

PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO DE MANEJO DE RESIDUOS DE  
AGUAS INDUSTRIALES EN PLANTA DE TRATAMIENTO EN UNA EMPRESA  
OPERADORA DE HIDROCARBUROS

JENIFER LORENA VARGAS PEÑA

Trabajo de Grado

Asesor temático, docente

JUAN DAVID HERNÁNDEZ LÓPEZ

Asesora metodológica, docente

GINA MARÍA GIRALDO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN  
MAESTRÍA EN GERENCIA INTEGRAL POR PROCESOS  
MEDELLÍN  
2022

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	9
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
3	JUSTIFICACIÓN.....	15
4	OBJETIVOS.....	17
4.1	General.....	17
4.2	Específicos .....	17
5	MARCO CONCEPTUAL.....	18
6	DISEÑO METODOLÓGICO .....	20
7	DESARROLLO DEL TRABAJO.....	23
7.1	Describir el proceso de agua residual industrial en el campo estudio .....	23
7.2	Implementación de equipo de decantación centrífuga para separación de lodos 31	
7.3	Teoría de la centrifugación .....	31
7.4	Tipos de centrifugas para separación de lodos .....	33
7.5	Componentes decantador centrífugo y principios de operación .....	37
7.6	Ventajas del proceso de decantación centrífuga .....	40
7.7	Desventajas del proceso de decantación centrífuga .....	41
7.8	Análisis económico del proceso sin implementación y con implementación 42	
7.9	Estimación de crecimiento de agua de producción y lodos .....	42
7.10	Estimación de costos asociados a transporte y tratamiento de lodos.....	45
7.11	Estimación de costos asociados a tratamiento y transporte de lodos con la inclusión del sistema de decantador centrífugo para deshidratación de lodos...	47

7.11.1	Análisis de costos de proyecto de decantación centrífuga CAPEX/OPEX.....	47
8	RESULTADOS .....	56
9	CONCLUSIONES.....	59
10	REFERENCIAS.....	62
11	ANEXOS.....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de proceso actual planta de tratamiento de agua 100KBWPD. .....	28
Figura 2. Separación por diferencia de densidad.....	32
Figura 3. Comparación de velocidad de sedimentación de separación por gravedad vs separación centrífuga .....	33
Figura 4. Partes de decantador centrífugo.....	38
Figura 5. Curva estimada de comportamiento de agua de producción del campo Tigana de los años 2023-2033.....	44
Figura 6. Curva estimada de costos asociados al transporte y tratamiento de lodos del campo Tigana de los años 2022-2033. ....	47
Figura 7. Curva de comparación de costos (ahorro real) escenario con y sin proyecto de decantación centrífuga. ....	55
Figura 8. Relación de costos promedio anuales esperada para el transporte y tratamiento de lodos con y sin proyecto de decantación. ....	57

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Consolidado de costos asociados al transporte y tratamiento de aguas aceitosas del campo en estudio para el año 2020 (Tomado de “Reportes anuales consolidados de cantidades de aguas residuales transportadas y tratadas en planta externa para disposición”).	15
Tabla 2. Relación de los participantes en la revisión y análisis de cada uno de los objetivos propuestos.	20
Tabla 3. Relación de documentación de referencia y términos de búsqueda para la revisión y análisis de cada uno de los objetivos del presente proyecto.	22
Tabla 4. Procedimiento paso a paso de contratista actual de manejo de aguas aceitosas.	29
Tabla 5. Relación de costos de transporte y tratamiento de lodos 2019-2021.	42
Tabla 6. Estimación de comportamiento de agua de producción del campo en millones de barriles.	43
Tabla 7. Cantidades de lodos tratados en los años 2019-2021 con relación al total de agua de producción del campo.	45
Tabla 8. Estimación de lodos a tratar para los años 2022-2033.	45
Tabla 9. Tarifas de transporte y tratamiento de lodos mediante compañía externa.	46
Tabla 10. Estimación de costos asociados a transporte y tratamiento de lodos para los años 2022-2039.	46
Tabla 11. Costos de inversión en equipos requeridos para el proyecto de decantación centrífuga.	48
Tabla 12. Costos de inversión en ingeniería de detalle requerida para el proyecto de decantación centrífuga.	48

Tabla 13. Costos de inversión en obras requeridas para el proyecto de decantación centrífuga.....	50
Tabla 14. Costos anuales de operación asociados al mantenimiento del equipo de decantación centrífuga (incluye mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, repuestos y consumibles). .....	51
Tabla 15. Costos anuales de operación asociados a la operación del equipo de decantación centrífuga (incluye dos operadores para garantizar el correcto funcionamiento de este equipo). .....	51
Tabla 16. Costos anuales de operación asociados al consumo de energía eléctrica del equipo de decantación centrífuga. ....	51
Tabla 17. Costos anuales de operación asociados al consumo de polímero para el proceso de decantación centrífuga. ....	51
Tabla 18. Costos totales anuales de operación del proyecto de decantación centrífuga. ....	52
Tabla 19. Costos proyectados de transporte y tratamiento de lodos con y sin proyecto de decantación centrífuga. ....	52
Tabla 20. Curva estimada de costos asociados al transporte y tratamiento de lodos del campo Tigana de los años 2022-2039 en escenarios con y sin proyecto de decantación centrífuga.....	53
Tabla 21. Comparación ahorro real de costos asociados a la implementación del proyecto de decantación centrífuga. ....	54

## RESUMEN

En el presente trabajo de grado se propuso una mejora de proceso interno operativo de la facilidad de transferencia y tratamiento de residuos de las aguas industriales mediante la comparación de los costos asociados al proceso actual con el costo asociado a la implementación de un equipo que mejora el proceso, reduce costos operativos y agrega valor. Se trabajó con la base de datos históricos y actuales del proceso, documentos técnicos de la empresa, información de empresas contratistas, programas/software internos de la compañía en los que se presenta la información de producción, pronósticos y tarifas económicas. Además, se interactuó con ingenieros, operadores y asistentes con experiencia en la operación y de otras áreas de la empresa por medio de entrevistas. Con los resultados de los datos obtenidos y analizados se comprendió el impacto a largo plazo de este proceso en los costos operativos y la oportunidad de optimizar el proceso identificando impactos positivos a los objetivos estratégicos de la compañía. Finalmente, se concluyó que es oportuno implementar una nueva tecnología para optimizar y mejorar los procesos que aportan al desarrollo de los objetivos de la empresa y, así mismo, generar mayores sinergias entre las personas de diferentes áreas a través del trabajo colaborativo entre las diferentes disciplinas.

Palabras clave: plantas de tratamiento de agua industrial, aguas, aguas aceitosas, decantación, lodos, procesos, centrifugación, optimización de costos.

## **ABSTRACT**

This thesis proposes an improvement of the internal operational process of the industrial water waste transfer and treatment facility by comparing costs associated with the existing process with the costs associated with an equipment implementation for improving such process to reduce operating costs and add value. For this purpose, historical and current data base of the process, technical documents of the company, information from contractors and internal programs/software of the company including production information, forecasting and economic rates were taken into consideration. Interviews with engineers, operators and assistants with operational experience and from other areas of the company were conducted for gathering the pertinent data. Based on results obtained from data analysis, it was possible to identify the long-term impact of this process on operating costs as well as the opportunity to optimize the process by identifying positive impacts on the strategic objectives of the company and thus, generate greater synergies between the personnel of several areas and disciplines through collaborative work.

Key words: industrial water treatment plants, water, oily water, decantation, sludge, centrifugation, cost optimization.



## 1 INTRODUCCIÓN

La actual demanda que tiene el sector de hidrocarburos a nivel nacional y mundial requiere aumentar la producción de petróleo. Por su parte, el volumen de agua incrementa en mayor proporción de lo que aumenta el volumen de petróleo. El proceso de operación y desarrollo de la compañía busca garantizar una operación segura, confiable y sostenible para elevar la producción y lograr la optimización de los costos asociados a este plan, diseñando una forma eficiente de desarrollo de los yacimientos.

El desarrollo de la presente investigación permitió evaluar las opciones de optimización y mejora de uno de los procesos finales del sistema de tratamiento y disposición de aguas residuales industriales, identificadas como aguas aceitosas o lodos del proceso de producción del campo en estudio de una compañía petrolera en Colombia. Por esta razón surgió la necesidad de encontrar una solución eficiente en términos técnicos y económicos con el fin de reducir los sobrecostos que al día de hoy se presentan en la organización debido al requerimiento de contratación de una empresa externa para el transporte, tratamiento y disposición final de fluido, que posee un alto contenido de agua con una gran posibilidad de ser recuperada para reincorporarse al sistema de las plantas de tratamiento de agua de producción y su posterior inyección o disposición a los pozos aprobados dentro de la licencia ambiental del campo.

Así mismo, se planteó el uso de la bitácora de campo y el desarrollo de entrevistas a especialistas del sector de hidrocarburos que cuentan con experiencia en este tipo de soluciones tecnológicas. Adicionalmente, se recolectó e indagó información referente a manuales de operación, filosofías de operación, dossiers de construcción de equipos y de plataformas tecnológicas utilizadas para la administración de costos de producción, además de la recopilación de proyecciones de yacimientos y la consolidación de la información de producción de petróleo y agua de las facilidades de la compañía.

Con el análisis y desarrollo de la investigación se buscó alcanzar una optimización de los costos asociados al manejo de lodos remanentes del proceso de tratamiento de agua de producción del campo, que, a su vez, generen impactos positivos en términos ambientales y sociales con las comunidades que hacen parte de las zonas aledañas a la operación de la compañía

## 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria del petróleo lleva casi cien años de presencia en Colombia, según la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP) (2016) en este siglo el sector ha aportado importantes recursos para el desarrollo económico del país. De este modo, como lo mencionó el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas) (2018) “El sector de hidrocarburos corresponde al conjunto de actividades económicas relacionadas con la exploración, producción, transporte, refinación o procesamiento de los recursos naturales no renovables conocidos como hidrocarburos (material orgánico compuesto principalmente por hidrógeno y carbono)” (p. 2).

La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) (2019) por ser la administradora está comprometida con los recursos hidrocarburíferos del país para promover el aprovechamiento óptimo, sostenible, integrando y armonizando los intereses de la sociedad. Según Ecopetrol S.A. (2014) dentro de las diferentes actividades que realizan las empresas operadoras se encuentra la producción y extracción del petróleo que se realiza con tecnologías específicas para cada yacimiento. Además, “por cada barril de petróleo que se producen en los campos de Ecopetrol también se extraen 12 barriles de agua en promedio” (p. 38).

En la industria del petróleo se requiere realizar tratamiento de separación de los fluidos producidos (crudo-agua), posteriormente la corriente de agua continua en el sistema para lograr condiciones de calidad, como la ausencia de oxígeno, el mínimo aporte de sólidos suspendidos, grasas y aceite. De esta manera, las aguas de producción son tratadas para ser empleadas como disposición y reinyección con el fin de incrementar el factor de recobro o aspersion según lo permitido por la licencia ambiental que emitió la Agencia Nacional de Licencias Ambientales.

Las distintas actividades que se realizan en la industria del petróleo traen como consecuencia la generación de diferentes tipos de lodos. En producción, los lodos

proviene de las diferentes plantas de tratamiento de agua, el volumen de agua a nivel nacional incrementa en mayor proporción de lo que aumenta el volumen de aceite. Además, el petróleo que se extrae sale mezclado con aguas de producción que hacen parte de los fluidos naturales del yacimiento.

Esta investigación se basó en información de una compañía en exploración, operación y consolidación de petróleo y gas. De esta manera, el campo en estudio inició producción en el año 2013, a la fecha se tiene una producción de 28 000 barriles de aceite y de 105 000 barriles de agua, así mismo, el campo cuenta con las facilidades de producción para la deshidratación de crudo y tratamiento de agua de producción para disponer en condiciones de calidad. Además, no se cuenta con una tecnología para separar los líquidos y sólidos en cuanto al volumen remanente, que se relaciona como aguas aceitosas del sistema de tratamiento de agua de producción, y se evacua por medio de carrotanques para su manejo, lo que ocasiona sobrecostos en la operación. Por esto, se requiere determinar un análisis para mejorar el proceso y reducir el envío de producto para plantas externas, adicionalmente, el volumen de producción de agua continúa incrementando.

Por otro lado, en la industria se emplean diferentes tecnologías convencionales para el manejo de los diferentes tipos de lodos, como lo son los lechos de secado, la decantación centrífuga, filtro prensa, entre otros. En este caso, “Los lechos de secado es el método normal en las plantas de tratamiento pequeñas y medianas de efluentes tanto industriales como domésticas, su viabilidad económica principalmente depende de las disponibilidades de terrenos, condiciones climáticas para máxima evaporación” (Ramalho, 2003, p. 571). Por su parte, Ramalho (2003) expresó que los lodos suelen disponer en los lechos de secado con profundidades de 20 cm a 30 cm, dejándose secar hasta un contenido en sólidos entre el 30 % y 50 %. Así, Arévalo y Castellano (2009) citado por Castellanos-Rozo et al. (2018) afirmaron que según los resultados de utilización de esta tecnología es posible obtener fertilizantes y restauración de suelos

erosionados o degradados por su propiedades fisicoquímicas y microbiológicas que podrían mejorar su calidad.

En este orden de ideas, DLC. S.A. mencionó que la decantación centrífuga son máquinas que constan de un rotor que gira a velocidades altas y pone en rotación un producto para acelerar por fuerza centrífuga la decantación o sedimentación de sus componentes o fases. Igualmente, como lo indicó Construcciones y Servicios Integrales Petroscol SAS (2014) emplea el principio de separación de mezclas de líquidos inmiscibles o líquidos con sólidos de diferentes densidades. La empresa GEA Group Aktiengesellschaft (2020) ofreció el decantador waterMaster, que es una centrifuga de funcionamiento continuo con recipiente horizontal de paredes sólidas, desarrollado para la deshidratación de lodos residuales industriales y urbanos. En la actualidad existen diferentes empresas que ofrecen la tecnología, como Alfa Laval, que presenta una gama de decantadores centrífugos y expresa que el decantador ALDEC está diseñado para procesar gran variedad de caudales bajo tres pilares básicos: rentabilidad, fiabilidad y fácil manejo.

En otras zonas del mundo se utilizan equipos como los decantadores centrífugos, por ejemplo, en un artículo presentado en la conferencia de recursos energéticos de la sección de Trinidad y Tobago de la Asociación Colombiana del Petróleo [ACP] (2016) mencionaron lo siguiente:

La exploración y producción de petróleo pesado da como resultado la formación de emulsiones de petróleo en agua, que se estabilizan aún más por la presencia de parafinas, asfáltenos, incrustaciones y otros sólidos finos. Estas emulsiones son difíciles de romper y, además del tratamiento químico y separación por gravedad, requieren algo más para romperse. En las facilidades de producción se emplean equipos como FWKO y tratadores, pero algunas emulsiones como se mencionan son tan fuertes que requieren fuerzas centrífugas (p. 1).

En el desarrollo del artículo mencionado se hizo referencia a la prueba para tratar el aceite de desecho almacenado que no se pudo separar con la finalidad de

obtener una calidad de crudo y describir las lecciones aprendidas y los pasos que se tomaron para optimizar su uso para conseguir la mejor tasa de recuperación de crudo vendible en el menor tiempo posible.

Otro caso de éxito de uso de decantadores centrífugos utiliza dos centrífugas diferentes para lograr una separación rápida y precisa. Los subproductos de las reacciones son sales inorgánicas, agua y dióxido de carbono. Este caso se presentó en la Exposición y Conferencia Internacional de Petróleo de Abu Dabi (2014) en la que se refirió lo descrito a continuación:

Esta tecnología ha sido implementada con éxito en el sitio del operador por el contratista bajo un proyecto piloto. Durante la vigencia del contrato, se trataron más de 100 000 bbl de lodos crudos que cumplieron con los siguientes KPI: Petróleo < 1,0 % BS&W, Agua < 20 ppm OIW y Sólidos < 1,0 % TPH.

El proceso se ha aplicado *in situ* donde se almacenan las emulsiones y se han recuperado más de 50 000 barriles de crudo vendible. El agua recuperada ha sido enviada para reinyección y los sólidos cumplen con todos los requisitos del Ministerio de Medio Ambiente y Asuntos Climáticos (MECA) - Omán como residuo tratado bajo estándares internacionales. En un momento en que los precios del petróleo crudo han superado los \$100,00 USD/bbl, esta técnica puede resultar no solo ambientalmente racional, sino también un valor agregado para la producción final del operador.

De acuerdo con la información obtenida de las entrevistas a ingenieros de la industria, en Colombia los lodos se tratan por medio de decantadores, piscinas de lechos de secado, como en campo Cantagallo, que reciben todos los lodos y crudos extraídos de la corriente de agua, los almacenan y suministran un tiempo de asentamiento para la separación de los sólidos, agua y aceites por diferencia de densidades, y una vez se homogenizan los lodos, son enviados a través de bombas hacia los lechos de secado donde se secan para biodegradación.

### 3 JUSTIFICACIÓN

Durante el desarrollo de proceso de tratamiento de agua se generó un volumen fuera de parámetros para utilizar en las diferentes actividades permitidas.

Este volumen se relaciona como aguas aceitosas, que son enviadas a diario a un tercero (compañía) especializado para el manejo y disposición adecuada. En el campo de estudio, para el año 2020 se enviaron más de 10 000 barriles mensuales a planta externa, a continuación, se relaciona el volumen por mes y la cantidad de vehículos que se emplearon:

Tabla 1. Consolidado de costos asociados al transporte y tratamiento de aguas aceitosas del campo en estudio para el año 2020 (Tomado de “Reportes anuales consolidados de cantidades de aguas residuales transportadas y tratadas en planta externa para disposición”).

Mes 2020	Barriles (bls)	Vehículos	Costo transporte COP\$	Costo tratamiento COP\$
ENERO	12 610	70	113 279 833	42 874 000
FEBRERO	14 445	80	129 764 250	49 113 000
MARZO	17 165	95	154 198 917	58 361 000
ABRIL	10 080	56	90 552 000	34 272 000
MAYO	6 900	38	61 985 000	23 460 000
JUNIO	11 231	62	100 891 817	38 185 400
JULIO	10 089	56	90 632 850	34 302 600
AGOSTO	13 500	75	121 275 000	45 900 000
SEPTIEMBRE	18 540	103	166 551 000	63 036 000
OCTUBRE	17 280	96	155 232 000	58 752 000
NOVIEMBRE	17 918	100	160 963 367	60 921 200
DICIEMBRE	16 920	94	151 998 000	57 528 000
<b>Total</b>	<b>166 678</b>	<b>926</b>	<b>1 497 324 033</b>	<b>566 705 200</b>

De acuerdo con la generación de este volumen de lodos, la compañía presenta sobrecostos diarios por transporte y tratamiento de este fluido en las plantas externas, adicional a los riesgos asociados por posibles retrasos. Gracias al incremento de vehículos que deben ser despachados en el horario permitido se pueden presentar posibles eventos de derrame del producto en las vías, además

de los inconvenientes asociados al incumplimiento de las flotas de vehículos para la continuidad y el desarrollo del proceso de calidad de agua en la planta de tratamiento de agua de producción. Por otra parte, este volumen actualmente viene en incremento por las diferentes actividades de perforación para nuevos pozos productores, que se verán reflejados en un mayor volumen de lodos.

Es necesario plantear una alternativa para el manejo de estos lodos, estructurando un plan para la implementación mediante el personal de la unidad de facilidades, la cual desarrolla los proyectos en la compañía para el área de operaciones.

Independientemente de la solución mejorando el manejo de lodos, se va a reducir el costo actual que se tiene en la compañía por no tener la facilidad para manejar, tratar y disponer este tipo de lodos, tal como se observa en la Tabla 1 el volumen viene incrementando, por eso logra implementar un nuevo sistema, se reduciría el OPEX asociado a esta actividad consiguiendo un beneficio para la compañía. Adicionalmente, el tiempo que emplean los asistentes en el cargue de vehículos y más tiempo para el seguimiento de los equipos de la planta de tratamiento de agua.



## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 General**

Estructurar un proceso de mejora para el manejo de residuos de aguas industriales/lodos en planta de tratamiento en una empresa operadora de hidrocarburos.

### **4.2 Específicos**

- Describir el proceso de agua residual industrial en el campo estudio.
- Analizar las ventajas de la implementación del equipo (decantador centrífugo).
- Realizar la comparación de los costos del manejo actual vs. la implementación del sistema.

## 5 MARCO CONCEPTUAL

Para identificar y proponer un equipo con el propósito de mejorar el proceso de manejo de aguas aceitosas es importante tener claro lo siguiente:

Rojas (2007) mencionó que el agua residual es una de las fases más importantes en el manejo de las aguas industriales, requiere caracterización para conocer la cantidad y tipo de contaminantes producidos por los diferentes procesos industriales. Cada industria genera desechos que son inherentes a sus procesos. En un artículo presentado en la Conferencia Internacional de Salud, Seguridad y Medio Ambiente de la SPE mencionaron que en “la industria la cantidad de agua producida con petróleo aumenta a medida que los campos maduran y esos efluentes acuosos tienen que ser tratados por instalaciones especialmente diseñadas para cumplir tanto con los reglamentos como con los requisitos técnicos” (Pierre, 2006).

Las instalaciones que se encuentran especialmente diseñadas para el manejo del fluido producido en los yacimientos de hidrocarburos reciben el nombre de facilidades de producción. En estas instalaciones, Arnold y Stewart (2008) mencionaron la principal tarea:

Es separar el flujo del pozo en tres componentes, “fases” (petróleo, agua, gas) y procesar estas fases en algunos productos comercializables o eliminarlos de una manera aceptable para el medio ambiente. Los procesos se realizan mediante la utilización de diferentes equipos que se usan en superficie para realizar la separación de los fluidos (p. 26).

En esta investigación se dio a conocer el concepto de hidrocarburo, puesto que el desarrollo del trabajo es un yacimiento donde se encuentran y tal como adujo Ferrer (2009), los fluidos contenidos en las rocas de yacimientos petrolíferos que tienen una serie de compuestos orgánicos, carbono e hidrógeno. A menudo son difíciles de separar y se conocen como petróleo crudo (p. 23-24), entonces, el petróleo es la mezcla de hidrocarburos existentes en la fase líquida a las

condiciones del yacimiento y que permanece líquido a las condiciones normales de presión y temperatura en superficie, así como las impurezas contenidas en él.

Uno de los objetivos claves del trabajo de grado es la implementación de un equipo con características específicas. Para abordar la implementación se mencionó el uso de la tecnología, para Gay y Ferreras (s.f.) “es el resultado de relacionar la técnica con la ciencia y con la estructura económica y sociocultural. Además, proviene de analizar determinados problemas que se plantea la sociedad y buscar solución” (Capítulo V, p.4).

En el segundo objetivo se hace referencia a todo lo relacionado con el equipo, decantador centrífugo; sin embargo, para entender un poco más es relevante definir qué es la decantación. Rigola (1990) definió la separación por decantación de la siguiente manera:

Donde se aprovecha la fuerza de la gravedad que imprime a las partículas en movimiento descendente, cuya velocidad depende de la densidad y viscosidad del líquido, tamaño, forma y densidad de la partícula para obtener una máxima eficiencia conviene obtener partículas pesadas y grandes (p. 11).

Por su parte, la Universidad de Barcelona (2021) identificó la centrifugación según lo descrito a continuación:

Es una técnica de separación que se utiliza para aislar o concentrar partículas suspendidas en un líquido, aprovechando la diferente velocidad de desplazamiento según su forma, tamaño o peso al ser sometidas a una fuerza centrífuga, además, la fuerza centrífuga es la que se ejerce sobre un cuerpo cuando éste gira alrededor de un eje. (párr. 1)

Así mismo, la empresa Alfa Laval precisó la decantación centrífuga como una tecnología de separación sólido-líquido, en la que se usa la aceleración centrífuga para aumentar la velocidad de sedimentación, disminuir el tiempo de residencia hidráulica y disminuir el área de sedimentación (Alfalaval, s.f.).

## 6 DISEÑO METODOLÓGICO

En este apartado se planteó un esquema para cada objetivo específico por medio de la bitácora. Para las fuentes primarias se utilizaron las entrevistas y encuentros conversacionales como herramienta de investigación. El motivo de la selección de este tipo de herramientas es por la interacción que se logró con cada uno de los expertos con los que se interactuó, teniendo una serie de preguntas abiertas previo al encuentro, que permitieron aprovechar y lograr una conversación fluida con las personas que participaron. Los encuentros realizados se desarrollaron en la plataforma Teams, algunos por medio de llamadas telefónicas y reuniones presenciales, que aportan mucho valor gracias a la interacción con los entrevistados que se lograron realizar en campo. Antes de cada encuentro se tuvo contacto con los participantes, se les explicó la idea y de qué se trataba el objetivo del proyecto, así los entrevistados ya tendrían una idea del tema a abordar, lograban organizarse y buscar información que posteriormente compartieron en la entrevista, además de sus conocimientos adquiridos por la experiencia.

Se solicitó la autorización a los participantes para que quede registro de la información por medio de grabación y toma de notas, para luego realizar su transcripción. Se piensa dejar soporte por medio de un formato o la grabación de voz.

A continuación, se presenta la distribución de los participantes con los que se interactuó mediante la herramienta anteriormente mencionada:

Tabla 2. Relación de los participantes en la revisión y análisis de cada uno de los objetivos propuestos.

Objetivo Especifico-1	Objetivo Especifico-2	Objetivo Especifico-3
Describir proceso de agua residual industrial en el campo estudio.	Analizar las ventajas de las características de la implementación de la tecnología (Decantación centrífuga)	Comparación de los costos del manejo actual de residuos de una planta de ARI Vs. la implementación de la tecnología para el manejo de residuos en planta de ARI
Ingeniero de producción (1) Operador de la planta (1) <b>Términos:</b> Procedimientos, agua residual industrial	Lider de ingeniería UFP (1) Profesional ingeniería UFP (1) Lider Comisionamiento (1) <b>Término:</b> Tipo de equipos o sistemas, residuos de aguas residuales industriales, experiencia, casos de ejemplo, comparativos entre equipos.	Profesional de costos (1) <b>Término:</b> Opex, seguimiento, variables.

Para las fuentes secundarias se emplearon los siguientes documentos técnicos de la empresa, información de empresas, contratistas y bases de datos:

- Dossier de construcción de facilidades existentes para manejo de crudo y agua en el campo.
- Manuales de operación de plantas para el tratamiento de agua.
- Filosofía de operación de las facilidades existentes para manejo de crudo y agua en el campo.

La información de la empresa se encuentra en las facilidades de producción en físico, por otra parte, existe información digital que se compartió mediante compañeros del área vía correo electrónico, dentro de la que se encuentran:

- Reportes anuales consolidados de cantidades de aguas residuales transportadas y tratadas en planta externa para disposición final.
- Soportes de facturación del contrato de transporte y tratamiento de lodos enviados a planta externa para disposición final.
- Procedimientos del proveedor para el manejo de residuos recibidos en planta externa.

También se utilizaron los siguientes softwares que albergan información técnica, operativa y de costos de la producción del campo:

- Herramienta SAP: balances de costos de los últimos años del contrato de transporte y tratamiento de aguas aceitosas enviadas a planta externa.
- Herramienta Qlik: plataforma de análisis empresarial, que permite realizar analítica e integración de datos de los yacimientos y de la producción del campo.
- Herramienta de producción: plataforma de gestión, administración y seguimiento de los procesos de producción de crudo, inyección de agua y balance continuo de la operación.

Para la base de datos se emplearon documentos académicos publicados en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander y la Fundación Universidad de América. Además, *papers* publicados en OnePetro (biblioteca digital de literatura técnica para la industria de exploración y producción de petróleo y gas) y algunos estudios disponibles en Google académico.

Así mismo, se diligenció un formato de autorización para el uso de la información con fines académicos. Este se aplicó tanto para la información correspondiente a la empresa como para las fuentes primarias.

Tabla 3. Relación de documentación de referencia y términos de búsqueda para la revisión y análisis de cada uno de los objetivos del presente proyecto.

Objetivo Especifico-1	Objetivo Especificos-2	Objetivo Especificos-3
<p>Describir proceso de agua residual industrial en el campo estudio.</p>	<p>Analizar las ventajas de las características de la implementación de la tecnología (Decantación centrífuga)</p>	<p>Comparación de los costos del manejo actual de residuos de una planta de ARI Vs. la implementación de la tecnología para el manejo de residuos en planta de ARI</p>
<p>Documentos físicos y digitales ubicados en facilidad de producción Documentos compartidos por correo. Dossier de la facilidad. <b>Términos de búsqueda:</b> Facilidades de producción, hidrocarburos</p>	<p>Documentos físicos y digitales ubicados en facilidad de producción Documentos compartidos por correo. Dossier de la facilidad. <b>Términos de búsqueda:</b> Decantación, centrifugas, equipos, sistemas</p>	<p>Documentos físicos y digitales ubicados en facilidad de producción Documentos compartidos por correo. Dossier de la facilidad. <b>Términos de búsqueda:</b> Opex, capex, costos operativos, análisis financiero</p>

## 7 DESARROLLO DEL TRABAJO

### 7.1 Describir el proceso de agua residual industrial en el campo estudio

Los fluidos de producción (crudo y agua) provenientes de cada locación son direccionados por tuberías hacia su respectivo manifold y seguido a esto, se conducen los fluidos mediante tuberías hasta la facilidad de producción del campo.

Una vez llegan al manifold principal de la facilidad, todos los fluidos de los pozos del campo se direccionan y distribuyen hacia seis FWKO, que son equipos diseñados para separar el agua libre del aceite y la emulsión debido a su alto contenido de agua.

Los FWKO (Free Water Knockout) son equipos que tienen dos salidas: una por la parte superior, que recibe el nombre de rebose y en la cual sale crudo con un porcentaje de agua; y otra salida inferior, por la que sale la mayor cantidad de agua. La salida del rebose continua su trayectoria a través de tuberías hacia la entrada de unos equipos llamados intercambiadores, “que permiten la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido”<sup>1</sup>, además, tiene la función de calentar el fluido por medio de su sistema interno conformado por serpentín. El fluido se calienta por lado externo.

El tipo de intercambiadores que se utilizan en la facilidad consisten en un conjunto de tubos en un contenedor denominado carcaza. “El flujo de fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo interno y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de carcaza o fluido externo” (Jaramillo, 2007, p. 3).

En la facilidad se operan dos tipos de intercambiadores: tipo flujo paralelo y tipo contraflujo. En el tipo paralelo “los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa” (Jaramillo, 2007, p. 5), y en el de contra flujo:

---

<sup>1</sup> Manual de operaciones campo estudio.

Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos, puesto que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura. La temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada. (Jaramillo, 2007, p. 5)

Posteriormente, el fluido es direccionado a los tratadores de placas coalescentes que separan el agua emulsionada. Los tratadores tienen como función deshidratar el crudo hasta lograr un valor de contenido de agua por debajo de 0,5 %, para que eso suceda se requiere garantizar la temperatura con el fin de “reducir la viscosidad y aumentar la diferencia de densidad entre el crudo y el agua” de acuerdo con lo escrito en el dossier del equipo para tratamiento por placas coalescentes.

Según lo observado en campo los tratadores están compuestos por dos cámaras de separación (recámara N. ° 1 y recámara N. ° 2) y un bolsillo recolector de crudo. Según lo escrito en el dossier del equipo para tratamiento por placas coalescentes “cada una de estas recámaras de separación se encuentra una sección horizontal de packs de coalescencia donde se hace la separación de la emulsión”.

El crudo producto del proceso de separación en los tratadores es dirigido hacia los tanques de almacenamiento, en los que después de tener unos tiempos de reposo, se realiza su posterior medición, fiscalización y despacho. Teniendo un crudo de venta con valores entre 13 ° y 15 ° API (crudo pesado).

Las salidas de agua de los tratadores se unen con la salida de agua de los FWKO en un cabezal común de 16 °, formando una sola corriente que es direccionada a la entrada de las plantas de tratamiento de agua, una planta de 50 000 BWPD y otra de 100 000 BWPD, que de acuerdo con las características fisicoquímicas del agua a la entrada y al volumen realiza el proceso de tratamiento de agua con el propósito de obtener las condiciones apropiadas para la disposición o inyección en los pozos.



La entrada de la planta de 100 000 BWPD cuenta con dos tanques ecualizadores, cada uno de una capacidad de 750 bls. Su principal función es amortiguar los baches provenientes del proceso, que ocasionan incrementos o decrementos instantáneos de caudal con el fin de estabilizar el flujo de agua en la entrada de la celda. Cabe mencionar que la celda es un equipo que opera a presión atmosférica y tiene seis (6) cámaras, cuatro de ellas con inyección de aire, una cámara de entrada, una cámara de salida y un recolector de aceite lateral común.

El fluido de entrada de la celda es controlado por la válvula de control en la salida de los ecualizadores, esta permite realizar el proceso de clarificación y separación de aceite libre con las concentraciones de sólidos en suspensión presentes en el fluido. En ella también se lleva a cabo la separación del aceite remanente en la corriente de entrada por medio de la flotación inducida, por acción de las bombas de microburbujas que operan recirculando agua de la salida de la celda con aire saturado para realizar el proceso de flotación. Adicionalmente, se cuenta con un punto para la inyección de producto químico en el proceso para mejorar la separación, solo si así se requiere.

El aceite acumulado por el proceso de la microburbuja pasa a la altura del bolsillo de desnate del equipo y es transferido a un tanque, que posteriormente es direccionada por medio de bombas y líneas hasta llegar a la entrada principal de los FWKO. La salida principal de la celda se direcciona al sistema de filtración a través de cinco bombas centrífugas que tienen variador de frecuencia y controlan el nivel de la celda por mediante la señal LIT (control de nivel), la descarga de las bombas de filtración pasa por los filtros de lecho de cáscara de nuez.

Por su parte, la filtración consiste en remover el contenido de sólidos y aceites remanentes por medio de filtros con lecho de cascarilla de nuez en los que se retienen la mayor parte de contaminantes del fluido, luego de esto, el fluido es enviado a los tanques de agua filtrada para disposición o inyección.

Los filtros de cáscara de nuez operan por 18 horas (el tiempo depende a las condiciones operacionales) continuas y de acuerdo con tres condiciones se realiza

el retrolavado, que es un proceso de limpieza por la saturación del medio filtrante (proceso de regeneración).

De acuerdo con el manual de campo el ciclo de limpieza del lecho se efectúa al invertir el flujo a través de la unidad de filtrado, para remover y desplazar las trazas de crudo y sólidos acumuladas. Esta acción inversa expande el medio filtrante, limpiándolo por acción hidráulica y fricción entre partículas. A continuación, se mencionan las condiciones para realizar el retrolavado: primero, se da por horas de filtración; segundo, por requerimiento operacional según los resultados del laboratorio; y por último, por presión diferencial igual a 15 Psi. Este proceso cuenta con las siguientes siete (7) etapas, que fueron tomadas con referencia en los descrito en el documento instructivo de operación planta de agua 100 KBWPD.

1. Flushing: es el inicio del retrolavado y en esta etapa se asegura el enfriamiento del sello de la bomba de retrolavado.
2. Descompactación: prepara el contenido del filtro seleccionado para el encendido de la bomba de retrolavado, el agua entra por la parte inferior del filtro y durante esta etapa solo se asegura la presurización de la vasija a la presión de descarga máxima de la bomba de filtrado (50 psig).
3. Fluidización I: esta etapa dispersa el lecho filtrante utilizando la bomba de retrolavado. Durante esta no hay flujo hacia el filtro, sino un aumento de presión dentro del filtro y la recirculación interna del agua.
4. Descarga: en esta fase el flujo es ascendente para remover el lecho filtrante y así retirar los sólidos y residuos aceitosos. Su duración está determinada por el nivel del decantador que tenga alineado el filtro.
5. Fluidización II: esta etapa busca barrer los sólidos que quedaron en la bomba de retrolavado o en las líneas que la conectan.
6. Asentamiento: en este punto se empuja el lecho filtrante hacia el inferior para acomodarlo nuevamente y asegura la presurización dentro de la vasija.

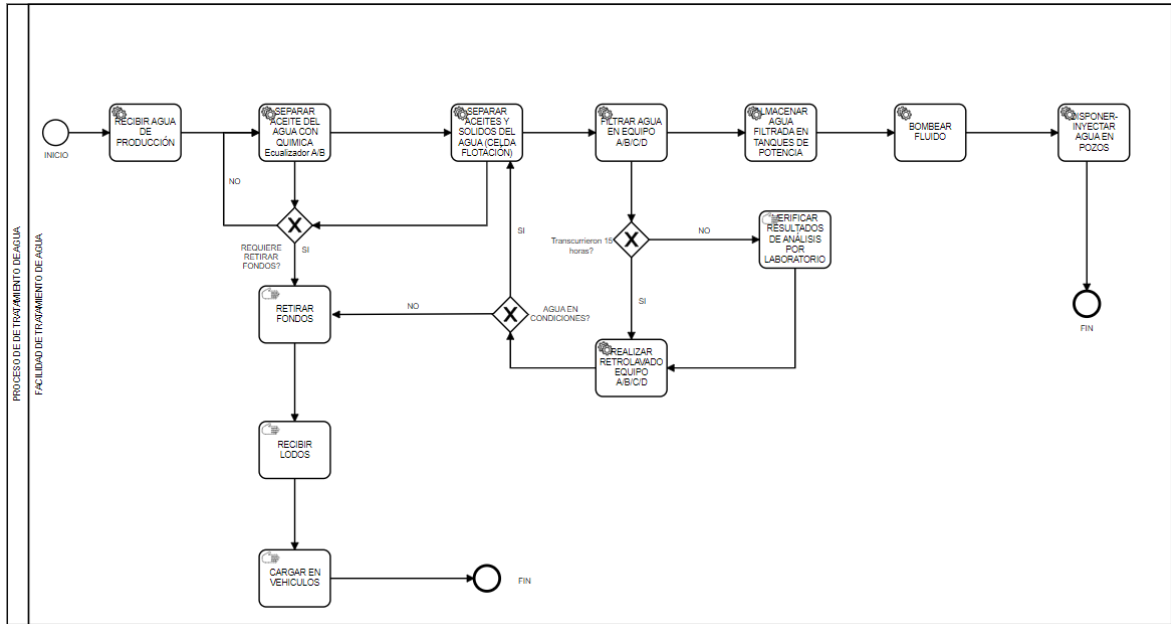
7. Normalización: corresponde al lavado final del lecho filtrante. Se retiran los últimos residuos contaminantes del lecho.

El fluido proveniente durante el retrolavado, que tiene alta carga de grasas y sólidos, lo reciben los tanques decantadores. En este equipo el fluido queda en reposo y tiene como función la separación de fases por gravedad y por los productos químicos aplicados, allí se buscará que las fases de aceite y fondos logren ser estratificadas o divididas del agua clarificada. En el equipo se logra la separación de las tres fases: natas, agua y lodo. Por su parte, el agua clarificada por las características de carga de aceites y sólidos retorna al proceso, se da la entrada de los ecualizadores o celda, y las natas y lodos son direccionadas al tanque de lodos.

En el tanque de lodos se almacenan esos fondos y natas provenientes de los retrolavados, adicionalmente, se reciben los fondos de los equipos como los ecualizadores y la celda. En el tanque de lodos no se realiza ningún tratamiento químico o procesos para tratar y recuperar el agua con alto contenido de sólidos, aceites y residuos químicos. Así mismo, el volumen total del tanque es cargado por medio de una bomba centrífuga y un camión cisterna a planta externa para su debido tratamiento y disposición.

El despacho del volumen acumulado en el tanque de lodos solo se realiza durante el día, un vehículo se carga alrededor de 35 minutos y en la operación diaria se debe asegurar bajar los niveles para garantizar disponibilidad de espacio con el fin de no afectar los retrolavados de los filtros en el turno de la noche, así se preserva la continuidad del tratamiento y se mantienen las condiciones de calidad de agua para la disposición o inyección.

Figura 1. Diagrama de proceso actual planta de tratamiento de agua 100KBWPD.



Como se mencionó anteriormente, el fluido despachado que se direcciona a plantas externas para este servicio de tratamiento y disposición debe contar previamente con todos los permisos en regla según lo informado por los líderes ambientales. Entre algunos de esos permisos se encuentran:

- Licencia ambiental donde se incluya el residuo a disponer con ellos: aguas residuales industriales y PMA.
- En su defecto, deben contar con un convenio vigente con un subcontratista de ellos para realizar esta actividad. A su vez, esta empresa deberá contar con todos los documentos en regla, licencia ambiental y no tener medidas preventivas para el manejo, tratamiento y disposición final de estos residuos.

Actualmente, el contrato que se tiene con la empresa trata en un 100 % los residuos de las aguas industriales provenientes del campo mediante los siguientes tratamientos:

- Coagulación.

- Floculación.
- Sedimentación.
- Ultrafiltración.
- Ósmosis inversa.
- Aireación.

Los ingenieros ambientales *senior* entrevistados describieron que la empresa que recibe el fluido de las aguas aceitosas realiza el análisis de calidad fisicoquímica dentro de su laboratorio interno, antes de enviarla a disposición final. Una vez se cumplen los parámetros permisibles por la norma, el agua es enviada a campos de aspersión e infiltración en áreas internas de la planta y la empresa envía certificación de la disposición final. A continuación, se relaciona el procedimiento que tiene establecido la empresa contratada:

Tabla 4. Procedimiento paso a paso de contratista actual de manejo de aguas aceitosas.

ID	Actividad	Registro	Descripción	Responsables
1	Recepción de vehículos	N.º Registro	Recibir los vehículos con los residuos y realizar registro de los datos de la empresa que entrega los residuos.	Portería
2	Descargue de vehículos		Si el residuo está caracterizado, se informa al director de operaciones para proceder al descargue según corresponda, de lo contrario se procede al muestreo para realizar análisis en el laboratorio interno.	Director de operaciones
3	Análisis de laboratorio	N.º Registro	Se realiza los análisis básicos de cloruros, pH, conductividad y temperatura.	Director de operaciones - Analista de laboratorio
4	Descargue en rampa		El vehículo se ubica en la rampa de descargue, se verifica que las tapas y sellos se encuentren en buen estado y se procede a descargar. Una vez verificado el descargue portería devuelve la copia de la remisión que le corresponde al cliente.	Portería

5	Novedad de la actividad	N.º Registro	Si hay alguna novedad que impida el correcto desarrollo de la actividad de descargue se informa a la dirección operativa para determinar el proceso a seguir.	Director de operaciones
6	Adición de floculantes		Después de que las aguas entran en el sistema de <i>cash tan</i> el operario adiciona la cantidad de floculante necesario a la salida del sistema y entrada de la piscina.	Operador
7	Sedimentación de sólidos		La sedimentación de los sólidos floculados sucede en la piscina.	Operador
8	Análisis de control	N.º Registro. Nota: pH entre 5-9 y transparencia >75	Se hace un análisis a la piscina n.º 1 para determinar si se realiza corrección por dosificación de químicos, si no cumple con los parámetros de transparencia y pH.	Analista de laboratorio y operador
9	Transferencia de agua de la piscina n.º 1 a la n.º 2		El operario se encarga de realizar la transferencia de agua de la piscina n.º 1 a la n.º 2 por medio de bombas.	Operador
10	Análisis de control	N.º Registro. Nota: Temperatura <40 °C y transparencia >75 %	Se realiza un análisis a la piscina n.º 2 para verificar temperatura y transparencia, en caso de que no cumpla con el porcentaje de transparencia se debe dosificar de nuevo en el punto piscina n.º 4.	Analista de laboratorio y operador
11	Transferencia de agua de la piscina n.º 2 a la piscina n.º 4		El operario se encarga de realizar la transferencia de agua mediante las bombas de la piscina n.º 2 a la n.º 4.	Operador
12	Control de la piscina n.º 4	N.º Registro. Nota: Temperatura <40 °C; pH entre 5-9; transparencia >75%: cloruros <250ppm	En la piscina n.º 4, las aguas se airean por medio de flautas para su oxigenación con el propósito de disminuir su temperatura y contaminantes que son susceptibles de oxidación. Si el agua de la piscina n.º 4 cumple con los parámetros para aspersión se procede a la aspersión, de lo contrario se hace el reporte de servicio no conforme y se reprocesa en sitio.	Analista de laboratorio y operador
13	Verificación después de la corrección	N.º Registro	Una vez realizadas las actividades señaladas en el documento de servicio no conforme, se informa al laboratorio para una verificación de que la corrección fue efectiva.	Analista de laboratorio y operador
14	Disposición final	N.º Registro	Se realiza la disposición final del agua tratada a través de aspersión en un campo de infiltración.	Operador

---

15	Entrega de acta disposición final	N.º Registro	Se da autorización para liberar acta y entregar al cliente.	Director de operaciones - Auxiliar administrativa (facturación)
----	-----------------------------------	--------------	---	---

---

## **7.2 Implementación de equipo de decantación centrífuga para separación de lodos**

Partiendo de la necesidad de reducir costos asociados a las cantidades de lodos, que se transportan desde el almacenamiento que se tiene dispuesto para ellos en una de las salidas actuales del sistema de tratamiento de agua, se presenta una alta oportunidad de mejora en la recuperación de un mayor porcentaje de agua y una mayor segregación de la fase sólida del material sobrante de los lodos, que actualmente representa un costo asociado a su transporte y tratamiento para disposición final en plantas externas, con esto se evidencia que el material que se retira es una mezcla (líquida, sólida) que presenta un importante porcentaje de líquidos.

Hoy en día, se cuenta en el mercado con soluciones tecnológicas basadas en equipos de decantación centrífuga que tienen la capacidad de separar los líquidos y sólidos de los lodos remanentes del proceso de tratamiento de aguas industriales generadas en la extracción de petróleo, de una forma efectiva y eficiente, lo que reduce las cantidades de disposición final de estos fluidos.

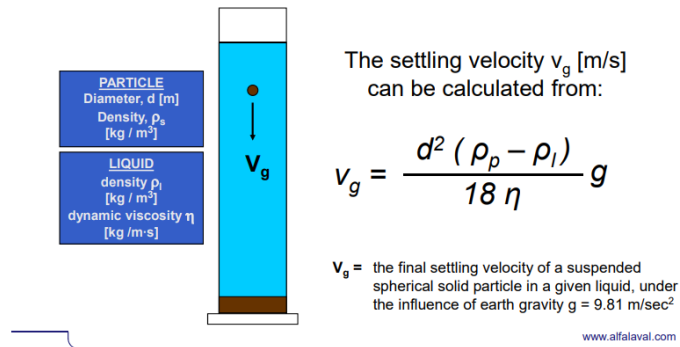
Para entender un poco mejor el modo de operación de estos equipos de decantación centrífuga que se ofrecen en el mercado, es preciso explicar la teoría sobre la que se basa este proceso de separación mediante el uso de la velocidad centrífuga.

### **7.3 Teoría de la centrifugación**

La centrifugación es un proceso de separación que utiliza la acción de la fuerza centrífuga para promover un acelerado asentamiento de partículas en una mezcla

sólido-líquido. Las dos fases mayormente distintivas se forman en el recipiente durante la centrifugación (Lenntech, s.f.).

Figura 2. Separación por diferencia de densidad.



Como se puede observar en la Figura 2, en condición de reposo la velocidad de sedimentación de una partícula asociada a un fluido es dependiente de la relación de su tamaño, de la diferencia de densidades entre la fase líquida y fase sólida, en relación con la constante de viscosidad dinámica y a la constante de gravedad.

En términos generales, esto indica que en una condición normal de reposo, como la que se presenta en algún dispositivo de sedimentación o piscina de almacenamiento que normalmente se utilizan en el sector de hidrocarburos, la velocidad con la que se separa por gravedad el material sólido del líquido está sujeta al tamaño y peso de las partículas, a la densidad de los elementos del fluido y al efecto de la fuerza de gravedad de la tierra.

En este punto es donde surge la alternativa de realizar la optimización de separación de lodos (sólidos, líquidos) no solo para recuperar mayor cantidad de líquidos, sino para optimizar los tiempos en los que se realiza este proceso.

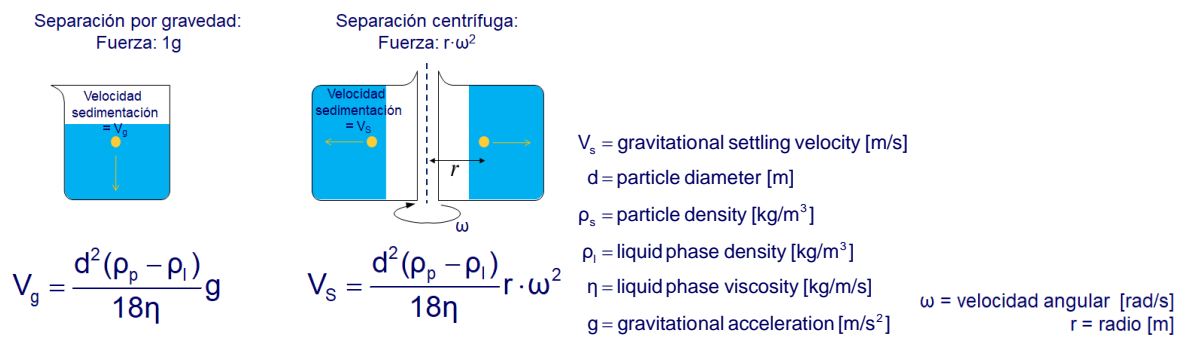
Como se había mencionado a lo largo del texto, la decantación centrífuga es una tecnología de separación sólido-líquido, en la que usa la aceleración centrífuga



para aumentar la velocidad de sedimentación, disminuir el tiempo de residencia hidráulica y disminuir el área de sedimentación<sup>2</sup>.

El principio de separación sigue la ley de Stokes, pero con una variación sobre la fuerza gravitacional que ya no aplicaría:

Figura 3. Comparación de velocidad de sedimentación de separación por gravedad vs separación centrífuga



De acuerdo con lo que se puede observar en la Figura 3, en un decantador centrífugo a diferencia de un proceso de separación por gravedad, la aceleración pasa de depender de la fuerza de aceleración “g” al factor asociado a la aceleración centrífuga “ $r * \omega^2$ ”, con lo que este factor puede acelerar hasta aproximadamente 3 000 veces la velocidad de sedimentación.

#### 7.4 Tipos de centrífugas para separación de lodos

Gran parte de los equipos de centrifugación para separación de líquidos y sólidos giran por el accionamiento de un motor eléctrico. De acuerdo con esto, se observa que los tipos de equipos de centrifugación para procesos de sedimentación son los siguientes:

- Hidrociclón. Water Treatment Solutions lo describió de esta manera:

El dispositivo simple que usa fuerza centrífuga para lograr la separación es el hidrociclón. Realmente no es una centrífuga: la separación centrífuga es

<sup>2</sup> Especificaciones Técnicas Modulo de Prueba P-305 Alfa Laval.

producida por el movimiento de la lechada, inducido por introducción tangencial del material de alimentación. Su principio de operación está basado sobre el concepto de la velocidad de asentamiento terminal de una partícula sólida en un campo centrífugo. (Lenntech, s.f., párr. 1)

El alimento entra tangencialmente en la sección cilíndrica del hidrociclón y continua por un camino de circulación con un flujo neto, hacia adentro del fluido, y desde el exterior directo al buscador de vórtice en el eje. El campo centrífugo generado por las altas velocidades de circulación crea un núcleo de aire en el eje que usualmente se extiende sobre la espita, abriéndose al fondo de la sección cónica a través del buscador de vórtice hacia el desbordamiento en la parte superior. Con el fin de que esto ocurra, el campo de fuerza centrífuga debe ser varias veces más grande que la gravitacional. Las partículas que experimentan este campo centrífugo tenderán a moverse hacia afuera en relación con el líquido portador debido a su relativamente alta densidad. Las partículas más grandes y pesadas migrarán rápidamente a las paredes exteriores de la sección cilíndrica y entonces serán forzadas a moverse hacia abajo al interior de la pared cónica. Por otro lado, las partículas pequeñas serán arrastradas al interior por el fluido a medida que se mueve hacia el buscador de vórtice. La separación de sólido ocurre en el paso de la suspensión a lo largo del cilindro del hidrociclón para formar lodo espeso en la pared exterior, que entonces sale del hidrociclón como una corriente continua desde su boquilla de descarga. (Lenntech, s.f., párr. 2)

- Centrífuga bowl tubular. La compañía Lenntech Water Treatment Solutions expuso algunas características y funcionalidad sobre esta:

La centrífuga bowl tubular ha sido usada por mucho más tiempo que la mayoría de otros diseños de centrífuga. Está basada en una geometría muy simple: está formada por un tubo, que de largo es varias veces su diámetro y gira entre cojinetes a cada extremo. La corriente de proceso entra al fondo

de la centrífuga y una fuerza centrífuga alta actúa para separar los sólidos. La masa de sólidos se adherirá a las paredes del bowl, mientras que la fase líquida sale en la superior de la centrífuga. (Lenntech, s.f., párr. 3)

Debido a que este tipo de sistema carece de una provisión de rechazo de sólidos, estos únicamente pueden ser removidos al detener la máquina, desmantelarla y raspar o enjuagar los sólidos manualmente. Las centrífugas de tipo bowl tubular tienen capacidad de deshidratación, pero su capacidad de sólidos es limitada (Lenntech, s.f., párr. 4).

- Centrífuga bowl cámara. La información técnica definió lo señalado a continuación:

La centrífuga de tipo bowl cámara es un número de bowl tubulares ordenados coaxialmente. Tiene un bowl principal que contiene insertos cilíndricos, los cuales dividen el volumen del bowl en una serie de cámaras anulares que operan en serie. El alimento entra al centro del bowl y la suspensión pasa a través de cada cámara sucesivamente, a distancias incrementadas desde el eje. Los sólidos se establecen en la pared exterior de cada cámara y el líquido clarificador emerge desbordándose por el diámetro más grande de la cámara. Este dispositivo también proporciona una clasificación de los sólidos suspendidos: las partículas gruesas se depositan en la cámara interna y la partícula cada vez más fina se depositan en las cámaras subsecuentes. La remoción de sólidos sedimentados requiere la detención de la rotación para limpieza manual (Lenntech, s.f., párr. 5).

- Centrífuga cesta imperforada.

La centrífuga de tipo cesta imperforada se usa cuando el sólido contenido de la suspensión es alto. Está compuesto por una simple cesta en forma de tambor o bowl, que usualmente gira alrededor de un eje vertical. Los sólidos se acumulan y se comprimen como efecto de la fuerza centrífuga, pero no

son deshidratados. El líquido residual es drenado cuando se detiene la rotación del bowl. La capa de sólidos se remueve manualmente por raspado o retirándola con pala. La descarga puede ser lograda primero, de manera semiautomática, usando un tubo desnatador para remover el líquido residual y luego, bajando una hoja de cuchilla dentro del sólido y cortándolo del bowl (Lenntech, s.f., párr. 5).

- Centrifuga pila de discos.

Este diseño es aún más simple. Es un bowl cerrado que contiene la pila de discos con cualquier sólido presente colectándose en la parte exterior del bowl, desde donde tienen que ser removidos manualmente después de detener la rotación. Los sólidos son descargados desde el bowl por un número de métodos, incluyendo el uso básico de boquillas que son abiertas continuamente permitiendo la descarga de un lodo grueso. En los diseños más complicados, las boquillas valvuladas se abren automáticamente cuando la profundidad sólida en el bowl alcanza un cierto valor, y luego se cierran nuevamente cuando la mayoría de los sólidos han sido descargados. En gran parte de los diseños complejos el bowl está abierto: su caparazón se divide circunferencialmente por un corto período con la abertura también controlada por la profundidad de sólidos en el bowl. (Lenntech, s.f., párr. 6)

- Centrifuga tipo decantador. La información técnica definió lo siguiente:

El decantador centrífugo es la única centrifuga de sedimentación diseñada desde el comienzo para manejar una concentración significativa de sólidos en la suspensión de alimentación. Al mismo tiempo puede lograr muy buenos niveles de clarificación de líquidos concentrados. A pesar de ser una pieza compleja de maquinaria, encarna un principio simple. Esta se compone básicamente de un bowl cilíndrico horizontal (1) que gira a una alta velocidad con un tornillo de extracción helicoidal (2) ubicado coaxialmente. El tornillo encaja perfectamente en el contorno interno del

bowl, solo permitiendo una holgura entre el bowl y el rollo. La velocidad diferencial entre el tornillo y el rollo proporciona el movimiento de transporte para coleccionar y remover los sólidos, que se acumulan en la pared del bowl (Lenntech, s.f., párr. 7).

Para el desarrollo de la presente investigación se escogió la solución tipo decantador centrífugo, teniendo en cuenta que presenta ventajas sobre los demás tipos de centrífugas en los siguientes aspectos:

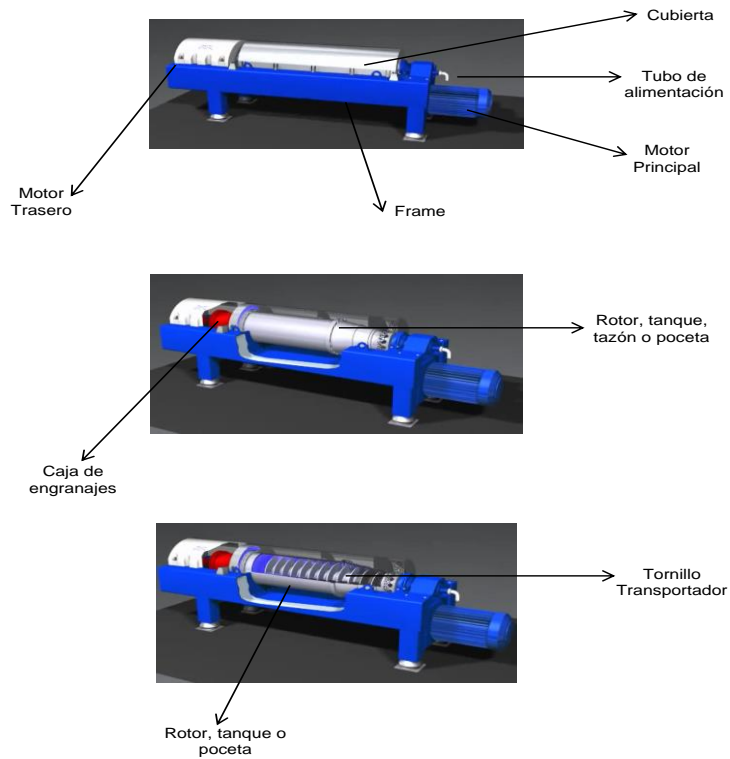
- Es un equipo que no requiere ser detenido para el retiro de sólidos y líquidos. Es decir, es un proceso continuo que garantiza una mayor eficiencia.
- Maneja un rango de mayor eficiencia en el proceso de separación de líquidos y sólidos en comparación de las otras alternativas.
- A diferencia de las otras alternativas genera sólidos deshidratados o secos, lo que representa una mayor eficiencia de cara a la recuperación de líquidos de los lodos y la reducción de material a retirar para disposición final.

## **7.5 Componentes decantador centrífugo y principios de operación**

El decantador centrífugo está compuesto normalmente por los siguientes elementos:

- Tanque.
- Rotor.
- Motor trasero con caja de engranajes.
- Motor principal.
- Tubería de alimentación.
- Cubierta.
- Frame.
- Panel de Control.

Figura 4. Partes de decantador centrífugo.



El fluido que se requiere manejar dentro del proceso de decantación centrífuga ingresa al decantador por la intersección que se encuentra entre la parte cónica del tanque y el cilindro del motor a través de un tubo de alimentación.

En el tanque se tiene una sección cilíndrica y una sección cónica, el principio de funcionamiento se basa de tal forma que el proceso de separación de sólidos y líquidos se lleva a cabo en la parte del cilindro, proceso que comúnmente se conoce como clarificación. Mientras tanto, en la parte cónica del tanque se realiza el trabajo de deshidratación del material sólido para poder obtener a la salida un material seco sin presencia de componentes líquidos como aguas o aceites.

En este orden de ideas, el movimiento centrífugo es posible gracias al accionamiento mecánico de dos motores eléctricos. El principal se encarga de la rotación del conjunto tanque, rotor y caja de engranajes, que funciona con un variador de velocidad con el objetivo de ir controlando su aceleración hasta

alcanzar una velocidad deseada y adecuada para optimizar el proceso de separación de líquidos y sólidos.

El fluido se distribuye a lo largo del tanque del decantador y al aprovechar la aceleración centrífuga genera que la parte más densa del fluido (sólidos) se separe a la periferia del tanque, mientras que la fase líquida se distribuye por el centro del tanque.

El motor trasero se encarga de accionar el tornillo transportador que se encuentra acoplado a una caja de engranajes, de esta forma este conjunto gira a menor velocidad con relación al tanque, con el objeto de desalojar de manera continua los sólidos separados por la primera sección hacia la parte cónica del tanque.

El líquido que sale del proceso de clarificación lo hace por el extremo de mayor diámetro del dispositivo a través de unos elementos llamados tubos de poder, que cuentan con diámetros ajustables de acuerdo con los volúmenes de fluidos que se requieran manejar.

Mientras tanto, los sólidos salen por los extremos de menor diámetro del dispositivo por efecto de la fuerza centrífuga, que se encarga de impulsarlos hacia las aberturas de salida.

Los parámetros que normalmente se revisan y ajustan para obtener mejores resultados en el proceso de separación de líquidos y sólidos son los siguientes:

- Velocidad de avance, controlada mediante el ajuste de la bomba de alimentación al decantador.
- Velocidad (RPM) y fuerza gravitacional, parámetros que son ajustados desde el panel de control y variadores que están asociados al sistema de control del decantador centrífugo, que le permiten al operador ajustar la velocidad óptima del proceso durante la operación.
- Velocidad relativa del transportador/tazón, es decir, la velocidad diferencial, de tal forma que con su ajuste se logre optimizar el volumen y sequedad de los sólidos que fueron separados y que se van a retirar.

- La dosificación puede ser controlada mediante el sistema de control de caudal de la bomba que los suministra, solo si es necesario para mejorar el proceso la aplicación de algún tratamiento químico de tipo floculante o coagulante.

## **7.6 Ventajas del proceso de decantación centrífuga**

A continuación se describen las principales ventajas del uso de la tecnología de los decantadores centrífugos para la aplicación de separación de lodos y líquidos:

- Garantiza una operación de forma automatizada, eficiente y con un requerimiento bajo de supervisión y operación humana, lo que representa un bajo costo laboral asociado.
- Al hacer uso del principio de la aceleración centrífuga mediante el factor multiplicador de la fuerza de gravedad, las áreas que se requieren para disponer este tipo de equipos decantadores son mucho menores y reducidas en comparación con otro tipo de soluciones que se manejan actualmente en la industria de hidrocarburos, tales como filtros tipo prensa, lechos de secado, tanques de secado, entre otros, que demandan una gran área para su funcionamiento.
- Flexibilidad y adaptación, mediante la posibilidad del ajuste de parámetros mencionados en la sección 2.3, de tal forma que se puede hacer seguimiento y control del proceso en torno al caudal que se va a manejar y a la concentración de sólidos presentes en el fluido.
- Se ahorran los requerimientos de equipos adyacentes tales como tanques espesadores, sistemas de flotación o sistemas sedimentadores, debido al principio de aceleración del proceso de sedimentación mediante el uso de la centrifugación.
- Se obtiene en un solo proceso continuo y óptimo la separación de este fluido que proviene del sistema principal de tratamiento de agua, de tal forma que a la salida del decantador centrífugo se retira un material sólido



sin presencia de lixiviados y una salida de líquidos independientes clarificados.

- De acuerdo con los resultados que han tenido diferentes tipos de fabricantes de este tipo de tecnología de decantación centrífuga, con su uso se logra manejar partículas sólidas de hasta mínimo cinco micrones.
- Cuenta con un diseño hermético que evita la dispersión de olores, humos y gases que se puedan presentar en el proceso y que puedan contaminar los espacios de operación.
- El diseño, la construcción y los materiales que se utilizan para el ensamblaje de un decantador centrífugo garantizan el funcionamiento, la disponibilidad y la confiabilidad del equipo durante largos períodos de tiempo.
- Es un sistema de fácil y de rápida instalación.
- Es una tecnología que puede ser de tipo bifásico (para agua y sólidos) o de tipo trifásico (agua, aceite, sólidos), por esta razón representa un amplio espectro de reducción y recuperación de costos.

### **7.7 Desventajas del proceso de decantación centrífuga**

Con base en la comparación con otros tipos de equipos y facilidades para la separación de lodos, los sistemas de decantación centrífuga presentan las siguientes desventajas:

- En términos de costo, estos equipos son significativamente más costosos en relación con los filtros y separadores similares.
- Si se requiere contar con mejoras en materiales o partes para aumentar el rendimiento y evitar el desgaste de estas, significaría un aumento considerable en el costo final del equipo.
- En comparación con los filtros convencionales, el decantador centrífugo requiere una potencia eléctrica mayor para el accionamiento del motor

principal y trasero, por este motivo demanda una mayor cantidad de energía eléctrica.

- Por efecto del uso del principio de aceleración centrífuga este tipo de equipos se ven sometidos a altas vibraciones y ruidos al alcanzar las fuerzas y velocidad que se comentaron anteriormente. Estas pueden estar próximas a rangos entre 70 dB y 80 dB.

### **7.8 Análisis económico del proceso sin implementación y con implementación**

En la actualidad, el proceso de transporte y tratamiento de lodos se realiza por medio de una compañía externa y le representa los siguientes costos a la compañía (*información tomada del departamento Ambiental de la compañía quien actualmente es el encargado de administrar el contrato para la disposición de estos lodos*):

Tabla 5. Relación de costos de transporte y tratamiento de lodos 2019-2021.

Año	Costo tratamiento	Costo transporte
Año 2019	USD 86 671	USD 229 001
Año 2020	USD 149 133	USD 394 033
Año 2021	USD 232 224	USD 613 571

### **7.9 Estimación de crecimiento de agua de producción y lodos**

Tal como se evidencia en la Tabla 5 los costos anuales de transporte y tratamiento de lodos ha aumentado, este comportamiento se da a causa del proceso de madurez de campo. Durante la extracción de crudo se produce tanto petróleo como agua, inicialmente el porcentaje de crudo es más alto que el porcentaje de agua; sin embargo, esta relación va cambiando con el tiempo, puesto que poco a poco disminuye el porcentaje de petróleo y aumenta el porcentaje de agua.

Debido a este comportamiento se puede observar cómo se presenta un crecimiento en la cantidad de agua de producción con el proceso de madurez del campo.

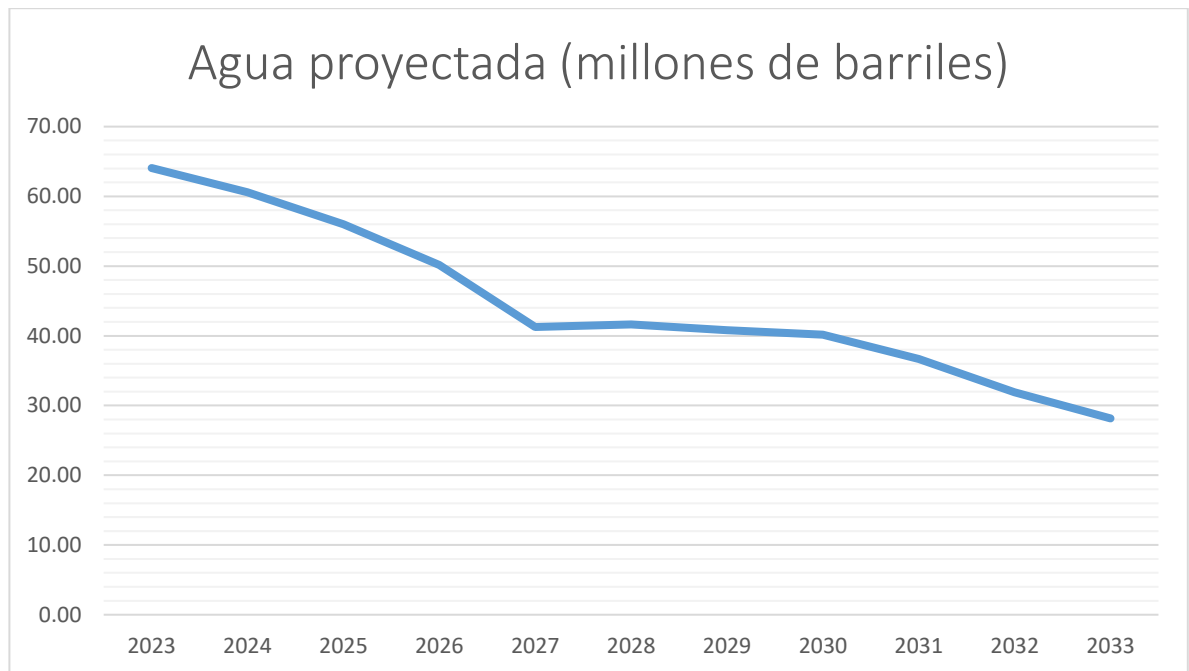
En la empresa se cuenta con un departamento encargado de monitorear y estudiar el comportamiento de los yacimientos del campo, para poder brindar información concreta a la compañía que permita facilitar y asegurar la toma de decisiones en cuanto a optimización, sostenibilidad y desarrollo del campo.

Este departamento continuamente está evaluando el comportamiento de las curvas de producción de petróleo y agua del campo con el fin de planificar adecuadamente las medidas que se deben tomar para los caudales que se van a manejar. Partiendo de estas estimaciones se realizó la siguiente relación de crecimiento de agua de producción para el año en curso y los próximos años:

Tabla 6. Estimación de comportamiento de agua de producción del campo en millones de barriles.

<b>Año</b>	<b>Agua proyectada (millones de barriles)</b>
2023	64,06
2024	60,59
2025	56,01
2026	50,16
2027	41,27
2028	41,65
2029	40,82
2030	40,14
2031	36,68
2032	31,91
2033	28,15

Figura 5. Curva estimada de comportamiento de agua de producción del campo Tigana de los años 2023-2033.



Teniendo en cuenta lo anterior, en el año 2023 se tendrá el pico más alto de agua de producción a manejar, aproximadamente 64 millones de barriles de agua. Esto se evidencia en la Figura 5.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo I referente al proceso de manejo de agua de la facilidad, solo una parte de la cantidad de agua de producción llega en forma de lodos al final de la cadena para su transporte, tratamiento y disposición final.

Al revisar el comportamiento de los últimos años de la relación de los lodos que se ha tratado vs la cantidad total de agua de producción, se encuentra que los lodos de producción que requieren transporte y tratamiento han sido en promedio el 0,66 % del agua total de producción.

Tabla 7. Cantidades de lodos tratados en los años 2019-2021 con relación al total de agua de producción del campo.

Año	Producción o pronóstico agua de producción (millones de barriles)	Cantidades de aguas aceitosas por año (miles de barriles)	Porcentaje que representan los lodos en referencia al total de agua de producción
2019	14,78	96,87	0,66 %
2020	21,89	166,68	0,76 %
2021	47,07	259,54	0,55 %

Teniendo en cuenta la curva de estimación del agua de producción del campo y el promedio de porcentaje de lodos asociados a esta, se realizó la siguiente proyección de las cantidades de lodos que se manejarían desde el año 2022, hasta el 2033:

Tabla 8. Estimación de lodos a tratar para los años 2022-2033.

Año	Producción o pronóstico agua de producción (millones de barriles)	Cantidades de aguas aceitosas por año (miles de barriles)
2022	58,34	382,78
2023	64,06	420,32
2024	60,59	397,52
2025	56,01	367,51
2026	50,16	329,09
2027	41,27	270,77
2028	41,65	273,25
2029	40,82	267,82
2030	40,14	263,39
2031	36,68	240,67
2032	31,91	209,37
2033	28,15	184,72

### 7.10 Estimación de costos asociados a transporte y tratamiento de lodos

Actualmente, la compañía maneja los siguientes costos para el proceso de transporte y tratamiento de lodos:

Tabla 9. Tarifas de transporte y tratamiento de lodos mediante compañía externa.

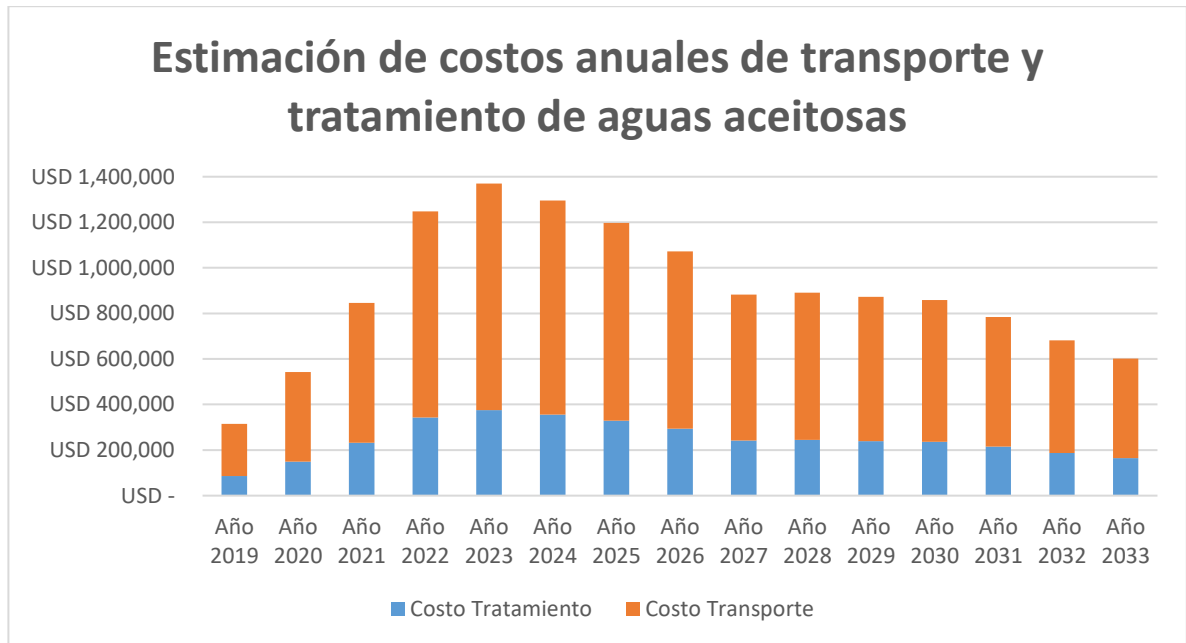
Tarifa actual tratamiento por barril	COP\$ 3 400
Tarifa actual transporte (180 barriles)	COP\$ 1 617 000

Teniendo en cuenta los volúmenes estimados de lodos que se van a tener asociados al proceso de producción del campo y las tarifas actuales de los servicios de transporte y tratamiento, se estiman los siguientes costos asociados a lodos para los siguientes años:

Tabla 10. Estimación de costos asociados a transporte y tratamiento de lodos para los años 2022-2039.

Año	Costo tratamiento	Costo transporte
2019	USD 86 671	USD 229 001
2020	USD 149 133	USD 394 033
2021	USD 232 224	USD 613 571
2022	USD 342 489	USD 904 907
2023	USD 76 073	USD 993 642
2024	USD 355 675	USD 939 749
2025	USD 328 827	USD 868 814
2026	USD 294 446	USD 777 973
2027	USD 242 266	USD 640 106
2028	USD 244 483	USD 645 962
2029	USD 239 626	USD 633 128
2030	USD 235 660	USD 622 651
2031	USD 215 335	USD 568 950
2032	USD 187 330	USD 494 955
2033	USD 165 275	USD 436.684

Figura 6. Curva estimada de costos asociados al transporte y tratamiento de lodos del campo Tigana de los años 2022-2033.



### 7.11 Estimación de costos asociados a tratamiento y transporte de lodos con la inclusión del sistema de decantador centrífugo para deshidratación de lodos

Con el objeto de reducir los costos asociados al transporte y tratamiento de lodos que se lleva a cabo actualmente con una empresa externa, se propuso implementar un sistema de decantación centrífuga como el que se describe en el capítulo II del presente trabajo de grado.

#### 7.11.1 Análisis de costos de proyecto de decantación centrífuga CAPEX/OPEX.

Para la implementación de esta tecnología se estimaron costos en ingeniería, obras y equipos catalogados como CAPEX (Capital Expenditure), que son gastos o inversiones en capital con el fin de invertir en el crecimiento de la compañía:

Tabla 11. Costos de inversión en equipos requeridos para el proyecto de decantación centrífuga.

Equipo	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total
Decantador Centrifugo	EUR 450.000	1	COP\$ 1.881.000.000
Medidor de Flujo de Agua	USD 35.000	1	COP\$ 133.000.000
Tanque de Solidos	COP\$ 60.000.000	1	COP\$ 60.000.000
Costos Equipos Principales COP			COP\$ 2.074.000.000
Costos Equipos Principales USD			USD 545.789

Para el aseguramiento del dimensionamiento del equipo y sus respectivas facilidades, mecánicas, eléctricas y de instrumentación, es necesaria la elaboración de una ingeniería de detalle, que de acuerdo con el promedio que se maneja en la compañía y en el mercado tendría la siguiente valoración:

Tabla 12. Costos de inversión en ingeniería de detalle requerida para el proyecto de decantación centrífuga.

Ingeniería de detalle para el proyecto	
Especialidad	Costo
Procesos	COP\$ 36 720 000
Mecánica	COP\$ 62 560 000
Civil	COP\$ 23 424 000
Electricidad	COP\$ 78 720 000
Instrumentación	COP\$ 53 760 000
<b>Administración (10 %)</b>	<b>COP\$ 25 518 400</b>
<b>Imprevistos (5 %)</b>	<b>COP\$ 12 759 200</b>
<b>Utilidad (12 %)</b>	<b>COP\$ 30 622 080</b>
<b>Total antes de IVA COP</b>	<b>COP\$ 324 083 680</b>
<b>Total antes de IVA USD</b>	<b>USD 85 285</b>

Igualmente se requiere realizar una inversión en obras civiles, mecánicas, eléctricas y de instrumentación para poder instalar el equipo y ponerlo en funcionamiento en torno al proceso de la facilidad.

Obras civiles:

- Cimentación para decantador centrífugo.
- Cimentación del tanque de almacenamiento de sólidos secos.
- Adecuación de la zona de parqueo para vehículo de retiro de sólidos secos.



- Conexiones de drenajes de nuevas placas a sistema de aguas aceitosas.
- Pruebas de resistencia de concretos.

#### Obras eléctricas:

- Sistema de puesta a tierra en el área del decantador.
- Sistema de apantallamiento en el área del decantador.
- Iluminación externa en el área del decantador.
- Bancos de ductos de baja tensión.
- Tendido de cable de fuerza para decantador.
- Conexión de cable de fuerza para decantador.

#### Obras mecánicas:

- Construcción de tubería 5"\*150 de conexión entre la salida de almacenamiento de lodos (aguas aceitosas/*cash tank*) y el decantador (aprox. 120m).
- Construcción de tubería 6"\*150 de conexión entre la salida de agua del decantador al tratamiento de agua (aprox. 120m).
- Construcción de tubería de 12" con brida rectangular de 590mm x 310mm en la salida de los lodos secos del decantador (aprox. 10 m).
- Línea de inyección de química (polímeros) de 1 ½", brida en acero inoxidable Slip On 150lbs.
- Tubería para agua de lavado de 1 ½" \*150 acero inoxidable (60m).

#### Obras de instrumentación:

- Construcción de bancos de ductos de control y comunicación (aprox. 100mts cuatro tubos 2").
- Tendido de cables de comunicación (aprox. 150m).
- Tendido de cables de control (aprox. 160m) PLC a DCS.
- Actualización despliegues SCADA de proceso.
- Pruebas de lazo de nuevas señales.

Los costos asociados a las obras anteriormente descritas son los siguientes:

Tabla 13. Costos de inversión en obras requeridas para el proyecto de decantación centrífuga.

Costo de obras	
Especialidad	Costo
Mecánica	COP\$ 80 440 000
Civil	COP\$ 134 800 000
Electricidad	COP\$ 163 300 000
Instrumentación	COP\$ 40 638 400
<b>Administración (10 %)</b>	<b>COP\$ 41 917 840</b>
<b>Imprevistos (5 %)</b>	<b>COP\$ 20 958 920</b>
<b>Utilidad (12 %)</b>	<b>COP\$ 50 301 408</b>
<b>Total antes de IVA COP</b>	<b>COP\$ 532 356 568</b>
<b>Total antes de IVA USD</b>	<b>USD 140 094</b>

Con respecto a los costos de operación OPEX se tuvieron en cuenta los siguientes recursos y requerimientos:

- Costos asociados al mantenimiento del decantador centrífugo.
- Costos asociados a la operación y seguimiento del decantador centrífugo.
- Costos asociados al consumo de energía eléctrica del decantador centrífugo.
- Costos asociados al polímero que se debe añadir al decantador centrífugo para garantizar la correcta separación y sedimentación de sólidos.

Tabla 14. Costos anuales de operación asociados al mantenimiento del equipo de decantación centrífuga (incluye mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, repuestos y consumibles).

<b>Mantenimiento</b>	
<b>Equipo</b>	<b>Costo año</b>
Decantador	COP \$ 100 000 000

Tabla 15. Costos anuales de operación asociados a la operación del equipo de decantación centrífuga (incluye dos operadores para garantizar el correcto funcionamiento de este equipo).

<b>Equipo</b>	<b>Operación</b>	
	<b>Costo por mes</b>	<b>Costo por año</b>
Decantador (dos operadores)	COP\$ 11 200 000	COP\$ 134 400 000

Tabla 16. Costos anuales de operación asociados al consumo de energía eléctrica del equipo de decantación centrífuga.

<b>Energía día (kWh)</b>	<b>Energía mes</b>	<b>Costo COP kWh</b>	<b>Costo Mes kWh</b>	<b>Costo Año kWh</b>
1526,4	45793	COP\$ 380,00	COP\$ 17 401 208	COP\$ 417 628 987

Tabla 17. Costos anuales de operación asociados al consumo de polímero para el proceso de decantación centrífuga.

<b>Dosis de polímero (kg)</b>	<b>Dosis mensual de polímero (kg)</b>	<b>Costo de polímero x Kg</b>	<b>Costo anual de polímero</b>
8	240	COP\$ 50 000,00	COP\$ 144 000 000

De acuerdo con lo anterior se estimaron los siguientes costos de operación anual:

Tabla 18. Costos totales anuales de operación del proyecto de decantación centrífuga.

<b>OPEX Anual Decantador</b>	<b>USD 209 481</b>
------------------------------	--------------------

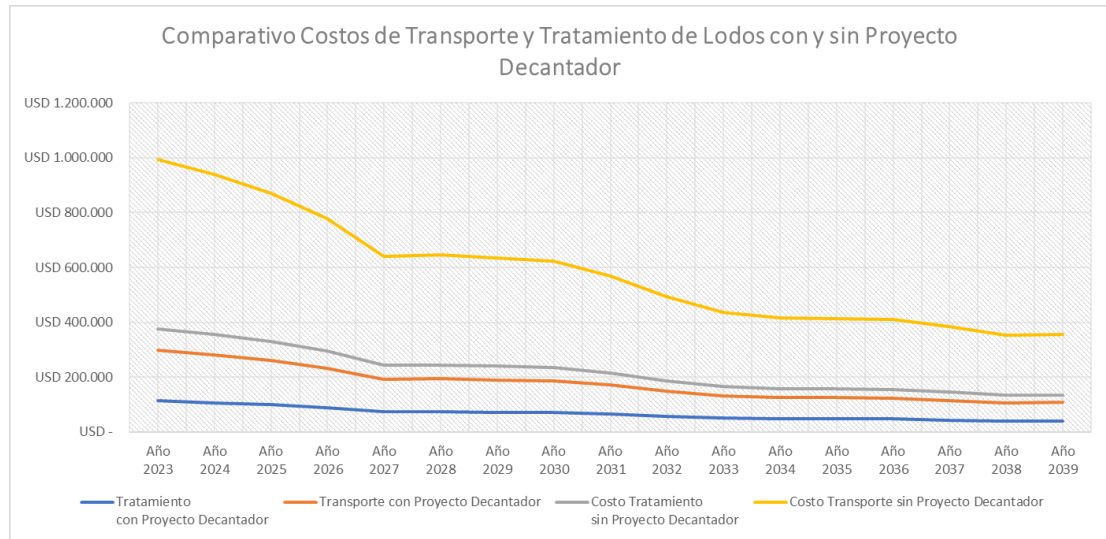
Mediante la implementación del decantador centrífugo se espera reducir un 70 % el volumen de lodos que se retiran para transporte y disposición (agua recuperada se retorna a tratamiento en plantas de agua), de tal forma solo se tendrían que mantener los costos sobre el 30 % restante (esperado completamente en fase sólida). Esta consideración parte de las características técnicas del equipo, que garantiza una recuperación del 92 al 97 % de los sólidos del lodo, además que la caracterización de estos que se tienen actualmente en el laboratorio de la compañía indicaron una composición de más de un 90 % de agua en los lodos.

Partiendo de esa reducción se estimaron los siguientes costos proyectados con y sin implementación (relación únicamente en ítems de transporte y tratamiento):

Tabla 19. Costos proyectados de transporte y tratamiento de lodos con y sin proyecto de decantación centrífuga.

Año	Tratamiento con Proyecto Decantador	Transporte con Proyecto Decantador	Costo Tratamiento sin Proyecto Decantador	Costo Transporte sin Proyecto Decantador
Año 2023	USD 112.822	USD 298.093	USD 376.073	USD 993.642
Año 2024	USD 106.703	USD 281.925	USD 355.675	USD 939.749
Año 2025	USD 98.648	USD 260.644	USD 328.827	USD 868.814
Año 2026	USD 88.334	USD 233.392	USD 294.446	USD 777.973
Año 2027	USD 72.680	USD 192.032	USD 242.266	USD 640.106
Año 2028	USD 73.345	USD 193.789	USD 244.483	USD 645.962
Año 2029	USD 71.888	USD 189.938	USD 239.626	USD 633.128
Año 2030	USD 70.698	USD 186.795	USD 235.660	USD 622.651
Año 2031	USD 64.601	USD 170.685	USD 215.335	USD 568.950
Año 2032	USD 56.199	USD 148.487	USD 187.330	USD 494.955
Año 2033	USD 49.582	USD 131.005	USD 165.275	USD 436.684

Tabla 20. Curva estimada de costos asociados al transporte y tratamiento de lodos del campo Tigana de los años 2022-2039 en escenarios con y sin proyecto de decantación centrífuga.



Teniendo en cuenta esta relación de costos con y sin proyecto de decantación centrífuga, se procedió a analizar el escenario de ahorro real de la compañía basados en las siguientes premisas:

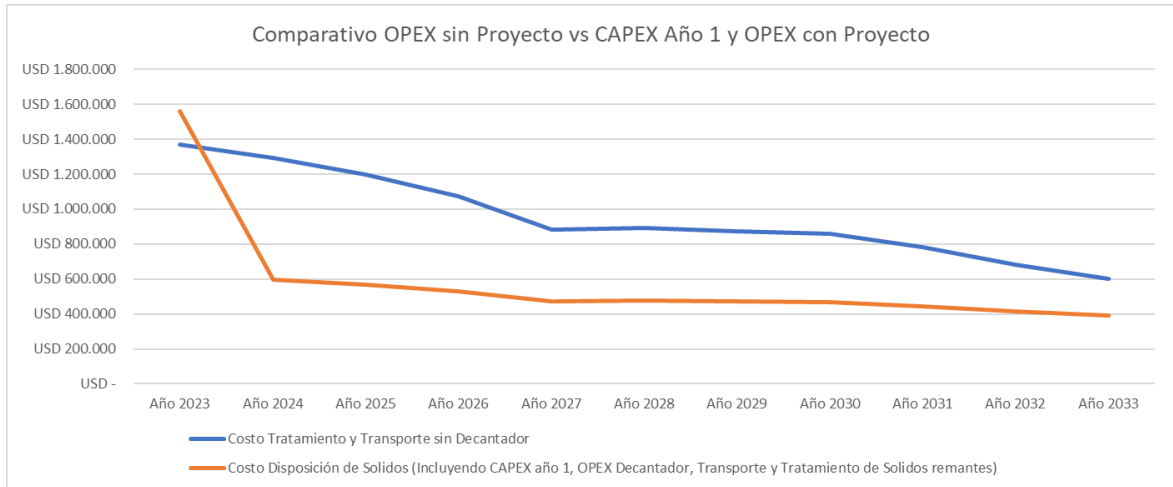
- Inicio de la implementación (año 2023 de acuerdo con plan de inversión de la compañía).
- Porcentaje esperado de agua que se recuperará de los lodos para reintegración a plantas de agua del 70 %.
- Porcentaje esperado de sólidos que se transportarían y tratarían del 30 % del valor estimado en las proyecciones.
- TRM Dólar \$3800.
- TRM Euro \$4180.
- En el escenario del año n. ° 1 se aplica en los costos el CAPEX del sistema de decantación centrífuga, el OPEX del sistema de decantación centrífuga y el OPEX del transporte y tratamiento de lodos secos.

- Para los demás años solo se tiene en cuenta los costos asociados al OPEX del sistema de decantación centrífuga y el OPEX del transporte y tratamiento de lodos secos.
- Los costos de transporte y tratamiento están directamente relacionados con las estimaciones de cantidades de lodos mencionados en el capítulo III, sección 3.2.

Tabla 21. Comparación ahorro real de costos asociados a la implementación del proyecto de decantación centrífuga.

<b>Año</b>	<b>Costo Tratamiento y Transporte sin Decantador</b>	<b>Costo Disposición de Sólidos (Incluyendo CAPEX año 1, OPEX Decantador, Transporte y Tratamiento de Sólidos remantes)</b>	<b>Ahorro Real</b>
Año 2023	USD 1.369.715	USD 1.562.617	-USD 192.902
Año 2024	USD 1.295.425	USD 598.109	USD 697.316
Año 2025	USD 1.197.641	USD 568.774	USD 628.867
Año 2026	USD 1.072.418	USD 531.207	USD 541.212
Año 2027	USD 882.372	USD 474.193	USD 408.179
Año 2028	USD 890.445	USD 476.615	USD 413.830
Año 2029	USD 872.754	USD 471.307	USD 401.446
Año 2030	USD 858.312	USD 466.975	USD 391.337
Año 2031	USD 784.285	USD 444.767	USD 339.518
Año 2032	USD 682.285	USD 414.167	USD 268.118
Año 2033	USD 601.959	USD 390.069	USD 211.890
			<b>USD 4.108.812</b>

Figura 7. Curva de comparación de costos (ahorro real) escenario con y sin proyecto de decantación centrífuga.



De acuerdo con el análisis realizado se pudo observar que la inversión del proyecto se pagaría un año y medio después de la implementación del equipo. En el primer año se evidenció que los costos CAPEX+OPEX de este proyecto son superiores a los costos estimados actuales de OPEX.

En promedio se tendría un ahorro anual de USD 374 000, lo que representaría para el escenario del presente estudio (2023-2033) un ahorro aproximado de USD 4 108 812, que es un valor significativo para los intereses de la compañía y que, además, pueden invertirse en otras iniciativas de optimización.

Adicionalmente la reducción de transporte de estos lodos tiene un impacto significativo sobre la huella de carbono de la compañía cada vez que se disminuye la cantidad de viajes de vehículos de combustión interna para retirar los lodos remanentes del proceso.

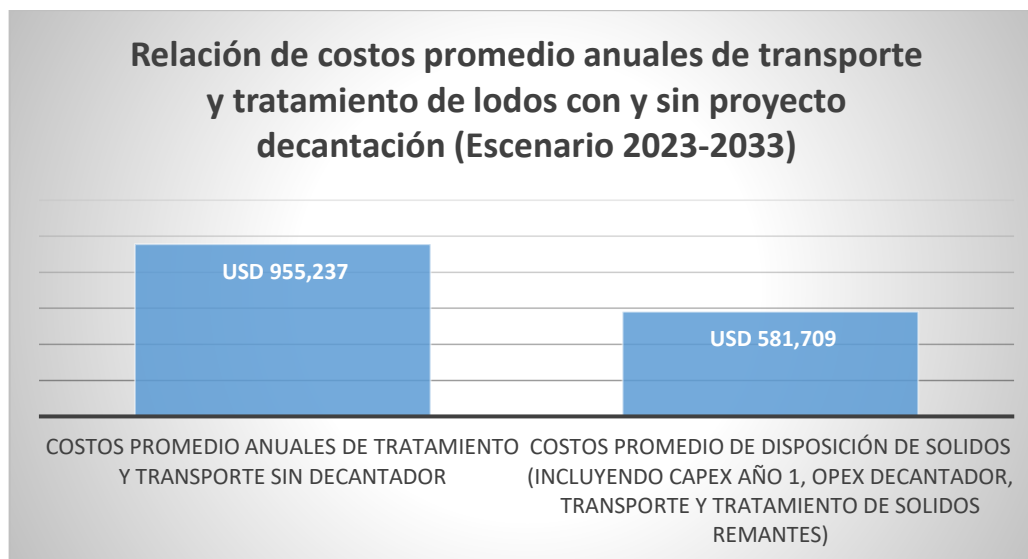
## 8 RESULTADOS

Dentro del desarrollo de cada una de las etapas de la investigación se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se realizó una revisión del estado del arte referente a los diferentes tipos de tecnología que se utilizan en el sector de hidrocarburos para el manejo de lodos obtenidos del proceso de producción de petróleo. Con esto se logró identificar que la tecnología de decantación centrífuga es la mejor opción, teniendo en cuenta que es un equipo que puede operar de forma automatizada y eficiente con un requerimiento bajo de operación, no necesita un espacio demasiado amplio para su instalación, se destaca su flexibilidad y adaptación para trabajar con distintos caudales, puede trabajar como proceso continuo, captar partículas de tamaños de hasta cinco micrones, cuenta con un diseño hermético para evitar la dispersión de malos olores, humos o gases, es de fácil y rápida instalación y, además, su requerimiento de paradas por mantenimiento son mínimas.
- Se obtuvo como resultado de la revisión de los pronósticos de yacimientos del campo las cantidades esperadas de aguas aceitosas proyectadas hasta el año 2033, con lo que se estimaron los costos desde el año 2022 hasta el año 2033 de los servicios de tratamiento y transporte, que son fundamentales para la evaluación de costos de los escenarios con y sin la implementación del proyecto de decantación centrífuga.
- Con la implementación del proyecto de decantación centrífuga se espera reducir los costos de transporte y tratamiento hasta un 39 %, teniendo presente que el decantador centrífugo cuenta con la capacidad de recuperar hasta un rango del 70 al 90 % del porcentaje de agua de los lodos remanentes del proceso de producción de crudo.



Figura 8. Relación de costos promedio anuales esperada para el transporte y tratamiento de lodos con y sin proyecto de decantación.



- Teniendo en cuenta que bajo el escenario de implementación del proyecto se tendrían resultados positivos en términos económicos, con una reducción en los próximos diez años de aproximadamente 4,1 millones de dólares, la compañía ha demostrado interés en el desarrollo de este, dentro del marco de los proyectos de innovación corporativos como el primer piloto de este tipo de solución y estará sujeta a los resultados obtenidos para la posterior implementación de esta solución en otras facilidades de producción de la compañía.
- De acuerdo con el ahorro que se tendría con la implementación de esta tecnología, se espera que la inversión realizada en este proyecto se pague en un período de un año y medio.
- En el presente estudio no se cuantifican los beneficios ambientales asociados a la implementación de la tecnología de decantación centrífuga; sin embargo, de forma cualitativa se pudo observar un impacto positivo significativo en la recuperación de agua de los lodos actuales y su reintegración en las corrientes de las plantas de tratamiento de agua. Adicionalmente, al reducir la cantidad de lodos que se deben transportar y

tratar en planta externa, se reduce la cantidad de vehículos que trasladan estos fluidos, lo que representa una reducción en la huella de carbono de este proceso (disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>equiv).

- Los resultados de la investigación están alineados con las políticas de economía circular mediante la gestión de residuos industriales, por eso se tiene gran relevancia el entendimiento y desarrollo de este tipo de iniciativas.

## 9 CONCLUSIONES

- Mediante la descripción de los diferentes procesos en la facilidad se identificó en qué parte del proceso se generan los residuos de las aguas industriales del campo.
- Con la información recopilada se determinó la cantidad de volumen de aguas aceitosas enviadas a planta externa en los últimos años 2019-2021 y el tratamiento que recibe este fluido.
- Teniendo en cuenta los diferentes tipos de tecnologías que se utilizan en el sector de hidrocarburos para el tratamiento de los lodos de producción, se concluyó que la solución más adecuada en términos de eficiencia, espacio, bajo requerimiento de mantenimiento, automatización, operación continua y bajo requerimiento de seguimiento operacional es la tecnología de decantación centrífuga.
- Se precisó la conveniencia del uso de la tecnología de decantación centrífuga para el campo de interés del presente estudio, teniendo en presente que de acuerdo con los pronósticos de producción de los yacimientos, el porcentaje de agua a tratar se encuentra dentro del rango operativo del equipo propuesto y que la instalación actual de la facilidad requiere adecuaciones para implementar el equipo propuesto en el desarrollo del piloto de tratamiento de lodos de producción.
- Para la estimación de costos asociados a la ingeniería básica y de detalle requerida para la instalación del equipo de decantación centrífuga a la planta de producción, se obtuvo un valor aproximado de USD 85 285. En cuanto a la estimación de costos asociados a las obras mecánicas, civiles, eléctricas y de instrumentación requeridas para la instalación del equipo de decantación centrífuga a la planta de producción, se obtuvo un valor aproximado de USD 140 094 en mano de obra y USD 171 053 en materiales. Por ende, el costo proyectado en equipos es de USD 545 789.

- Con el objetivo de determinar el ahorro real que tendría la compañía se evaluó la diferencia de costos del escenario la implementación del proyecto propuesto en el presente correo vs el escenario de trabajo de seguir con el esquema actual de transporte y tratamiento de lodos, para esto, se identificaron los costos de inversión del proyecto CAPEX mencionado anteriormente y los costos de operación OPEX asociados a la energía que consumirá el equipo, a los polímeros que se requieren para la mejora de la sedimentación y a los costos de mantenimiento y operación de este equipo.
- Con la implementación de este estudio se espera recuperar mínimo un 70 % del agua presente en la composición de los residuos de las aguas industriales, con lo que el 30 % restante serán los lodos deshidratados que se enviarán a planta externa para tratamiento y disposición.
- Con la puesta en práctica del estudio se espera tener una reducción de aproximadamente el 39 % de los costos actuales del transporte y tratamiento de lodos.
- Con la información de pronósticos de producción de agua se realizaron predicciones del costo para los siguientes 10 años en cuanto a tratamiento y transporte de las aguas aceitosas sin ninguna mejora en el proceso, y se comparan con los costos asociados a la implementación del equipo decantador centrífugo, obteniendo como resultado un retorno de la inversión en un periodo de entre 1,5 y 2 años, y generando un ahorro para la compañía de aproximadamente 4,1 millones de dólares.
- Se observó un impacto positivo significativo en los aspectos ambientales asociados a la implementación del proyecto de decantación centrífuga, cada vez que la reducción del requerimiento de transporte de lodos es directamente proporcional a la emisión de CO<sub>2</sub>equiv (reducción huella de carbono), adicionalmente se espera una recuperación de hasta el 70 % del agua presente en los lodos, la cual se dispondrá para retornar al proceso en las plantas de tratamiento de agua de producción.

- De acuerdo con lo observado en el análisis y desarrollo del presente trabajo de grado se presentó este planteamiento al comité de innovación a la compañía, con lo que se obtuvo una respuesta positiva para esta iniciativa, la cual pasó a etapa de viabilidad para revisión financiera y su posterior ejecución como primer piloto de este tipo de tecnología en la compañía.

## 10 REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH. (2019). *Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH*. La ANH: Misión y Visión : <https://www.anh.gov.co/la-anh/Paginas/Mision-y-Vision.aspx>
- Alfalaval. (s.f.). *Home*. Obtenido de <https://www.alfalaval.com.co/>
- Asociación Colombiana del Petróleo [ACP]. (2016). *Informe de Desempeño Ambiental 2015*. ACP.
- Castellanos-Rozo, J., Merchán, N. A., Galvis, J., & Manjarres, E. H. (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Gestión y ambiente*.
- Ecopetrol S.A. (2014). *El petróleo y su mundo*. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/wcm/connect/aafcca72-30ac-4320-9294-177abfcde944/el-petroleo-y-su-mundo-comprimido.pdf?MOD=AJPERES&attachment=false&id=1588040270272>
- Jaramillo, O. (2007). *Intercambiadores de calor*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lenntech. (s.f.). *Centrifugación y Centrifugas*. <https://www.lenntech.es/biblioteca/centrifugation.htm>
- Ministerio de Energía. (2018). *Agencia nacional de hidrocarburos*. La Cadena del Sector Hidrocarburos: <https://www.anh.gov.co/porta regionalizacion/Paginas/LA-CADENA-DEL-SECTOR-HIDROCARBUROS.aspx>
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté S.A.
- Rigola, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales : aguas de proceso y residuales*. Marcombo.

Universidad de Barcelona. (2021). *Fundamentos de la técnica*. Obtenido de [ub.edu/oblq/oblq%20castellano/centrifugacio\\_fonament.html](http://ub.edu/oblq/oblq%20castellano/centrifugacio_fonament.html)

## 11 ANEXOS

### Anexo 1. Autorización verbal: grabación.

<b>Autorización verbal: grabación</b>
1. Se hace la descripción resumida de la investigación (se encuentra en el ítem N. ° 1 de la pestaña Bitácora Campo).
2. Gracias por atender la llamada/reunión/encuentro para llevar a cabo una entrevista/charla con el fin de consolidar información con base a tu experiencia para el desarrollo de este trabajo de grado.
3. Se realiza la siguiente pregunta: ¿es posible y me autorizas usar la información resultado de esta entrevista/charla para el desarrollo del trabajo de investigación y soporte de la información?
4. Pregunta anterior con solo una respuesta: sí autorizo, sin problema o no autorizo.
5. La información obtenida por medio de estos encuentros, ya sea entrevista o pase de información, es solo para uso académico para el desarrollo del trabajo de grado en la Universidad EAFIT y los datos que se informen son confidenciales, es decir, no serán divulgados por ningún medio.

### Anexo 2. Autorización firmada: soporte digital.

<b>Autorización firmada: (soporte digital)</b>
1. Se hace la descripción resumida de la investigación (se encuentra en el ítem N. ° 1 de la pestaña Bitácora Campo)
2. Gracias por atender la llamada/reunión/encuentro para llevar a cabo una entrevista/charla con el fin de consolidar información con base a tu experiencia para el desarrollo de este trabajo de grado.
3. Se realiza la siguiente pregunta: ¿es posible y me autorizas usar la información resultado de esta entrevista/charla para el desarrollo del trabajo de investigación y soporte de la información?
4. Pregunta anterior con solo una respuesta: sí autorizo, sin problema o no autorizo.
5. La información obtenida por medio de estos encuentros, ya sea entrevista o pase de información, es solo para uso académico para el desarrollo del trabajo de grado en la Universidad EAFIT y los datos que se informen son confidenciales, es decir, no serán divulgados por ningún medio.

Anexo 3. Formato entrevista.

**ENTREVISTA**

<b>Estudiante:</b> Jenifer Lorena Vargas Peña - Maestría en Gerencia Integral por Procesos
<b>Fecha:</b>
<b>Nombre entrevistado:</b>
<b>Profesión:</b>
<b>Experiencia:</b>
<b>Duración entrevista:</b>