántulas de tratamiento en humedal artificial y calidad del agua-uso final del agua, calidad del agua-sistemas adicionales de tratamiento de agua y uso final del agua- sistemas adicionales de tratamiento de agua, y finalmente en la tercera pregunta se obtiene que es importante para los expertos realizar una evaluación económica la cual se tendrá en cuenta como una recomendación a futuro, pues esta se sale del alcance dentro del presente proyecto, los expertos también consideraron verificar el impacto que tendrá la implementación de esta estrategia en la flora y fauna del entorno, lo cual se tendrá en cuenta en los capítulos siguientes.

4.3.4 Diagrama de análisis estadístico. En esta sección se muestra gráficamente los pesos obtenidos para cada variable y su jerarquización, para la primera pregunta, donde se muestra de manera evidente las variables escogidas y su jerarquización. Dichos resultados se muestran en la **Gráfica 5** mostrada a continuación:

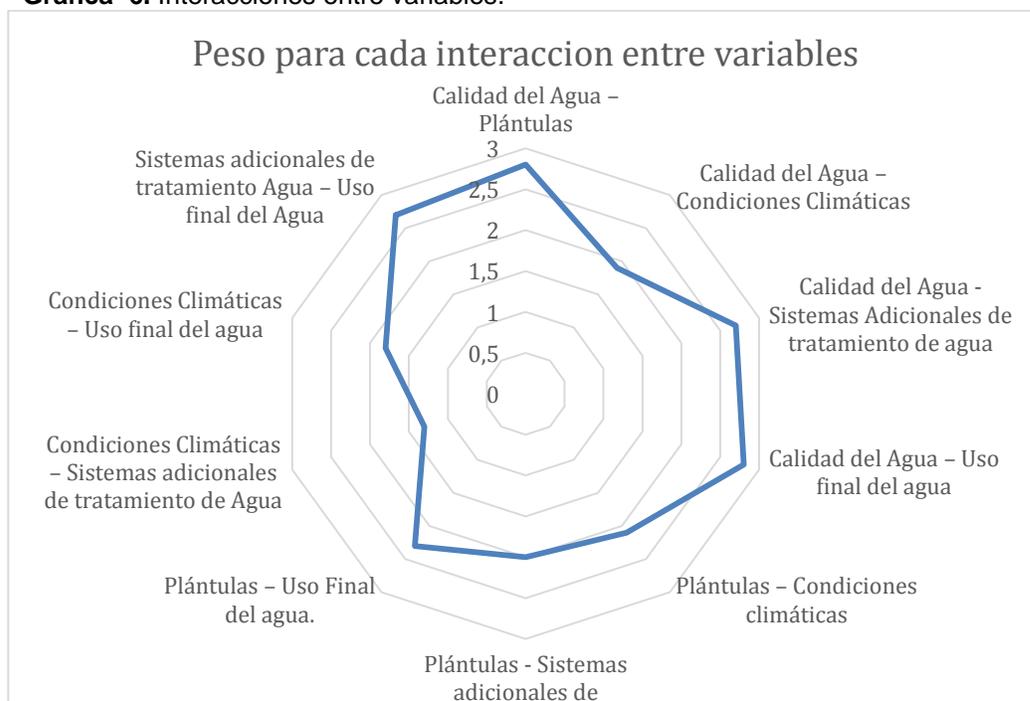
Gráfica 5. Gráfica de variables



Fuente: Elaboración propia.

Además, se muestra la gráfica para la segunda pregunta, con el peso de cada interacción en la Gráfica 6, tal como se muestra a continuación:

Gráfica 6. Interacciones entre variables.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez aplicado el método de análisis multiparámetro, y definidas las variables y sus interacciones por peso y jerarquía se procede a desarrollar la estrategia y las posibles adaptaciones de la estrategia empleada en el desierto de Nirm Omán, para el territorio colombiano.

4.4 FASE 4: VARIABLES PARA PROMOVER LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL, ECONÓMICA Y SOCIAL DE LA ESTRATEGIA DE AGUA DE PRODUCCIÓN ADAPTADA A UN CAMPO COLOMBIANO

En la actualidad cualquier proyecto se debe fundamentar en un desarrollo sostenible, en el cual se utilicen recursos naturales pensando en generaciones futuras. En este contexto, se plantean tres pilares importantes que deben ser evaluados durante el desarrollo de un proyecto y de los que se debe garantizar su equilibrio. Estos pilares son: lo económico, lo ambiental y lo social. (Machi Céspedes & Latorre Barragan, 2014).

4.4.1 Variables ambientales. Actualmente la industria de los hidrocarburos se encuentra en búsqueda de nuevas estrategias de producción más limpia que permitan el uso eficiente de los recursos, garantizando una reducción de los desechos y los riesgos a la salud y el medio ambiente, por lo cual, es necesario evaluar la calidad y el uso final del agua de producción con base en parámetros técnicos y normativos.

4.4.1.1 Calidad del agua. La calidad del agua se encuentra relacionada al uso o actividad a la cual se destina dicho recurso, por ejemplo, una fuente de agua con alto contenido de sales puede ser utilizada en actividades de piscicultura (cultivo de peces) pero no en actividades de riego debido a que afectaría de forma directa la productividad del suelo; sin embargo, existen diferentes características físicas, químicas y biológicas que definen la calidad del agua (Barrenechea Martel, 2004)

- **Características físicas:** son aquellas características que pueden ser percibidas por los sentidos, presentando una relación directa sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua. Entre estas condiciones se encuentran el sabor y olor del agua el cual se ve afectado por la presencia de materia orgánica en descomposición y sustancias químicas volátiles. De igual forma el color, la turbidez, el pH, la temperatura y el contenido de sólidos solubles e insolubles en el agua son características físicas que deben ser evaluadas al momento de determinar la calidad del agua con el fin de identificar agentes contaminantes o condiciones óptimas que faciliten la presencia de agentes contaminantes. (Orellana, 2005)
- **Características químicas:** el agua como solvente universal puede contener disuelto cualquier compuesto químico ya sean de origen natural o industrial, los cuales podrán ser benéficos o dañinos dependiendo de su composición y

concentración. Sin embargo, las características químicas que con mayor frecuencia se evalúan en el agua de riego, se refieren al contenido de sales en el agua y a parámetros derivados de la composición de dichas sales, entre los cuales se encuentran la conductividad eléctrica, el total de sólidos disueltos, la alcalinidad, la dureza y la relación de absorción de sodio. Una mala calidad del agua de riego en cuanto a sus características químicas afecta tanto a la planta como al suelo. Por ejemplo, una alta relación de absorción de sodio genera un daño en la estructura del suelo y problemas de absorción de agua; en tanto que una alta toxicidad de iones específicos como lo son el cloruro, el sodio y el boro o una baja alcalinidad, facilita la variación del pH por efecto de los iones liberados por las raíces de las plantas afectando de forma directa la productividad del suelo debido que se modifica el grado de solubilidad de los minerales dificultando la absorción de estos por parte de las plantas.

- Características biológicas: el agua está constituida por diversos microorganismos que pueden provenir de fuentes naturales o de vertimientos cloacales y/o industriales; algunos de los microorganismos más importantes desde el punto de vista de la ingeniería sanitaria son las algas, bacterias y hongos. Dentro de las características biológicas del agua de riego se encuentran la demanda biológica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y el carbón orgánico total (Orellana, 2005).
- ✓ Demanda Biológica de Oxígeno: cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos en la oxidación de la materia orgánica biodegradable.
- ✓ Demanda Química de Oxígeno: cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el, material orgánico biodegradable y no biodegradable.
- ✓ Carbón Orgánico Total: es la medida de agentes contaminantes orgánicos presentes en un sistema de agua.
- Normatividad Colombiana para aguas de riego. El Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible presentado mediante el Decreto 1076 de 2015 contiene la normatividad colombiana para aguas de riego integrando un conjunto de decretos y leyes expedidos en años anteriores.

A continuación, se describirá la normatividad colombiana para aguas de riego teniendo en cuenta el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible:

- ✓ Sección 11: Estudio de factibilidad sobre aprovechamiento de aguas para proyectos de riego. En esta sección se estipula que la autoridad competente podrá otorgar permisos especiales por términos no mayores a un año para la realización de estudios de factibilidad sobre aprovechamiento de agua con el fin

de realizar proyectos de riego según lo estipulado en el decreto 2858 de 1981, artículo 1. En adición, esta sección contempla los procesos de solicitud, vista e informe, solicitud de concesión de aguas y términos y vigencias de la concesión para proyectos de aprovechamiento de agua en operaciones de riego.

- ✓ Se establece la reglamentación necesaria para desarrollar proyectos de riego planteando en el Artículo 2.2.3.2.14.3 la necesidad de una servidumbre en la construcción de acueductos destinados al riego y toda clase de trabajos dirigidos al aprovechamiento del recurso hídrico (Decreto 1541 de 1978, art. 127); de igual forma se plantea en el Artículo 2.2.3.2.19.4. la necesidad de una aprobación por parte de una autoridad competente para la construcción de acueductos rurales destinados para para dicha actividad la cual puede ser negada por conveniencia pública (Decreto 1541 de 1978, art. 187).
- ✓ El artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible presenta los criterios de calidad admisibles para la destinación del agua para uso agrícola centrándose únicamente en el contenido de metales; sin embargo, la resolución 1207 de 2014 en su artículo 7 brinda una información más completa de los valores máximos permisibles de las características físicas, químicas y biológicas que rigen los criterios de calidad del agua residual destinada al uso agrícola. A continuación, la **Tabla 10** contiene los valores límites permisibles de cada una de los parámetros de calidad del agua destinada a actividades de riego.

Tabla 10. Criterios de calidad del agua admisibles para uso agrícola.

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE
FÍSICOS		
pH	Unidades de pH	6.0 - 9.0
Conductividad	uS/cm	1500
MICROBIOLÓGICOS		
Helminths Parásitos Humanos	Huevos y larvas /L	1.0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1.0
Salmonella	NMP/L	1.0
QUÍMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	1.5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1.00
Iones		
Cianuro Libre	mg CN/L	0.2
Cloruros	mg Cl/L	300
Fluoruros	mg F/L	1.0
Sulfatos	mg SO ₄ /L	500

Tabla 10 (Continuación)

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Metales		
Aluminio	mg Al/L	5.0
Berilio	mg Be/L	0.1
Cadmio	mg Cd/L	0.01
Cinc	mg Zn/L	3.0
Cobalto	mg Co/L	0.05
Cobre	mg Cu/L	1
Cromo	mg Cr/L	0.1
Hierro	mg Fe/L	5
Mercurio	mg Hg/L	0.002
Litio	mg Li/L	2.5
Manganeso	mg Mn/L	0.2
Molibdeno	mg Mo/L	0.07
Níquel	mg Ni/L	0.2
Plomo	mg Pb/L	5.00
Sodio	mg Na/L	200
Vanadio	mg V/L	0.1
Metaloides		
Arsénico	mg As/L	0.1
Boro	mg B/L	0.4
No Metales		
Selenio	mg Se/L	0.02

Fuente: Elaboración propia basado en Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2014.

Adicionalmente a los criterios planteados anteriormente en la **Tabla 10**, el Decreto 1076 establece que el NMP de coliformes totales no debe exceder de 5.000 y el NMP de coliformes fecales no debe exceder 1.000, cuando se use el agua en actividades de riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto.

Comparación de propiedades del agua de Omán vs. Caso colombiano. A continuación, se presentan tres escenarios comparativos en los cuales inicialmente se evalúan las propiedades del agua producida en campos de PDO y las que se presentan en la Cuenca de los Llanos Orientales, y posteriormente se realiza la comparación de cada una de ellas con respecto a la normatividad colombiana.

En la **Tabla 11** se presenta una comparación entre las propiedades del agua producida en campos de PDO y las propiedades del agua en la Cuenca de los Llanos Orientales; identificándose una concentración menor de sodio, cloro y azufre total como ion sulfato (SO_4) en el caso colombiano con respecto al agua de Omán, la cual presenta una menor concentración de boro, calcio, magnesio y HCO_3 en comparación al agua de fondo presente en la Cuenca de los Llanos Orientales. A partir de lo anterior, se puede concluir que el agua del caso colombiano presenta mayor dureza al presentar una mayor concentración de calcio y magnesio facilitando la formación de incrustaciones o corrosión en los sistemas de distribución del agua de riego y disminuyendo la eficiencia de herbicidas debido a la precipitación de sales insolubles generadas a partir de la reacción entre los iones de calcio y magnesio y las sales de los herbicidas. (Neira Gutierrez, 2006)

Tabla 11. Tabla comparativa de las propiedades del agua de Omán vs. Caso colombiano.

Parámetro	Omán	Caso Colombiano	Caso Colombiano VS Omán
Sodio (mg/l)	2470	1490	Menor
Cloruros (mg/l)	3201	2570	Menor
Boro (mg/l)	4.59	8.95	Mayor
HCO_3 (mg/l)	189	378	Mayor
Calcio (mg/l)	62	429	Mayor
magnesio (mg/l)	22	72,30	Mayor
Azufre total como SO_4	283	8,15	Menor
Ca/SO_4 (mg/l)	0.22	52,64	Mayor
Ca/Mg (mg/l)	2.82	5,93	Mayor
Na/Cl (mg/l)	0.77	0,58	Menor
Cl/Br (mg/l)	697.39	287	Menor

Fuente: Elaboración propia basado en: Breuer R et al, 2010 y pruebas de laboratorio de calidad de agua en 2018 del caso colombiano.

Por otra parte, en la **Tabla 12** se presenta una comparación entre las propiedades del agua de Omán y los límites máximos permisibles de cada una de ellas según la normatividad colombiana, la cual permite identificar que existen diferentes parámetros del agua de Omán como el contenido de cloruros, cinc, sodio y boro que se encuentran fuera del límite máximo según la normatividad local, por lo cual esta agua no podría ser utilizada en actividades agrícolas en Colombia, siendo necesaria una serie de tratamientos para llevar estos parámetros al límite permitido.

Tabla 12. Tabla comparativa de las propiedades del agua de Omán vs. Normatividad Colombiana.

Parámetro	Unidad De Medida	Caso Omán	Límite Máximo Normatividad Colombiana	Apto / No apto
Cloruros	mg Cl/L	3201	300	No apto
Sulfatos	mg SO4/L	283	500	Apto
Aluminio	mg Al/L	0.07	5	Apto
Zinc	mg Zn/L	33.87	3	No apto
Hierro	mg Fe/L	<0.01	5	Apto
Litio	mg Li/L	0.11	2.5	Apto
Manganeso	mg Mn/L	0.063	0.2	Apto
Plomo	mg Pb/L	<0.001	5	Apto
Sodio	mg Na/L	2470	200	No apto
Boro	mg B/L	4.59	0.4	No apto
Nitratos	mg /L	<0.2	5	Apto

Fuente: Elaboración propia basado en: Breuer R et al, 2010 y Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014.

Finalmente se presenta en la **Tabla 13** la comparación entre el agua del caso colombiano con respecto a la normatividad local, logrando identificar que algunos parámetros como la conductividad, los fenoles totales, los cloruros y el sodio se encuentran fuera del cumplimiento de la legislación al presentar concentraciones que sobrepasan los límites requeridos para procesos agrícolas en Colombia, razón por la cual es necesario realizar una serie de tratamientos al agua de la cuenca de los llanos orientales, para posteriormente ser usada en procesos de riego. Sin embargo, existen parámetros como el pH, los sulfatos y el hierro que se encuentran dentro de los rangos de aceptación normativos

Tabla 13. Tabla comparativa de las propiedades del agua caso colombiano vs. Normatividad Colombiana.

Parámetro	Unidad De Medida	Caso Colombiano	Límite Máximo Normatividad Colombiana	Apto / No Apto
pH a 25°C	Unidades de pH	7,22	6.0 - 9.0	Apto
Conductividad	uS/cm	8850	1500	No apto
Fenoles Totales	mg/L	8.04	1.5	No apto
Cloruros	mg Cl/L	3000	300	No apto
Sulfatos	mg SO4/L	8.15	500	Apto
Hierro	mg Fe/L	2.62	5.0	Apto
Sodio	mg Na/L	1490	200	No apto

Fuente: elaboración propia basada en: pruebas de laboratorio de calidad de agua en 2018 del caso colombiano y Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014.

- Parámetros claves de calidad del agua. La calidad del agua se mide de acuerdo con distintos parámetros que permiten cuantificar el grado de alteración de las cualidades naturales del agua, permitiendo definir el uso en el cual puede ser aprovechada. Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, es posible identificar una serie de parámetros claves a la hora de evaluar la calidad del agua destinada a actividades de riego, entre las cuales se encuentra la cantidad de sólidos disueltos, el contenido de grasas y aceites, la concentración de metales pesados y los sólidos totales presentes en el agua, propiedades que son claves para el desarrollo del presente proyecto que plantea una relación entre las aguas de producción petrolera y aguas para riego.
- ✓ Sólidos Disueltos Totales (TDS): los sólidos disueltos totales representan el contenido de sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en el agua en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión micro-granular, es decir, es la suma de los minerales, sales, metales, cationes o aniones que se encuentran disueltos en el agua. Los componentes químicos que se presenta comúnmente como sólidos disueltos totales son el calcio, potasio, nitratos, sodio, fosfato y cloruro los cuales se detectan mediante un medidor de TDS que basa su funcionamiento en la conductividad eléctrica del agua. La FAO (Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación) establece una concentración de <450 mg/l de total de sólidos en solución para aguas destinadas a actividades de riego (Ministerio de Salud de Peru, 2008)
- ✓ Aceites y Grasas: Son compuestos orgánicos constituidos por ácidos grasos de origen animal y/o vegetal. El contenido de grasas y aceites reduce la reoxigenación del agua mediante la interfaz aire-agua, disminuyendo de esta forma el oxígeno disuelto y aumentando el nivel de absorción de la radiación solar, dificultando la producción interna de oxígeno disuelto.
- ✓ Metales: la presencia de una alta concentración de metales como el mercurio, cromo, plomo, cromo y cadmio en aguas de riego representa un riesgo importante para la agricultura y la salud humana debido a su carácter no biodegradable, la toxicidad y su biodisponibilidad. Los metales se encuentran como componentes naturales de la corteza terrestre en forma de minerales, sales u otros compuestos los cuales pueden ser absorbidos por las plantas incorporándose a las cadenas tróficas (Mancilla Villa , y otros, 2011).
- ✓ Sólidos Totales: contempla el contenido total de materia solida tanto orgánica como inorgánica que se encuentra disuelta o suspendidos en el agua, la cual se obtiene como residuo después de someter el agua a un proceso de evaporación a una temperatura de 103 a 105 °C.

4.4.1.2 Humedales artificiales para el manejo del agua de producción.

Los humedales artificiales diseñados para el manejo de agua de producción tomando como referencia el humedal de Omán abarcan un área aproximada de 600 hectáreas en las cuales se encuentran: un separador de agua-aceite con el fin de recuperar el petróleo crudo restante del agua producida, un humedal de flujo superficial que degrada los hidrocarburos disueltos en el agua y un área de evaporación que reduce la cantidad de agua concentrando el efluente para proporcionar una fuente de producción de sal.

A continuación, se describen algunos parámetros claves de diseño de humedal artificial para el manejo del agua de producción:

Ubicación: se debe garantizar el flujo del agua de producción bajo los efectos de la gravedad permitiendo que el sistema funcione con un requerimiento mínimo de energía externa, aprovechando al máximo la topografía local siempre y cuando esta ubicación este cerca de las instalaciones de producción de petróleo.

Temperatura: en los humedales ocurren reacciones físicas, químicas y biológicas que son influenciadas por la temperatura, la cual es una variable que se relaciona con la radiación solar y afecta de forma directa la velocidad de la fotosíntesis y el metabolismo de las bacterias responsables de la depuración de las aguas de producción. (Patiño Gómez, 2012).

Viento: el viento tiene efectos positivos sobre los diferentes procesos que se llevan a cabo en un humedal, sin embargo, el viento facilita la propagación de olores generados por los humedales a las comunidades aledañas; por tal motivo se recomienda ubicarlos a 5000 o 1000 metros de las comunidades. (Patiño Gómez, 2012)

Vegetación: se debe seleccionar adecuadamente las plántulas que serán utilizadas en los humedales dependiendo de las condiciones tanto del suelo y climáticas en las cual se decide construir el humedal. La vegetación de un humedal se encarga de tareas muy importantes que van desde la degradación de los hidrocarburos disueltos en el agua hasta el transporte del oxígeno a la parte más profunda y cuando estas mueren se convierten en un sustrato para el crecimiento de la película microbiana.

Relación evaporación y precipitación: es indispensable garantizar un equilibrio entre la evaporación y precipitación debido a que al ser positiva la relación entre estos dos procesos a favor de la evaporación se genera una mayor concentración de agentes contaminantes aumentando la salinidad del medio y afectando de forma directa el equilibrio biológico del humedal (Patiño Gómez, 2012).

4.4.1.3 Caracterización biológica de Caña en Colombia. La caña de azúcar (*Saccharum officinaum* L) es una gramínea tropical con tallos gruesos y fibrosos que pueden crecer entre tres y cinco metros de altura con un grosor aproximado de dos a cinco centímetros; conteniendo en su interior un gran contenido de sacarosa la cual es procesada para la obtención de azúcar (Ramírez, 2008). A continuación, se presenta en la **Tabla 14** la clasificación botánica correspondiente a la caña de azúcar *Saccharum officinaum* L permitiendo realizar una descripción morfológica de la caña colombiana identificada como una planta monocotiledónea que permanece a la familia de las pomáceas.

Tabla 14. Clasificación botánica caña de azúcar.

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Subfamilia	Panicoideae
Tribu	Andropogoneae
Género	Saccharum
Especie	S. officinarum L.

Fuente: Elaboración propia basada en “Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinaum* L)” de: SAGARP., 2015.

Las flores de la caña de azúcar son hermafroditas lo cual les permiten actuar como organismos masculinos y femeninos a la vez sin ser polinizadas por ningún insecto ya que este proceso se realiza a través del viento y no es necesario para su propagación. La caña de azúcar como se observa en la **Tabla 15** se compone principalmente de azúcares solubles, específicamente sacarosas y azúcares insolubles de origen estructural (celulosa, hemicelulosa y lignina) (González & González , 2004).

Tabla 15. Composición química de la caña de azúcar *Saccharum officinarum* L.

Fraciones	% MS
Materia seca	29
Cenizas	5
Lignina	7
Celulosa	27
Hemicelulosa	20
Azúcares solubles	40
Proteína bruta, Nx6.25	2

Fuente: Elaborado por el autor basado en: “Manipulación de la fermentación en ensilajes de caña de azúcar y su valor alimenticio para corderos”. De Cuarón, L. y Shimada, S. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 1981.

Existen diferentes parámetros que se deben tener en cuenta para el cultivo de caña de azúcar *Saccharum officinarum* L los cuales son:

- Tipo de suelo: este tipo de caña se cultiva mejor en suelos francos, profundos y con buen sistema de drenaje que contengan un pH ente 5.5 y 7.8.
- Requerimiento de agua: los cultivos de caña necesitan grandes cantidades de agua requiriendo una precipitación mínima de 1500mm por temporada; sin embargo, este tipo de cultivos se consideran que tienen un uso eficiente del agua.
- Clima: la caña de azúcar *Saccharum officinarum* L se cultiva en climas tropicales y subtropicales con temperaturas entre 16 y 30 grados centígrados y a una altura entre los 0 y 1000msnm.
- Cosecha: se debe tener en cuenta que por cada planeación de caña se extraen aproximadamente 4 o 5 cortes (cosechas).

4.4.1.4. Comparación de las características biológicas de caña Omán vs Colombia. A continuación, la Tabla 16 presenta una comparación de las características biológicas de las cañas que se cultivan en Colombia y en Omán, en la cual se logra identificar que la caña de azúcar colombiana presenta un tallo grueso y fibroso que puede alcanzar una altura de 5 metros, mientras que la caña de Omán se compone de un tallo largo y leñoso que puede alcanzar una altura de 6 metros y puede alcanzar un diámetro de 2 centímetros siendo está más delgada que la caña colombiana. **La Tabla 16** permite identificar que la caña cultivada en Colombia presenta una longitud de hoja mayor y una limitación en cuanto al pH del suelo el cual debe estar entre 5.5 a 7.8 reduciendo las zonas en las cuales se puede cultivar este tipo de caña.

Tabla 16. Tabla comparativa de las características biológicas de la caña colombiana y la caña de Omán.

	Caña Colombiana	Caña Omán
Nombre Científico	Saccharum officinarum L	Phragmites australis
Reino	Vegetal	Vegetal
Familia	Poáceas	<i>Gramineae</i>
Tribu	Andropogoneas	Arundinae
Genero	Saccharum	Phragmites
Especie	Spontaneum y Robustum	Australis y Chrusathus
Humedad Relativa	mediana o alta	mediana o alta
pH	5.5 a 7.8	Sin limitacion
Altura Del Tallo	5 m	6 m
Diámetro Del Tallo	2 - 5 cm	2 cm
Longitud De La Hoja	30 - 60 cm	20 - 45 cm
Ancho De La Hoja	1 - 5 cm	1 - 5 cm
Longitud De Inflorescencia	20 - 60 cm	15 a 50 cm
Altura De Cultivo	0 - 1000 msnm	1200 msnm

Fuente: elaborado por el autor basado en: "Cultivos para la producción sostenible de biocombustibles: una alternativa para la generación de empleos e ingresos". De Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo. Modulo V caña de azúcar. 2008. Y "Phragmites Australis in the Humboldt bay region. Ecological society of America" de GEDIK, T.

4.4.2 Elementos Financieros. A continuación, se realizará una descripción con fines académicos e ilustrativos de los costos asociados a la construcción de un humedal artificial tenido en cuenta cada una de sus etapas.

4.4.2.1 Adecuación del Suelo y construcción del humedal. Los costos asociados a la adecuación del suelo y construcción del humedal se presentan en la **Tabla 17**, en la cual se contemplan desde las actividades preliminares hasta la conformación del humedal, con los materiales que se requieren para la construcción de un humedal. Los costos almacenados en la **Tabla 17** se basan en un trabajo de grado elaborado en el año 2012 por José Manuel Patiño en la Universidad Javeriana, en el cual se evaluaron los costos de cada una de las operaciones y materiales en los municipios de Mocoa, Puerto Asís, Tumaco, Santa Marta, Valledupar, Montería, Quibdó, Tame y Ocaña para posteriormente determinar un valor máximo y mínimo cada uno de estos elementos en Colombia. A partir de estos costos, tomando en cuenta un incremento total del 27.83% que corresponde a la sumatoria del IPC (índice de precios al consumidor) entre los años 2012 y 2018 se estimó la variación del valor de cada uno de los productos y el requerimiento de cada uno de ellos para el presente proyecto, se presenta en la **Tabla 17** el análisis de costos.

Tabla 17. Análisis de costos Unitarios para la construcción de un humedal en Colombia.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MIN	MAX
Preliminares			
Localización Y Replanteo	m ²	\$ 2,091	\$ 3,154
Campamentos De Obra	Un	\$ 1,168,297	\$ 2,240,593
Excavaciones			
Descapote Y Limpieza	m ³	\$ 14,965	\$ 37,416
Excavaciones A Mano	m ³	\$ 14,556	\$ 43,717
Excavaciones A Maquina	m ³	\$ 16,294	\$ 38,910
Concretos			
Base Concreto Pobre (E=0.05)	m ³	\$ 213,660	\$ 349,589
Concreto 3000 Psi (Impermeabilizado)	m ³	\$ 385,356	\$ 737,574
Concreto 3000 Psi	m ³	\$ 307,415	\$ 518,813
Refuerzo Acero (60000 PSI Figurado)	Ton	\$ 3,161,725	\$ 4,339,872
Carpintería Metálica			
Rejilla Em Acero A 36 Dim. 3/8" Y Separación De 1"	Ton	\$ 5,486,552	\$ 10,093,265
Impermeabilización			
Compactación Material Existente	m ³	\$ 5,481	\$ 10,722
Geo membrana	m ³	\$ 17,756	\$ 30,637
Rellenos			
Conformación Diques Material En Sitio	m ³	\$ 7,557.31	\$ 14,265.83

Tabla 17 (Continuación)

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MIN	MAX
Interconexión			
Tubería Alcantarillado 4"	M	\$ 20,524	\$ 26,227
Tubería Alcantarillado 6"	M	\$ 33,756	\$ 39,459
Tubería Alcantarillado 8"	M	\$ 47,652	\$ 53,355
Tubería Alcantarillado 10"	M	\$ 76,010	\$ 81,713
Tubería Alcantarillado 12"	M	\$ 114,141	\$ 119,842
Tubería Alcantarillado 14"	M	\$ 136,880	\$ 142,583
Tubería Alcantarillado 16"	M	\$ 172,968	\$ 178,671
Gaviones Entrada Y Salida Piedra 4"	m ³	\$ 116,499	\$ 232,435
Tubería Perforada Alcantarillado 4"	M	\$ 25,087	\$ 39,856
Tubería Perforada Alcantarillado 6"	M	\$ 38,318	\$ 53,088
Tubería Perforada Alcantarillado 8"	M	\$ 52,215	\$ 66,983
Tubería Perforada Alcantarillado 10"	M	\$ 80,573	\$ 95,342
Tubería Perforada Alcantarillado 14"	M	\$ 141,443	\$ 156,211
Tubería Perforada Alcantarillado 16"	M	\$ 177,530	\$ 192,300
Obras De Arte De Interconexión 80X80	Un	\$ 469,158	\$ 836,534
Obras Exteriores			
Cerramiento Planta Malla Eslabonada	M	\$ 62,972	\$ 153,431
Cunetas Aguas Lluvias	M	\$ 39,180	\$ 73,665
Afirmado Y Compactado De Vías	m ²	\$ 43,893	\$ 78,734
Empradizarían	m ²	\$ 3,280	\$ 6,030
Conformación Humedal			
Material De Sustrato	m ³	\$ 9,559	\$ 28,555
Vegetación	Un	\$ 1,512	\$ 12,783
Grava 3/4-1"	m ³	\$ 54,770	\$ 111,445

Fuente: Elaboración propia adaptada de "Costos de inversión inicial, operaciones y mantenimiento de tratamientos naturales de aguas residuales para pequeñas comunidades en Colombia". De PATIÑO, José. 2012. Universidad Pontificia Javeriana. (Datos de tesis inicial + 27.83% de incremento).

4.4.2.2 Plantas acuáticas y abonos. Para el diseño de un humedal se recomienda usar aproximadamente un número de 10 plantas por cada metro cuadrado del humedal. La **Tabla 18** presenta los costos por unidad asociados a plantas, abonos e insumos requeridos en un humedal.

Tabla 18. Análisis de costos Unitarios para plantas, abonos e insumos.

Descripción	Costo
Plantas (\$/Und)	\$ 1,512
Abonos (\$/kg)	\$ 2,429
Herbidas (\$/l)	\$ 15,340
Gasolina (\$/gln)	\$ 11,505

Fuente: Elaboración propia adaptada de “Costos de inversión inicial, operaciones y mantenimiento de tratamientos naturales de aguas residuales para pequeñas comunidades en Colombia”. De PATIÑO, José. 2012. Universidad Pontificia Javeriana. (Datos de tesis inicial + 27.83% de incremento).

4.4.2.3 Mantenimiento. El mantenimiento de humedal se debe realizar mediante una secuencia de inspección que se ejecuta todas las semanas alrededor del humedal, verificando cada uno de sus componentes, con el fin de solucionar cada uno de los problemas encontrados. Los costos asociados al mantenimiento de un humedal se encuentran asociados a la dotación del personal y mano de obra por actividades de donde se encuentran almacenados en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Análisis de costos mantenimiento de un humedal.

Descripción	Costo
Dotación (juego: guantes carnaza y caucho, impermeable, overol, botas, linterna, gafas)	\$ 229,711
Desenlode (costo extracción y retiro x m ³)	\$ 25,566

Fuente: Elaboración propia adaptada de “Costos de inversión inicial, operaciones y mantenimiento de tratamientos naturales de aguas residuales para pequeñas comunidades en Colombia”. De PATIÑO, José. 2012. Universidad Pontificia Javeriana. (Datos de tesis inicial + 27.83% de incremento).

4.4.2.4 Personal y Gastos Administrativos. La **Tabla 20** presenta los costos de mano de obra en referencia a la base de datos de Construdata y los costos administrativos involucrados en un humedal.

Tabla 20. Costos de mano de obra.

Descripción	Costo (\$/Día)
Ayudante Entendido	\$ 68,503
Ayudante Raso	\$ 48,634
Topógrafo	\$ 74,104
Ingeniero Sanitario	\$ 191,745
Secretaria	\$ 57,524
Auxiliar	\$ 66,472
Laboratorista	\$ 79,255

Fuente: Elaboración propia adaptada de “Costos de inversión inicial, operaciones y mantenimiento de tratamientos naturales de aguas residuales para pequeñas comunidades en Colombia”. De PATIÑO, José. 2012. Universidad Pontificia Javeriana. (Datos de tesis inicial + 27.83% de incremento).

4.4.3 Elementos Sociales. A continuación, se evaluarán los elementos sociales involucrados en el presente proyecto teniendo en cuenta que la dimensión social mantiene implícito el concepto de equidad intergeneracional, el cual considera que los costos del desarrollo económico o ambiental presente no deben afectar la demanda de recursos de las generaciones futuras.

4.4.3.1 Stakeholders del proyecto. Los Stakeholders o “grupos de interés”, son aquellos actores a los que puede afectar de manera significativa las diferentes actividades, productos y/o servicios de una organización, y cuyas acciones en contra afectan la capacidad de desarrollar con éxito los proyectos y estrategias de la organización para alcanzar sus objetivos (Global Reporting Initiative, 2006). Existen diferentes herramientas y modelos de gestión que permiten la relación de los Stakeholders con la organización de los cuales se destacan tres: (i) G3.1, desarrollada por Global Reporting Initiative, (ii) la norma SGE21, desarrollada por Foretica en el año 2010 y (iii) la norma AA100 de la organización británica Accountability, la cual se tomará como referencia para el presente proyecto debido a que desarrolla una metodología basada en la inclusión que permite identificar los Stakeholders y el compromisos de una organización hacia ellos con el objetivo de garantizar una mejora continua de la relación entre las dos partes permitiendo integrar mediante una serie de pautas los Stakeholders a los objetivo y estrategias de la organización.

La norma AA1000 fue establecida en 1999 basada en tres criterios fundamentales que permiten evaluar las relaciones que la empresa establece con su grupo de interés, los cuales son la materialidad, la conformidad y la credibilidad (Granada Revilla & Trujillo Fernández, 2011). La AA1000 está compuesta por una serie de normas entre las cuales se encuentra la AA1000SES (Stakeholder Engagement Standard), cuyo fundamento es buscar incorporar los stakeholders en las diferentes estrategias, actividades, operaciones y dirección de la empresa, siendo reconocido

cada grupo de interés como un elemento fundamental en las actividades de rendición de cuentas obligando a las empresas a informar, explicar y responder a los stakeholders sobre sus decisiones acciones y desempeños. (AccountAbility, 2015)

Una organización puede tener muchos stakeholders; cada una con características, intereses y preocupaciones diversos que pueden estar en conflicto entre sí. Una identificación inicial de los stakeholders puede basarse en fuentes externas, como análisis de investigación y análisis de pares, así como también fuentes internas como personas con conocimiento de la organización y asuntos relacionados con la actividad y el compromiso del proyecto (AccountAbility, 2015), sin embargo, la norma AA1000SES plantea que una estrategia para identificar los Stakeholders en la cual se debe considerar el alcance del compromiso y guiarse por los atributos de los mismos, dentro de los cuáles se consideran:

- Dependencia: individuos o grupos que dependan de forma directa o indirecta de las actividades, productos y/o servicio de la organización y del desempeño asociado.
- Responsabilidad: individuos o grupos con los cuales la organización tiene o puede tener responsabilidades de tipo legal, comercial, operativo o ético/moral.
- Tensión: individuo o grupo que necesita atención inmediata por parte de la organización con respecto a temas financieros, sociales o ambientales.
- Influencia: individuo o grupos que puedan tener algún tipo de impacto en la toma de decisiones operativas o estratégicas de la organización o de las partes interesadas.
- Diversas perspectivas: individuo o grupos que tienen diferentes perspectivas y pueden llevar a un nuevo entendimiento de la situación o identificar nuevas oportunidades.

Teniendo en cuenta la estrategia descrita anteriormente para la identificación de los Stakeholders planteada en la norma AA1000SES se identificaron cuatro grupos de interés para el presente proyecto los cuales son: las empresas del sector petrolero que operan en los llanos orientales, los sectores agrícolas que se verán afectados con dicho proyecto, las comunidades aledañas al lugar donde se construirá el humedal y finalmente los organismos gubernamentales que estarán involucradas en el presente proyecto. A continuación, se describirá cada uno de los Stakeholders mencionados anteriormente.

4.4.3.2 Empresas del sector Petrolero. En la cuenca de los llanos orientales hay presencia de una gran cantidad de compañías petroleras, tanto nacionales como internacionales, involucradas en el proceso de extracción de hidrocarburos las cuales son consideradas como grupos de interés para el presente proyecto debido a que presentan diferentes perspectivas frente a las posibles soluciones de una excesiva producción de agua. En la **Tabla 21** se encuentran los nombres de algunas de las compañías petroleras que operan en la cuenca de los llanos orientales, según lo reportado en por la ANH en su informe presentado el 31 de julio del año 2018.

Tabla 21. Compañías petroleras que operan en la cuenca de los llanos orientales.

No	Compañía	No	Compañía
1	Colombia Energy Development Co	12	Occidental De Colombia Inc
2	Ecopetrol S.A.	13	Omega Energy Colombia
3	Emerald Energy Plc	14	Pacific Stratus Energy Colombia Corp
4	Equion Energía Limited	15	Parex Resources Colombia
5	Geopark Colombia S.A.S	16	Perenco Colombia Ltd
6	Hocol S.A.	17	Petróleos Del Norte S.A.
7	Integra Oil & Gas S.A.S	18	Petróleos Sud Americanos S.A.
8	Lewis Energy Colombia Inc	19	Santa Maria Petroleum Inc.
9	Loh Energy Sucursal Colombia	20	Tecpetrol Colombia Sas
10	Meta Petroleum Corp	21	Verano Energy Barbados
11	Occidental Andina Llc	22	Vetra Exploracion Y Produccion Colombia S.A.S

Fuente: Elaboración propia basada en “Informe de prospectividad: Área de crudos pesados. Colombia”, de ANH, 2008.

Todas estas empresas son agentes importantes dentro del desarrollo de nuevos proyectos sostenibles para el sector, debido a la réplica de estrategias exitosas que se puedan llevar a cabo.

4.4.3.3 Sector Agrícola. La región de la Orinoquia en Colombia se compone de diversas subregiones las cuales se pueden agrupar de manera general en tres: el piedemonte llanero con el 10 % del área compuesta por los departamentos del Meta, Arauca y el vichada, la altillanura bien drenada con un 71 % del área que comprende las Sabanas del Meta y el Vichada y finalmente la altillanura inundable con el 19 % del área en los departamentos de Casanare y Arauca.

Dichas sub regiones descritas anteriormente, presentan morfologías externas diferentes por lo cual tienen fuertes restricciones en suelos que limitan su potencial agropecuario. (González Bottia, 2005). La economía de la región de la Orinoquia comprende la ganadería extensiva en las zonas de sabana y la agricultura de cultivos transitorios y permanentes en el piedemonte llanero, las cuales son

actividades económicas que dependen de manera directa de una buena calidad del suelo y del agua presente en la región; razón por la cual se considerados el sector agrícola como Stakeholder debido a que puede ser afectado con el desarrollo del presente proyecto. A continuación, se presenta en la **Tabla 22** los diferentes cultivos presentes en la región Orinoquia con su porcentaje de distribución del área sembrada por cada departamento logrando identificar una predominancia de los cultivos de Arroz y Palma de Aceite.

Tabla 22. Distribución del área sembrada por departamento.

Cultivo	% Área Sembrada (Meta)	% Área Sembrada (Casanare)	% Área Sembrada (Vichada)
Palma de Aceite	57.11	37.44	57.11
Arroz	12.29	55.66	12.29
Maíz	5.57	1.07	5.57
Plátano	4.41	1.36	4.41
Caña Azucarera	2.36	NA	2.36
Cacao	1.95	0.43	1.95
Cítricos	1.7	NA	1.7
Yuca	1.41	1.24	1.41
Caña Panelera	0.38	NA	0.38
Otros	12.82	2.79	12.82

Fuente: Elaboración propia basada en “Reporte de estado actual Llanos Orientales”, de NES Naturaleza. Colombia. 2016.

4.4.3.4 Comunidades. El campo Castilla se encuentra ubicado en el municipio de Castilla la Nueva en el departamento del Meta, contando con una población total para el año 2016 de 9.899 habitantes según lo registrado por el DANE. La comunidad del municipio de Castilla la Nueva se considera como un grupo de interés para el presente proyecto debido a que se mantiene una responsabilidad con ellos de generar beneficios que mitiguen las afectaciones actuales del campo; de igual forma se consideró la influencia que tiene la comunidad en las actividades de extracción de hidrocarburos

4.4.3.5 Gobierno. Para la ejecución de cualquier tipo de proyecto que afecte de forma directa e indirecta, ya sea generando beneficios o afectaciones a una comunidad, se debe contar con el apoyo y/o permisos expedidos por las diferentes entidades gubernamental requeridas como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), la Corporación Autónoma Regional de la zona (CAR), entre otras entidades que se pueden ver involucradas en el proyecto. Para el presente proyecto es necesario contar con la revisión y aprobación de las entidades de orden local como lo es la CAR, debido al alcance del humedal que se desarrollará exclusivamente en la zona de los llanos orientales.

De acuerdo a la información recopilada en este capítulo la viabilidad de la implementación de un humedal para tratamiento de aguas de producción petroleras, está marcado por diferentes factores que van desde unas partes interesadas como las empresas productoras, el gobierno nacional, las comunidades presentes en la región, entre otras; así como una relación técnica de parámetros de calidad de agua y la capacidad de tratamiento por las especies biológicas, así como la normatividad vigente para Colombia y la inversión económica que puede llegar a requerirse.

4.5 FASE 5: ESTRATEGIA PARA EL USO SOSTENIBLE DE AGUA DE PRODUCCIÓN PARA RIEGO DE SUELOS EN UN CAMPO COLOMBIANO.

Con el presente proyecto se evidencia la importancia de incrementar el número de investigaciones asociados a las diferentes técnicas exitosas de la industria desarrolladas en otros países con el fin de lograr un crecimiento continuo de la industria del petróleo en nuestro país basándonos en la en las experiencias tanto positivas como negativas de países más desarrolladas con el objetivo de lograr una industria sostenible y no cerrar las oportunidades de desarrollo por falta de experiencia.

Como consolidación del estudio se relaciona a continuación aspectos concluyentes del estudio de caso, partiendo de las variables evaluadas y recomendadas a tener en cuenta para la implementación de la estrategia.

4.5.1 Variables técnico – Económicas. Fueron las variables relacionadas a aspectos técnico financieros relacionados con el uso eficiente del agua de producción en un sistema de riego para el desarrollo de un humedal artificial; entre las cuales se evidencian diferentes aspectos técnicos para garantizar una calidad del agua adecuada para actividades de riego evaluando sistemas adicionales de tratamiento y las plántulas óptimas para este proyecto, asimismo se evidencia la necesidad de evaluar los costos de implementación de un humedal artificial con el fin de garantizar la viabilidad financiera del proyecto.

- **Uso Final del agua:** es una de las variables más importantes del proyecto debido a que el uso final del agua de producción establece los parámetros de calidad requeridos tanto a nivel normativo como técnico garantizando un buen desarrollo del proyecto y por consiguiente involucra la implementación de una serie de tratamientos para lograr dichos estándares de calidad afectando de forma directa los costos del proyecto.
- **Calidad del agua:** siendo el agua la materia prima para el desarrollo de este proyecto es indispensable evaluar su calidad garantizando el cumplimiento tanto normativo como técnico para aguas de riego garantizando un crecimiento adecuado de las plantas y reduciendo al máximo la afectación del suelo; por tal motivo es indispensable evaluar sus características físicas, químicas y biológicas.
- **Plántulas para tratamiento:** es indispensable identificar las plantas adecuadas para el desarrollo de un humedal artificial en una zona de condiciones climáticas y de suelo tan característica de los llanos orientales garantizando un óptimo cultivo de dichas plantas y evitando la presencia de plagas que afecten el desarrollo de dicho cultivo.
- **Sistemas adicionales de tratamiento:** el agua de producción debe ser sometida a unos tratamientos adicionales con el fin de cumplir con los parámetros normativos para el uso del agua en actividades de riego; por tal motivo es indispensable evaluar los sistemas de tratamiento requeridos para garantizar un uso óptimo del agua de producción que garantice la viabilidad del proyecto.
- **Costos de Implementación:** con el fin de lograr una viabilidad tanto técnica como financiera del proyecto es importante realizar un análisis de los costos asociados a la implementación de un humedal artificial teniendo presente los diferentes costos iniciales y de mantenimiento requeridos para dicho proyecto.

4.5.2 Variables Sociales. La sociedad presenta un papel muy importante para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto debido a que se verá afectada ya sea a nivel positivo o negativo por el desarrollo del mismo: por tal motivo estas variables se encuentran relacionadas con la Normatividad Colombiana que rige la actividad del proyecto y los diferentes grupos de interés que se mantienen una relación directa o indirecta con el proyecto.

- **Normatividad Colombiana:** la normatividad colombiana regula cualquier actividad que pueda causar una afectación directa o indirecta a las comunidades o recursos naturales de la zona donde se realizará dicha actividad; por tal motivo es indispensable evaluar la normatividad que regula las actividades agrícolas donde se especifica la calidad del agua destinada a actividades de riego la cual se plantea en la resolución 1207 de 2014.

- Stakeholders (Empresas, Sector agrícola, comunidades, gobiernos): los Stakeholders son los diferentes grupos de interés que mantienen una relación directa o indirecta con el proyecto por lo cual es importante identificar cada uno de estos grupos y su influencia con el desarrollo del proyecto garantizando el cumplimiento de las estrategias de la organización teniendo en cuenta los intereses particulares de cada uno de estos Stakeholders.

4.5.3 Variables Ambientales. Fueron las variables relacionadas con las diferentes características ambientales que se deben tener en cuenta para el desarrollo de un humedal artificial garantizando el menor impacto posible al medio ambiente durante el desarrollo del proyecto; de igual forma se evalúan las características y requerimientos biológicos de las plantas a utilizar durante el desarrollo de presente proyecto.

- Parámetros de humedales artificiales: con el fin de garantizar un óptimo desarrollo de un humedal artificial es importante evaluar los diferentes parámetros establecidos para su construcción teniendo en cuenta los requerimientos del presente proyecto en el cual se requieren algunos sistemas adicionales de tratamiento del agua de producción.
- Caracterización de Plántulas: cada planta presenta características biológicas diferentes y por consiguiente requieren condiciones del suelo y del clima diferente que limitan las zonas donde pueden ser cultivadas; por tal motivo es importante identificar las características de las plántulas a utilizar en el humedal artificial garantizando el buen desarrollo del cultivo.

A continuación, se presenta el diagrama de la triple cuenta de resultados en el cual se logra identificar la relación directa que se presenta entre las variables técnico financieras, sociales y ambientales descritas anteriormente que son fundamentales durante la estrategia del uso sostenible del agua de producción para actividades de riego del suelo en un campo colombiano.

Gráfica 7. Diagrama de la triple cuenta



Fuente: Elaboración propia basado en las dimensiones del Desarrollo Sostenible.

El diagrama anteriormente presentado muestra como conclusión las variables mínimas que son consideradas para la viabilidad de implementar la estrategia de Omán en Colombia para el uso de agua de producción para riego. Este tipo de proyectos requiere el análisis en conjunto de los diferentes parámetros que se presentan bajo el mismo fenómeno, como, por ejemplo, la normatividad, calidad del agua, comunidades afectadas, entre otras.

Como recomendaciones generales de este estudio de caso, es permitir una evaluación económica real de la implementación de este proyecto en campo, es decir con los proveedores propios de las empresas de trabajo en la zona.

Por otro lado, el presente proyecto tiene como recomendación emplear la caña de la plántula estudiada como material de biomasa para la producción de bioaceite, bioetanol, biogás y otros derivados, que puede llevar a un estudio complementario de esta iniciativa.

REFERENCIAS

- AccountAbility. (2015). *AA1000 Stakeholder Engagement Standard*. US: AccountAbility. Retrieved April 29, 2019
- Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH-. (2006, Mayo 15). *Cifras y Estadísticas*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Sec. Publicaciones. Retrieved Diciembre 10, 2018, from <http://www.anh.gov.co/ANH-en-Datos/Paginas/default.aspx>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH-. (2007). Cuencas. Colombia: Bogotá.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH-. (2012). *Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos*. Integración geológica, Agencia Nacional de Hidrocarburos, Colombia: Bogotá. Retrieved Marzo 25, 2019
- Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH-. (2016). *Informe Producción de Crudo en Colombia*. Colombia: Bogotá. Retrieved Marzo 20, 2019
- Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH-. (2017). *Normatividad*. Colombia: Bogotá. Retrieved Marzo 25, 2019
- Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH-. (2018). *Estadísticas de producción*. Colombia: Bogotá. Retrieved Marzo 16, 2019
- Amabilis-Sosa, L., Siebe, C., Moeller-Chávez, G., & Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. (2016, Febrero). *Remoción de mercurio por phragmites australis empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados*. [Sitio web]. Mexico. Retrieved April 16, 2019, from Revista Internacional De Contaminación Ambiental, 32(1), 47-53.: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992016000100047&lng=en&tlng=en
- Arnold, R., D. B., J. E., & T. F. (2004). *Manejo de la producción de agua: De residuo a recurso*. [Sitio web]. Sec. Publicaciones. Retrieved Marzo 28, 2019, from Schlumberger.
- Asamblea Nacional Constituyente. (1991). *CONSTITUCION POLITICA DE COLOMBIA 1991*. Bogotá: Republica de Colombia. Retrieved Febrero 16, 2019
- Bailey, B., Crabtree, M., Tyrie, J., Elphick, J., Kuchuk, F., Romano, C., & Roodhart, L. (2000). Water Control. *Oilfield Rev*, 12, 30-51.
- Banco de la República. (2009). *Boletín Económico Regional*. Colombia: BanRep. Retrieved Marzo 26, 2019

- Barrenechea Martel, A. (2004). Aspectos Físicoquímicos de la Calidad del Agua. In A. Barrenechea Martel, *Tratamiento de Agua Para Consumo Humano* (pp. 1-47). Lima, Perú: Organización Panameña de la Salud. Retrieved Abril 19, 2019
- Breuer, R., Al-Asmi, S., SPE, Bauer Nimr, L., & Petroleum Development Oman, L. (2010, Abril). *Proyecto de tratamiento de agua de Nimr: aumento de escala Un sendero de cañaveral a industrial. Trabajo presentado en el doi: 10.2118 [Sitio web]. Rio de Janeiro.BR. Sec. Papers.* Retrieved Marzo 28, 2019, from <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-126265-MS>
- Bustos, J. A. (2017). *Caída de los precios del Petróleo y su impacto en el Desarrollo Regional*. Bogotá D.C.
- Calduch, R. (2014). *MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN INTERNACIONAL*. [Sitio web]. Madrid.ES. Retrieved Febrero 28, 2019, from Universidad Computense de Madrid, 1–180: [https://www.ucm.es/data/cont/docs/835-2018-03-01-Metodos y Tecnicas de Investigacion Internacional v2.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/835-2018-03-01-Metodos_y_Tecnicas_de_Investigacion_Internacional_v2.pdf)
- Collins. (s.f). *Definición de disposal*. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://www.collinsdictionary.com/es/diccionario/ingles/disposal>
- Congreso de Colombia. (1959, Diciembre 16). *LEY 2 DE 1959*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Retrieved Octubre 12, 2018, from http://www.ideam.gov.co/documents/24024/26915/C_Users_hbarahona_Desktop_Monica+R_normas+pag+web_ley+2+de+1959.pdf/11ec7647-b090-4ce2-b863-00b27766edf8
- Congreso de Colombia. (1973, Diciembre 19). *LEY 23 DE 1973*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Retrieved Octubre 12, 2018, from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9018>
- Congreso de Colombia. (1989, Enero 11). *LEY 9 DE 1989*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Retrieved Octubre 12, 2018, from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1175>
- Congreso de Colombia. (2011, Junio 28). *Ley 1454 de 2011*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Retrieved Octubre 12, 2018, from <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/ley145428062011.pdf>
- Congreso de Colombia. (2012, Abril 24). *Ley 1523 de 2012*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Retrieved Octubre 12, 2018, from http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1523_2012.html

Congreso de Colombia. (2013, Abril 29). *Ley 1625 de 2013*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Retrieved Octubre 12, 2018, from http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1625_2013.html

Congreso de Colombia. (2015, Junio 09). *Ley 1753 de 2015*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Retrieved Octubre 12, 2018, from http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1753_2015.html

Contraloría General de la República. (2017). *Autosuficiencia petrolera en Colombia*. Boletín Macrosectorial, Cundinamarca, Bogotá.

Cortés, L. (2018). *EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA PARA EL CAMBIO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL ACTUAL POR BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS CON MOTOR EN FONDO DE IMANES PERMANENTES EN TRES POZOS DE UN CAMPO PETROLERO*. Universidad de América, Bogotá.

Departamento Administrativo de la Función Pública. (2012, Diciembre 10). *Ley 2551 de 2012*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Retrieved Octubre 12, 2018, from https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=74862

Díaz, J. (2015). *Efecto de la explotación petrolera sobre el empleo en la comunidad de Vista Hermosa*. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Dirección General de Industria Energía y Minas. (2002). *Portal de transparencia Comunidad de Madrid* [Sitio web]. Madrid.ES. Sec. Información Institucional. Retrieved Marzo 9, 2019, from <https://www.comunidad.madrid/transparencia/consejeria/d-g-industria-energia-y-minas>

DNP. (2018). *Bases del plan Nacional de Desarrollo 2018 - 2022. Pacto por Colombia pacto por la equidad*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación. Retrieved Febrero 15, 2019

ECOPETROL. (2002). *Estudio Geológico Regional: Cuenca de los Llanos Orientales*. 1, 7-43.

Ecopetrol. (2016). *Reorte integrado de gestión sostenible 2015*. Bogotá.

Ecopetrol, S.A. (2017, Marzo). *Reporte Integrado de gestión sostenible 2016* [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Sec. Publicaciones. Retrieved Febrero 26, 2019, from <https://www.ecopetrol.com.co/documentos/reportes-integrados-gestion-sostenible-2016.pdf>

ECURED. (s.f). *Análisis multicriterio*. [Sitio web]. Sec. Diccionario. Retrieved Febrero 10, 2019, from https://www.ecured.cu/An%C3%A1lisis_multicriterio

- ECURED. (s.f). *Plántula (botánica)*. [Sitio web]. Sec. *Diccionario*. Retrieved Febrero 10, 2019, from [https://www.ecured.cu/Pl%C3%A1ntula_\(bot%C3%A1nica\)](https://www.ecured.cu/Pl%C3%A1ntula_(bot%C3%A1nica))
- Educalingo. (s.f). *Diccionario: Vertimiento*. [Sitio web]. Sec. *Diccionario*. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://educalingo.com/es/dic-es/vertimiento>
- ENA. (2018). *Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua*.
- Expansion. (2015, Abril 29). *Inversión privada, ¿salvación de campos petroleros maduros?* [Sitio web]. Mexico. Sec. *Publicaciones*. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://expansion.mx/economia/2015/04/28/inversion-privada-la-salvacion-para-campos-maduros>
- Fedesarrollo, & Ecopetrol. (2018). estudio sobre el impacto de la actividad petrolera en las regiones productoras de Colombia. *Cuadernos Fedesarrollo*. Retrieved Abril 15, 2019
- Flores, U. (2010, Mayo). *Definición ABC: Definición de Oasis*. [Sitio web]. Sec. *Geografía*. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://www.definicionabc.com/geografia/oasis.php>
- FLUENCE. (2018). *Uso y Reúso de agua en producción*. Fluence Corporation Limited.
- Franco, C. (2017). Nano-intermedios para remoción de hidrocarburos de aguas de producción para su re- inyección en los campos petroleros y/o disposición final.
- Global Reporting Initiative. (2006). *Guía para la elaboración de Memorias de Sostenibilidad*. Holanda: Global Reporting Initiative. Retrieved Abril 29, 2019
- Global water awards. (2011). *Global water awards 2011 Winners*. [Sitio web]. Sec. *Publicaciones*. Retrieved Marzo 30, 2019, from <https://globalwaterawards.com/2011-winners/>
- González , D., & González , C. (2004). Jugo de caña y follajes arbóreos en la alimentación no convencional del cerdo. *Revista Computarizada de Producción Pecuaria*, 1-14. Retrieved Abril 29, 2019
- GONZALEZ BOTTIA, H. (2005). *EVOLUCION DEL SECTOR AGRÍCOLA EN EL DEPARTAMENTO DEL META Y LOS LLANOS ORIENTALES 1991-2003* . Bogotá: Banco de la Republica .
- Gonzalez, M. (2011, Julio 05). *La Guía Química. Lignina – La química de la madera*. [Sitio web]. Sec. *Química*. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://quimica.laguia2000.com/elementos-quimicos/lignina-la-quimica-de-la-madera>

Granada Revilla, G., & Trujillo Fernández, R. (2011). La gestión de los grupos de interés (Stakeholders) en la estrategia de las organizaciones. *Forética*, 71-76. Retrieved April 29, 2019

Graterol, V. (2009). *Levantamiento aerogravimétrico y aeromagnético: Los sectores norte y oriente de la cuenca de los llanos orientales*. Colombia: ANH. Retrieved March 26, 2019

Haiming Wu, Jian Zhang, Huu Hao Ngo, & Wenshan Guo. (2014). *A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation*. ELSEVIER. Retrieved April 02, 2019

Hernández, C. (2017). Abastecimiento de petróleo en Colombia. Una revisión del estado actual. *Cina Research*, 1(1), 48-56.

Hernández, J. (2014). *Análisis de la capacidad predictiva de un modelo dinámico de calidad del agua aplicando técnicas de computación evolutiva, optimización multiobjetivo y procesamiento recursivo de datos*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Hickman. (2012, Junio 15). «James Lovelock on shale gas and the problem with 'greens' » [Sitio web]. . Sec. Blog. Retrieved February 15, 2019, from <http://www.theguardian.com/environment/blog/2012/jun/15/james-lovelock-fracking-greens-climate>.

Hogarth, R. (1994). *Judgement and Choice (segunda edición)*. New York: John Wiley & Sons. Retrieved February 28, 2019

Hurtado, S. (. (2012). *Criterio de expertos. Su procesamiento a través del método delphy*. [Sitio web]. Barcelona.AR. Sec. Artículos. Retrieved February 28, 2019, from http://www.ub.edu/histodidactica/index.php?option=com_content&view=article&id=21:criterio-de-expertos-su-procesamiento-a-traves-del-metodo-delphy&catid=11:me

Ibañez, J., Lantarón, A., & Bolado, R. (1999). *CSN El Juicio de Expertos*. [Sitio web]. Madrid.ES. Retrieved March 5, 2019, from Consejo de Seguridad Nuclear: <https://www.csn.es/documents/10182/1012054/ODE-04-08+El+juicio+de+expertos>

IDEAM. (2010). *Informe del estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022166/PARTE5.pdf>

IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua*.

INGRAIN. (2012). *Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos*. INGRAIN. Digital Rock Physics Lab.

Kraul, C. (2013). El Desafío de tratar el Agua.

La Comunidad Petrolera. (2009, Mayo 31). *Conificación*. [Sitio web]. Sec. Diccionario. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://www.lacomunidadpetrolera.com/2009/05/conificacion-y-digitalizacion.html>

La Comunidad Petrolera. (2008, Noviembre 10). *Reservas de petróleo*[Sitio web]. Sec. Publicaciones. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://www.lacomunidadpetrolera.com/2008/11/reservas-de-hidrocarburos.html>

La Paix, L., Eugenia López-Lambas, M., & Eugenia , L. (2010). *Desarrollo de una metodología multicriterio para la evaluación de la investigación del transporte* [Sitio web]. Madrid.ES. Retrieved Marzo 7, 2019, from http://oa.upm.es/7417/1/INVE_MEM_2010_75908.pdf

León, O. (1994). *Análisis de Decisiones*. Madrid: Madrid: McGraw–Hill. Retrieved Febrero 28, 2019

Llano, N. (2014). Exploración y explotación petrolera en el Piedemonte Llanero, Colombia. *Enviromental Justice*.

López, A. (2008). *GEOPOLÍTICA DEL PETRÓLEO Y CRISIS MUNDIAL*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Retrieved Marzo 9, 2019

López, O. (2010, Abril 07). *La Guía Química: Celdas Electroquímicas*. [Sitio web]. Sec. Química. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://quimica.laguia2000.com/general/celdas-electroquimicas>

Lozano, E. (2014). *COMPILACIÓN DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES*. Servicio Geológico Colombiano, Cundinamarca.

Machi Céspedes, E., & Latorre Barragan, C. (2014). Los pilares del desarrollo sostenible sofisma o realidad. *Universidad Santo Tomas*, 10-73. Retrieved Abril 18, 2019

Mancilla Villa , Ó. R., Ortega Escobar, H. M., Ramírez Ayala, C., Uscanga Mortera, E., Ramos Bello , R., & Reyes Ortigoza , A. L. (2011). METALES PESADOS TOTALES Y ARSÉNICO EN EL AGUA PARA RIEGO DE PUEBLA Y PERACRUZ, MEXICO. 39-48. Retrieved Abril 28, 2019

Mancilla, R., & Mesa, H. (2012). *Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero*. Bucaramanga, Colombia: Tesis de pregrado. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Universidad Industrial de Santander. Retrieved Febrero 25, 2019

Marco Fiscal de Mediano Plazo. MFMP. (2016). *Marco Fiscal de Mediano Plazo 2017-2027*. Bogotá: Secretaria Distrital de Hacienda. Retrieved Marzo 10, 2019

Martínez , A. (2012). *El boom del petróleo en Colombia, instituciones y fundamentos del mercado. Seminario 'La Explotación de Recursos Naturales en América Latina y sus Impactos Sobre el Desarrollo: Cadenas de Valor, Inversión Extranjera y Movilización de Recursos'*. Bogotá: Redmercosur. Retrieved Marzo 20, 2019

Mendoza, E. (2018). *AFECCIONES POTENCIALES POR LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN DE LA INDUSTRIA DE HIDROCARBUROS SOBRE LA ICTIOFAUNA. CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, REGIÓN DE LA ORINOQUÍA, COLOMBIA.*

MINAMBIENTE. (2016). *Políticas para la gestión sostenible del suelo* . Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente .

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015, Mayo 26). *Decreto 1076 de 2015. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO.* Retrieved Octubre 12, 2018, from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE -MADS-. (s.f.). *Plan de Acción Institucional. [sitio web]. Bogotá D.C.CO. Sec. Noticia.* Retrieved Junio 15, 2019, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/temas-planeacion-y-seguimiento/46-tema-final>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2012, Agosto 02). *Decreto 1640 de 2012. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO.* Retrieved Octubre 12, 2018, from https://www.redjurista.com/Documents/decreto_1640_de_2012_ministerio_de_ambiente_y_desarrollo_sostenible.aspx#/

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2004, Enero 22). *Decreto 155 de 2004. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO.* Retrieved Octubre 12, 2018, from <http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/decreto+155+de+2004.pdf/e7df4e3f-0ac6-4f0e-97bf-0cbf9ffe6b07>

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010, Octubre 25). *Decreto 3930 de 2010 [Sitio web]. Bogotá D.C.CO.* Retrieved Octubre 12, 2018, from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_3930_2010.pdf

Ministerio de medio Ambiente. (1993, Diciembre 22). *LEY 99 DE 1993. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO.* Retrieved Octubre 12, 2018, from <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/pdf/Normativo/1993-12-22-ley-99-crea-el-sina-y-mma.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente. (2001, Agosto 15). *LEy 685 de 2001.[Sitio web]. Bogotá D.C.CO.* Retrieved Octubre 12, 2018, from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/2001/ley_0685_2001.pdf

- Ministerio de Salud de Peru. (2008). *Estándares de Calidad Ambiental de Agua. Grupo 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales*. Peru. Retrieved Abril 26, 2019
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002, Agosto 07). *Decreto 1728 de 2002*. Retrieved Octubre 12, 2018, from https://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto1728_20020806.htm
- Mitjà, A. (2002). *El petróleo Recorrido de la energía*. (E. D. S.A, Ed.) Madrid, España: Innova Ediciones.
- Neira Gutierrez, M. (2006). *Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile*. Santiago de Chile: Univerisdad de Chile. Retrieved Abril 25, 2019
- Oficina de información Diplomática - Gob España. (2018). *sultanato de omán*. Omán,: München: Nusser. Retrieved Marzo 29, 2019
- Orellana, J. (2005). Características del Agua Potable. In J. Orellana, *Ingeniería Sanitaria* (pp. 1-7). Argentina: Universidad Tecnológica Nacional. Retrieved Abril 20, 2019
- OSMAN. (1994). *diccionario de salud y medio ambiente*. [Sitio web]. *Andalucía.ES. Sec. Diccionario*. Retrieved Febrero 10, 2019, from <http://www.osman.es/diccionario/definicion.php?id=11981>
- Patiño Gómez, J. (2012). Costos de inversion inicial, operacion y mantenimiento de tratamientos naturales de agua residuales para pequeñas comunidades en Colombia. *Pontificia Universidad Javeriana*, 33-90. Retrieved Abril 28, 2019
- Peñaloza, V. (2017). El país está adportas de perder su autosuficiencia petrolera. *El Espectador*. Retrieved from <http://www.elinformador.com.co/index.php/el-magdalena/83-departamento/158819-el-pais-esta-a-cortas-de-perder-su-autosuficiencia-petrolera>
- Pérez , J., & Gardey, A. (2018). *Definicion.de: Definición de humedales*. [Sitio web]. *Sec. Diccionario*. Retrieved Febrero 10, 2109, from <https://definicion.de/humedales/>
- Pérez, J., & Merino, M. (2016). *Definicion.de: Definición de riego*. [Sitio web]. *Sec. Diccionario*. Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://definicion.de/riego/>
- Petroleum Development Omán. (2017). *Petroleum Development Omán*. [Sitio web]. *Oman*. Retrieved Marzo 30, 2019, from <https://www.pdo.co.om/en/Pages/Home.aspx>
- Ramírez, M. (2008). Cultivos para la produccion sostenible de biocombustibles: Una alternativa para la generacion de empleos e ingresos. Modulo V: Caña de azúcar.

- Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo SNV*, Tegucigalpa, Honduras. Retrieved Abril 29, 2019
- Repsol YPF. (2002). *El petróleo: El recorrido de la energía*. Madrid: Madridinnova. Retrieved Marzo 19, 2019
- Revista Dinero. (2011, Noviembre 11). *Las diez petroleras con mayor producción en Colombia*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Sec. Hidrocarburos. Retrieved Marzo 20, 2019, from <https://www.dinero.com/negocios/articulo/las-diez-petroleras-mayor-produccion-colombia/140828>
- Rifkin, J. (2012). *La tercera Revolución Industrial*. España: Paidós: Scielo. Retrieved Marzo 16, 2019
- Rodríguez, M. (2013, Marzo 17). Tierra a la Vista. La Orinoquia: medio ambiente. *Revista de Ingeniería*. Retrieved Marzo 18, 2019
- Rubio, G. P. (2016). El petróleo en la economía colombiana. *Repositorio Institucional Fededesarrollo*.
- Salinas, J. (2017). *Caída de los precios del Petróleo y su impacto en el Desarrollo Regional de las Zonas*. Universidad Externado De Colombia .
- Sumio Water Systems. (s.f). *Sumio Water Systems*. [Sitio web]. USA. Sec. Publicaciones. Retrieved Febrero 10, 2019, from <http://www.sumiowater.com/tratamiento-de-aguas-residuales-en-refinerias-de-petroleo/separador-api/>
- Superintendencia de Sociedades . (2017). *Desempeño del sector de Hidrocarburos*. Bogotá.
- Textoscientificos.com. (2007, Marzo 01). *OSMOSIS INVERSA*. [Sitio web]. Sec. Química. Retrieved Febrero 2010, 2019, from <https://www.textoscientificos.com/quimica/osmosis/inversa>
- The World Factbook. (2018). *Principales productores de petróleo en el mundo*.
- Trading Petroleum. (2018, Mayo 7). *Nimr: El oasis que la industria del petróleo desarrollo en omán*. [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Sec. News. Retrieved Marzo 29, 2019, from <http://tradingpetroleum.com.co/nimr-el-oasis-que-la-industria-del-petroleo-desarrollo-en-oman/>
- Vallejo, J. C. (2014). *Intemperismo y meteorización*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Wikilengua. (s.f). *Wikilengua del español [Sitio web]. Bogotá D.C.CO. Sec. Definiciones.* Retrieved Febrero 10, 2019, from <http://www.wikilengua.org/index.php/Terminesp:biotratamiento>

WordReference. (s.f). *WordReference: Yacimientos. [Sitio web]. Sec. Diccionario.* Retrieved Febrero 10, 2019, from <https://www.wordreference.com/definicion/yacimiento>

ANEXOS

ANEXO A
INSTRUMENTO APLICADO A EXPERTOS
MATRIZ DE EXPERTOS
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD
UNIVERSIDAD DE AMERICA
1-2019

Título del Proyecto: “Estrategia para el uso sostenible de agua de producción para el riego de suelos, adaptada de la experiencia del desierto de Omán a un Patrón de Pozos en un Campo Colombiano”

Nombre del Estudiante: Angie Tatiana Ortega Ramírez

Dirección: María del Rosario Gómez

Usted ha sido seleccionado como un perfil de experto en temas relacionados con manejo del recurso hídrico para el presente proyecto, por ende queremos que tenga en cuenta la siguiente información para responder 3 preguntas que se encuentran al final de este documento.

Descripción de la Herramienta: Por medio de las preguntas que se establecen en esta herramienta, se busca realizar una discusión de expertos sobre el tema de réplica en un campo colombiano de una estrategia sostenible de manejo del recurso hídrico implementada en el desierto de Omán para aguas de producción de la industria petrolera.

Antecedentes:

En el desierto de Omán la compañía Petroleum Development Omán (PDO), junto con la empresa alemana Bauer completó en el 2011 la planta tratadora de agua de Nimr. Este proyecto tenía como objetivo la construcción del humedal más grande del mundo para el tratamiento de aguas industriales, el cual se ha denominado como el oasis de la industria del petróleo (Trading Petroleum, 2018).

La planta de tratamiento fue diseñada para actuar como una facilidad de producción con una capacidad para tratar 45000 m³/día de agua producida proveniente de los pozos cercanos (Roman Breuer et al., 2010). Hoy en día e este sitio trata más de 700.000 barriles de agua de producción por día, la cual proviene de los pozos petroleros del sur del desierto de Omán (Petroleum Development Omán, 2017).

En el año 2000 PDO comienza la construcción de un humedal piloto, donde se tenía como objetivo volver “verde” el desierto. Es así como se evalúa la degradación de los hidrocarburos, la eliminación de metales pesados, la adsorción del suelo y el

potencial que presentaba el agua tratada para ser utilizada en la agricultura (2010, Roman Breuer; et al). La construcción del humedal tiene dos funciones principales, la primera es la eliminación de los hidrocarburos residuales y la segunda la disminución de la cantidad de agua debido a la alta tasa de evaporación y transpiración de las plantas (2012, Breuer R; et al). En el caso particular de Nirm Omán, la *Phragmites australis* o caña común, fue la especie seleccionada, plantándose aproximadamente 240 hectáreas con esta caña (2012, Breuer R; et al).

Ejecución de Matriz de Expertos

De acuerdo a la estrategia implementada del desierto en Nirm Omán se evalúan variables como: La calidad de agua producida de yacimiento (Hidrocarburos Residuales, Salinidad, metales pesados), plántulas de tratamiento en el humedal artificial, área sembrada, adsorción del suelo, condiciones climáticas, sistemas adicionales de tratamiento de agua y uso final del agua. De acuerdo a su experiencia, organice el orden de prioridad de para las variables relacionadas a continuación, de cinco (5) a uno (1), donde cinco (5) refiere a la variable más importante, cuatro (4) importante, tres (3) medianamente importante, dos (2) importancia baja y uno (1) sin importancia

- ___ Calidad del Agua
- ___ Plántulas de tratamiento en Humedal Artificial
- ___ Condiciones Climáticas
- ___ Sistemas Adicionales de tratamiento de agua
- ___ Uso final del Agua.

De acuerdo a las variables críticas definidas en la estrategia de Omán, evalué los siguientes ítems, según considere la importancia de las interacciones, a partir de los siguientes criterios: uno (1) cuando la interacción se considere nula; 2, cuando se considere débil la interacción y 3 cuando la interacción sea alta.

- ___ Calidad del Agua – Plántulas
- ___ Calidad del Agua – Condiciones Climáticas
- ___ Calidad del Agua - Sistemas Adicionales de tratamiento de agua
- ___ Calidad del Agua – Uso final del agua
- ___ Plántulas – Condiciones climáticas
- ___ Plántulas - Sistemas adicionales de tratamiento de Agua
- ___ Plántulas – Uso Final del agua.
- ___ Condiciones Climáticas – Sistemas adicionales de tratamiento de Agua
- ___ Condiciones Climáticas – Uso final del agua
- ___ Sistemas adicionales de tratamiento Agua – Uso final del Agua

El espacio siguiente relacione alguna(s) variable(s) que considere relevante(s) para la implementación del humedal artificial en un campo petrolero en Colombia)
