

**Alternativas de Reúso de Aguas Industriales de la PTAR de la Gerencia Refinería
Barrancabermeja**

Yeferson Ardila Jiménez

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Ingeniería Química

Director

Humberto Escalante Hernández

PhD en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A mi madre, Eudoxia, quien ha estado atenta a todas las necesidades durante todo el proceso en la universidad, de apoyar a mi esposa y de cuidar a mis hijos.

A tres personitas muy importantes en mi vida, mi esposa Carmen Cecilia y mis hijos Jefferson Andres y Jose Daniel, Carmen Cecilia que ha entendido y apoyado durante todo el tiempo que estuve fuera de casa dedicado a las clases y tutorías, y ella asumiendo muchas veces los dos roles de nuestra familia, Jefferson Andres y Jose Daniel que me prestaron tiempo que les pertenecía.

A mis hermanos Anderson y Luis Rogelio los cuales en algún momento me dieron consejos durante el desarrollo de la carrera.

Recuerden que este logro es de todos.

Agradecimientos

Al Ingeniero Humberto Escalante quien fue un apoyo importante durante el desarrollo de este trabajo de aplicación.

A los Ingenieros Dionisio y Crisóstomo por darme todas esas recomendaciones que fueron importantes para culminar en satisfacción este trabajo.

Al Ingeniero Nicolas Gonzalez Galvis por esta siempre recordando y apoyando para culminar en totalidad este objetivo.

A los docentes de la Maestría que lograron poner en mi mente nuevas formas de pensar y analizar.

A mis compañeros de la maestría que estuvieron siempre brindando apoyo en todo el proceso de la carrera.

A Clariant (Colombia) S.A. que me brindo información necesaria para el desarrollo de este trabajo de aplicación.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Planteamiento del Problema.....	17
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo General	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
3. Marco referencial	22
3.1 Aguas Agrias de la GRB	22
3.2 Plantas Despojadoras de Aguas Agrias.....	23
3.3 Antecedentes y estado actual de las Aguas Agrias de la GRB	24
3.4 Características de Agua Agria de la GRB.....	28
3.5 Aguas Aceitosas de la GRB	29
3.5.1 Descripción del proceso del separador API.	31
3.6 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR-GRB	32
3.6.1 PTAR-GRB Operación de Homogenización.	33
3.6.2. PTAR – GRB Operación de Neutralización.	34
3.6.3. PTAR-GRB Operación de Coagulación.	34
3.6.4. PTAR-GRB Operación de Floculación.....	35
3.6.5. PTAR-GRB Operación de Flotación.	35

3.6.6. PTAR-GRB Operación de Biodegradación de Fenoles.	36
3.6.7. PTAR-GRB Operación de Estabilización.	37
3.6.8. Evaluación de Desempeño de la PTAR-GRB.	37
3.6.9. Índice de Calidad del Efluente (ICE) de la PTAR-GRB.	37
3.6.10. Evaluación de Carga de la PTAR-GRB.	40
3.7 Reúso de las Aguas Residuales Industriales de Refinerías a Nivel Mundial.	42
3.7.1. Petroleras en Brasil.	42
3.7.2. Petrolera Mexicana	43
3.7.3. Petrolera en Estados Unidos.	43
3.7.4. Petrolera en China.	44
3.7.5. Petrolera en Australia.	44
3.5.6. Petroleras Rusas	45
3.7.7. Refinerías Canadienses.	47
3.8 Tecnologías para Reutilización de Aguas Residuales en Petroleras.	48
4. Propuesta de Alternativas para el Reúso de Aguas en la GRB.	55
4.1 Reúso de Aguas Agrias en Desaladores.	56
4.1.1. Proceso de Desalado de Crudo.	58
4.1.2. Variables de Operación en el proceso de desalado de crudo	59
4.1.3. Reúso De Agua Agria En Los Desaladores.	62
4.1.4. Agua de Lavado en los Desaladores de la GRB	63
4.1.5. Propuesta Del Diseño Para El reúso De Las Aguas Agrias A Desaladores.	64
4.1.6. Propuesta de distribución de aguas agrias a los desaladores y sistema de control.	68
4.1.7. Beneficios del Reúso de Agua en los Desaladores	70

4.1.8. Impacto Ambiental del reúso de Aguas Agrias en Desaladores	71
4.1.9. Impacto Económico del reúso de Aguas Agrias en los desaladores	71
4.1.10 Potenciales Problemas del Reúso de Agua Agria en los desaladores	73
4.1.11. Conclusiones	75
4.2 Reúso de Aguas Agrias para proceso de recobro.....	75
4.2.1. En Proyectos de Recobro en Pozos.....	77
4.2.2. Balance de Agua Proyectos Recobro Campos de la VRC	78
4.2.3. Calidad de Agua Reinyección.....	82
4.2.4. Resultados Análisis del ICP	83
4.2.5. Campos Potenciales de Reúso de Agua de GRB	88
4.2.6. Distancia de GRB a Campos de VRC.....	88
4.2.7. Conclusiones	89
5. Estrategias de mejoramiento de afluente y efluente de PTAR de la GRB.....	90
5.1. Drenaje de la U-4050	91
5.2. Drenaje de la U-4090	93
5.3. Alternativa de Remoción de Fenol.....	95
5.3.1. Tecnologías para la Remoción de Fenoles Evaluadas	99
5.3.2. Conclusiones	99
6. Resultado del Diseño para las Alternativas del Sistema de Reúso.	100
7. Conclusiones	101
8. Recomendaciones.....	102
Referencias Bibliográficas	104
Apéndices.....	109

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Diagrama de procesos típico para tratamiento Aguas Agrias.	23
<i>Figura 2.</i> Descripción global aguas agrias en la GRB.	26
<i>Figura 3.</i> Esquema actual de operación Tratamiento de Aguas Agrias GRB.	27
<i>Figura 4.</i> Diagrama general de un separador API.	32
<i>Figura 5.</i> Etapas de la PTAR-GRB. RWD.	33
<i>Figura 6.</i> Operación actual PTAR.	42
<i>Figura 7.</i> Propuesta de nueva estructura para reúso de aguas residuales de la GRB.	56
<i>Figura 8.</i> Esquema general Desalador de Crudos.	59
<i>Figura 9.</i> Análisis hidráulico de la línea y la red de suministro de aguas agrias a los desaladores	65
<i>Figura 10.</i> Red de distribución de aguas agrias a desaladores.	69
<i>Figura 11.</i> Cronograma estimado para los proyectos de recobro en campos de la VRC.	77
<i>Figura 12.</i> Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo La Cira Infantas.	79
<i>Figura 13.</i> Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Provincia.	79
<i>Figura 14.</i> Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Tisquirama.	80
<i>Figura 15.</i> Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Casabe.	80
<i>Figura 16.</i> Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Llanito.	81
<i>Figura 17.</i> Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Galán.	81

Figura 18. Diagrama del proceso de tratamiento de sodas gastadas nafténicas y Cresílicas. 94

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Caracterización de aguas agrias de la T-2590</i>	28
Tabla 2. <i>Pesos a cada variable del modelo ICE</i>	38
Tabla 3. <i>Histórico de la evaluación del efluente en PTAR mediante ICE</i>	39
Tabla 4. <i>Cumplimiento de I.C.E. por parámetro.</i>	39
Tabla 5. <i>Histórico año 2017 de la Carga que maneja la PTAR-GRB.</i>	40
Tabla 6. <i>Costos Anuales Tratamiento de Aguas.</i>	41
Tabla 7. <i>Condiciones Agua de lavado a desaladores</i>	60
Tabla 8. <i>Resultado de la simulación (Presiones)</i>	65
Tabla 9. <i>Referencia bomba de carga de aguas agrias a desaladores</i>	66
Tabla 10. <i>Características tuberías red aguas agrias despojadas a Topping y PTAR.</i>	70
Tabla 11. <i>Estimado de costos para la línea de aguas agrias hasta la red de suministro a desaladores</i>	72
Tabla 12. <i>Ahorro anual por consumo de agua agria</i>	72
Tabla 13. <i>Balance de agua GRB.</i>	78
Tabla 14. <i>Parámetros de calidad para agua de inyección a pozo.</i>	82
Tabla 15. <i>Análisis fisicoquímico de las muestras utilizadas en la simulación.</i>	84
Tabla 16. <i>Tendencia de formación de escamas de las aguas utilizadas en las simulaciones</i>	85
Tabla 17. <i>Listado de compatibilidades simuladas realizadas</i>	87

Tabla 18. <i>Distancia estimada desde la GRB a campos de producción de la VRC.</i>	89
Tabla 19. <i>Características sodas gastadas en tanque de carga</i>	92
Tabla 20. <i>Características de soda oxidada en tanque producto</i>	93
Tabla 21. <i>Concentración de fenol en la PTAR-GRB.</i>	96
Tabla 22. <i>Principales tecnologías para el tratamiento del fenol en aguas residuales.</i>	98

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Marco Jurídico	109
Apéndice B. Parámetros Fisicoquímicos en los Efluentes de las Unidades Topping (Proyecto Reúso de Aguas W3521)	114

Resumen

TITULO: ALTERNATIVAS DE REUSO DE AGUAS INDUSTRIALES DE LA PTAR DE LA GERENCIA REFINERIA BARRANCABERMEJA*

AUTOR: YEFERSON ARDILA JIMENEZ**

PALABRAS CLAVES: Reúso de Aguas Industriales, Aguas residuales industriales, Refinerías de Petróleo, Fenol, Aguas Agrias.

CONTENIDO:

La planta de Tratamiento de aguas residuales de la Gerencia Refinería Barrancabermeja de ECOPETROL S.A. es la encargada de realizar el tratamiento de todas las aguas residuales entre las cuales tenemos aguas agrias, aceitosas, acidas. Con el objetivo de poder analizar las mejores alternativas para el reúso de las aguas residuales de acuerdo a sus diferentes fuentes, ya que vienen con tratamiento y pueden ser reutilizadas para otros procesos sin necesidad de ser tratadas nuevamente.

Por lo cual a través de este trabajo de aplicación se realizó una investigación de las mejores alternativas necesarias para el reúso de las aguas residuales en los diferentes procesos los cuales disminuye el vertimiento y realizando tratamiento terciario logrando cumplir con los parámetros que son regidos bajo la resolución 631 de 15 de marzo de 2015. La planta de Tratamiento de aguas residuales de la Gerencia Refinería Barrancabermeja de ECOPETROL S.A. es la encargada de realizar el tratamiento de todas las aguas residuales entre las cuales tenemos aguas agrias, aceitosas, acidas. Con el objetivo de poder analizar las mejores alternativas para el reúso de las aguas residuales de acuerdo a sus diferentes fuentes, ya que vienen con tratamiento y pueden ser reutilizadas para otros procesos sin necesidad de ser tratadas nuevamente.

* Trabajo de Maestría

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química Director: M. Sc. Humberto Escalante

Abstract

TITLE: REUSE ALTERNATIVES FOR INDUSTRIAL WASTEWATER FROM WWTP OF BARRANCABERMEJA REFINERY MANAGEMENT*

AUTHOR: YEFERSON ARDILA JIMENEZ**

KEY WORDS: Industrial wastewater reuse, Industrial wastewater, Petroleum refinery, Phenol, Sour waters.

CONTENIDO:

The wastewater treatment plant (WWTP) from Barrancabermeja refinery management of ECOPETROL S.A. realize the treatment of the all wastewaters including sour waters, oil waters and acid waters. The aim of this work is the analysis of different alternatives to improve the wastewater reuse according to different sources. Due it has different treatments, it could be used to other process without another management. In this work, a research was made according the application of better alternatives necessities to the wastewater reuse in the different process.

The final purpose is decrease the shedding using tertiary treatments fulfilling the parameters according the 631 resolution of March 15 of 2015. The final purpose is decrease the shedding using tertiary treatments fulfilling the parameters according the 631 resolution of March 15 of 2015. The wastewater treatment plant (WWTP) from Barrancabermeja refinery management of ECOPETROL S.A. realize the treatment of the all wastewaters including sour waters, oil waters and acid waters. The aim of this work is the analysis of different alternatives to improve the wastewater reuse according to different sources. Due it has different treatments, it could be used to other process without another management. In this work, a research was made according the application of better alternatives necessities to the wastewater reuse in the different process.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química Director: M. Sc. Humberto Escalante

Introducción

La refinería colombiana de Barrancabermeja es la más importante y grande del país, con una capacidad instalada de procesamiento de 250.000 barriles diarios de crudo. La puesta en operación de la refinería se remonta a los años 20, época en la cual con capital privado americano inicia el proceso de la refinación de petróleo en Colombia. Este proceso ha tenido importantes avances y cambios a lo largo de 95 años de historia, Sin embargo, actualmente la planta física de la refinería opera en algunos de sus procesos con tecnologías y equipos de hace 40 o 50 años. Estas unidades de operación no han sido modificadas o actualizadas de manera sustancial dentro de un marco de sostenibilidad integral. El mejoramiento o foco estratégico de inversión en el pasado se orientaba hacia el incremento en la capacidad instalada de las plantas. La dimensión ambiental y social comenzó a promulgarse a partir de los años 90 con el protocolo de Kioto. Esta medida ha incidido en mayor exigencia mediante una legislación ambiental más robusta y por supuesto alineada dentro de la tendencia macro a nivel mundial.

La Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB), en sus procesos industriales, utiliza dos barriles de agua por barril de crudo. Una parte del agua utilizada se evapora en los procesos, dando lugar a 120.000 barriles/día que corresponden a aguas residuales industriales y químicas. Actualmente la GRB ha conseguido separar y reutilizar las aguas industriales (aguas de separadores API y aguas de los drenajes de tanques del Departamento de Materias Primas). Por otra parte, los procesos petroquímicos de la refinería generan aguas químicas (agrias, causticas, fenólicas y ácidas) con elevadas concentraciones de contaminantes.

Las actividades industriales de la refinería son básicas para suplir la mayor parte de la demanda energética mundial y por consiguiente la generación de aguas residuales. Es necesario tomar medidas de control, de los procesos industriales, para reducir el vertimiento de estas corrientes a los cuerpos de agua y evitar niveles que puedan afectar la salud y la vida acuática. Por lo cual se realiza un proceso físico-químico en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Gerencia de Refinería de Barrancabermeja (PTAR-GRB).

La PTAR-GRB no es ajena a las exigencias de requerimientos para los vertimientos líquidos, de acuerdo con la legislación ambiental colombiana. Por lo anterior para evaluar la efectividad de gestión, la PTAR ha desarrollado un Índice de Calidad del Efluente (ICE).

Sin embargo, en los últimos 10 años, la PTAR sólo ha conseguido un cumplimiento del 30% del ICE, con respecto al fenol, la DQO y los sólidos suspendidos totales (SST). Consciente de esta problemática, la refinería de Barrancabermeja planteó dentro de su marco de responsabilidad social empresarial en el año 2017 implementar un proyecto macro ambiental para reducir los vertimientos; con el objeto de lograr reutilizar el 100% de las aguas industriales en los procesos de ECOPETROL S.A.

1. Planteamiento del Problema

Las industrias petroleras del mundo utilizan un promedio de 0,8 barriles de agua por un barril de crudo. La GRB utiliza dos barriles de agua por barril de crudo. La captación de agua se realiza de la Ciénaga Miramar, Ciénaga San Silvestre y el río Magdalena. Una parte del agua residual

utilizada en los procesos se evapora en los intercambiadores de calor y torres enfriadoras, la fracción restante que corresponde a 120.000 barriles/día se vierte a los sistemas de aguas residuales de la refinería. De esta fracción vertida, se reutilizará en la primera fase entre 40.000 y 50.000 barriles/día en la unidad de servicios industriales balance (U-2900), en la fase 1 de la iniciativa de reúso de agua de la refinería. Esta iniciativa busca reutilizar 1500 galones/minuto de agua residual (Aguas de Procesos Industriales) (Ecopetrol S.A, 2016). Con el presente trabajo de aplicación se busca reutilizar los 2000 galones/minuto restante de aguas residuales (Aguas Químicas).

En la actualidad culminó el primer proyecto de reúso de aguas, el cual consistió en segregar y reutilizar las aguas de procesos industriales (Provenientes de los Separadores API del área Sur de Refinería, Drenajes de Tanques del Departamento de Materias Primas) de las aguas químicas (Aguas Agrias, Sodas y las aguas provenientes del área de Balance de la Refinería). La legislación ambiental por medio del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), exige a la GRB que sus vertimientos se encuentren dentro de los parámetros ambientales vigentes (Permisos de Vertimientos Resolución 204 y Resolución 1240/2010). La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja PTAR-GRB fue diseñada a comienzos de los años ochenta para manejar la carga de los residuos líquidos. En la actualidad la PTAR-GRB cuenta con tres procesos: tratamiento de aguas residuales, tratamiento de lodos y tratamiento biológico de fenoles de las aguas tratadas. La PTAR-GRB gestiona cinco tipos de aguas residuales: a) Aguas Aceitosas (drenajes de tanques de almacenamiento, hidrocarburos aromáticos, alifáticos, parafínicos y nafténicos, drenajes), b) Aguas Ácidas (lavados de resinas), c) Aguas Agrias (torres despojadoras de amoníaco y H_2S), d) Aguas Cáusticas (tratamiento con soda a las gasolinas, lavado de equipos y resinas) y e) Aguas Fenólicas (tratamiento bases parafínicas con fenol).

En el proyecto de reúso de estas aguas, la GRB ha implementado las siguientes alternativas:

- Segregación de sodas gastadas: Su finalidad es reducir el volumen generado y segregar la totalidad de las sodas gastadas hacia PTAR para su vertimiento controlado.
- Reúso de aguas agrias: Busca disminuir esta corriente reutilizándola como agua de inyección a los desaladores de crudo de la Refinería Barrancabermeja.
- Segregación de Aguas: Se realizó un proceso de segregación de aguas con el objetivo tener aguas aceitosas de aguas químicas con el objetivo de reutilizar aguas en los procesos de la GRB.
- Reúso de Aguas Aceitosas: Actualmente se realiza corrida para el reúso de las aguas aceitosas hacia los sistemas de sellos, torres enfriadoras y sistema de contra incendio de la GRB.

Por las situaciones de sequía, que se han vivido en los últimos años, se han afectado los niveles de los cuerpos de agua de captación de la refinería. La Corporación Autónoma de Santander (CAS) ha decretado disminuir la captación de agua, conllevando a una afectación en la operación normal de la refinería. En Colombia las aguas residuales del sector refino de la industria del petróleo se rigen por el artículo 11 - resolución 631 (MADS- 2015).

La estrategia de la GRB es ser eco eficiente en todos los sistemas ambientales, por lo cual se requiere de alternativas ingenieriles para mejorar la calidad del efluente de la PTAR para reusarlo en la GRB refinería o en los campos de producción. Reutilizando el efluente de vertimiento al río Magdalena se optimizará los costos por pago de la tasa retributiva por vertimiento. El reúso del agua forma parte integral de la estrategia de crecimiento de Ecopetrol y de su compromiso con la sostenibilidad (TICSA) (Ticsa, 2019). Por lo anterior, Ecopetrol S.A. ratifica su compromiso con una estricta sujeción al Código de Ética, la seguridad industrial y de procesos, el medio ambiente, la protección del agua y la política de prosperidad compartida en todas las regiones donde opera.

Con esto ECOPETROL S.A. busca prevenir y controlar la contaminación del ambiente, preservar los recursos naturales, y racionalizar cada vez más el uso del agua, ordenando su integración al entorno de sus centros de operación.

El alcance de este trabajo de aplicación es plantear alternativas para reutilizar las aguas químicas de la refinería con el fin de: i) disminuir la carga contaminante que puede ser vertida al río Magdalena y ii) reducir el pago de multas por vertimientos fuera de especificaciones, obteniéndose un ahorro económico.

Por lo anterior, el presente trabajo de aplicación busca realizar un análisis comparativo de las principales alternativas tecnológicas existentes para la reducción de contaminantes en aguas residuales y estudiar su aplicabilidad a los procesos industriales en la GRB, lo anterior, con el objeto que estas estrategias permitan la reutilización de las aguas residuales.

Para tal fin se han planteado los siguientes objetivos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Plantear alternativas de re para las aguas industriales de la Planta PTAR de la Gerencia Refinería Barrancabermeja.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico actual del estado de operación de la PTAR de la GRB.
- Revisar en la literatura las aplicaciones de reúso de las Aguas Residuales Industriales y analizar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.
- Plantear alternativas de reúso de las aguas industriales partir de la carga real disponible de la GRB.
- Realizar un diseño básico para las alternativas propuestas, a partir de la carga real disponible de la GRB.

3. Marco referencial

Los sistemas actuales de las aguas de la GRB están siendo de análisis profundo ya que debido a su gran variedad de procedencia se requiere de su caracterización por lo cual en nuestra refinería existen varios tipos de aguas.

3.1 Aguas Agrias de la GRB

En la industria de craqueo catalítico, el vapor de agua y el agua líquida son utilizados como vapor de despojo en el reactor de craqueo catalítico y como agua de lavado de los gases de cima de la torre fraccionadora. En estas operaciones el agua en forma de vapor y en fase líquida, arrastra consigo sustancias contaminantes generando las denominadas “aguas agrias”. Estas aguas deben pre-tratarse antes de ser llevadas a la PTAR.

Las aguas agrias contienen sulfuro de hidrógeno (H_2S) y nitrógeno amoniacal. Adicionalmente pueden contener compuestos fenólicos, cianuros, cloruros, mercaptanos e hidrocarburos. La concentración de estos compuestos en el agua agria, depende de la carga de hidrocarburo, de la operación y la eficiencia de los procesos de despojo que la generan. El agua agria despojada con concentraciones de $H_2S < 10$ ppm y concentraciones de $NH_3 < 50$ ppm, puede ser reusada en el proceso de desalado de crudo.

En la GRB se tratan en promedio 500 gpm de aguas agrias, y son generadas, en las unidades:

a) Ruptura catalítica: Cracking UOP 1, Cracking UOP 2, Orthoflow y Modelo IV, b) Plantas de

Hidrotratamiento de diésel y gasolina (U-4700; U-4750), c) Planta de Parafinas y d) Planta UNIBON.

3.2 Plantas Despojadoras de Aguas Agrias

Antes de enviar las aguas agrias a la PTAR - GRB, estas se someten a un pretratamiento para remover los compuestos azufrados y amoniacales. Las plantas de tratamiento de aguas agrias, generalmente presentan la configuración mostrada en la figura 1.

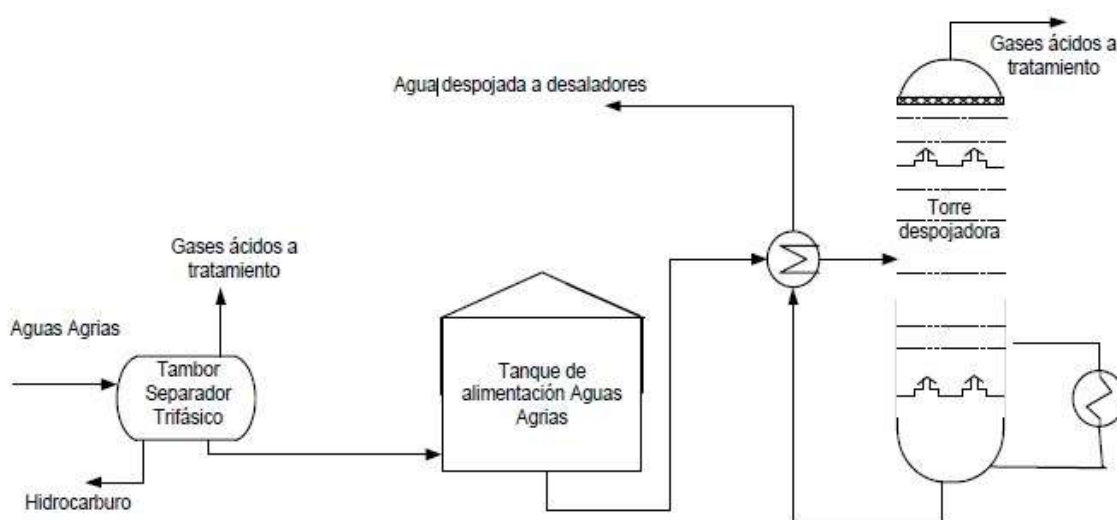


Figura 1. Diagrama de procesos típico para tratamiento Aguas Agrias.

Nota. Adaptado de: Ecopetrol S.A. Instituto Colombiano del Petróleo – ICP. (2017)

Conceptualización para el mejoramiento de la hidráulica del sistema de evacuación de aguas agrias despojadas desde la UOP I hacia la PTAR y TOPPING.

El agua agria proveniente de diferentes plantas de la refinería, ingresa a un tambor separador trifásico, en donde se separan hidrocarburos y gases ácidos. El objetivo en esta etapa, es minimizar

el contenido de hidrocarburo en la corriente de alimentación a las torres despojadoras (los hidrocarburos afectan negativamente la operación de las torres, causando ensuciamiento en los equipos y tuberías). Posteriormente, el agua agria es enviada a un tanque de almacenamiento para estabilizar la carga a las torres, en donde finalmente se remueven los compuestos azufrados y amoniacales, mediante el despojo con vapor de agua. El agua agria finalmente despojada puede ser reutilizada en los desaladores de crudo o enviada directamente a PTAR.

3.3 Antecedentes y estado actual de las Aguas Agrias de la GRB

La Planta de Tratamiento de Aguas Agrias U-2590 entró en operación en 1978, con capacidad de 303 gpm. En operación normal, todas las aguas ácidas generadas en la Refinería se enviaban a esta unidad para retirar compuestos azufrados y nitrógeno amoniacal. Posteriormente el agua despojada era enviada en su totalidad a la PTAR. En 2006 la Refinería integró dentro de su esquema de operación el reúso de las aguas agrias despojadas en la U-2590, como agua de lavado en los desaladores de crudos de las cinco unidades de destilación atmosféricas (Unidades de Topping).

El agua de lavado normalmente utilizada en los desaladores de estas unidades es agua clarificada. Las principales ventajas de remplazar el agua clarificada, en el proceso de desalado de crudo, por agua agria despojada son:

- Reducción de la cantidad de agua aceitosa enviada a la PTAR (correspondiente a la cantidad de agua clarificada que se reemplaza con agua agria).
- En el proceso de desalado los compuestos fenólicos presentes en el agua agria despojada son transferidos al crudo, disminuyendo entre un 70 y 80 % la concentración de fenoles en

la corriente que finalmente se envía a la PTAR. Esto reduce el aporte de fenoles del 30% hasta un 6% en el agua agria despojada.

En el año 2009 se realizó la actualización a la Planta de tratamiento de Aguas Agrias U-2590. En la Ingeniería detallada “Incremento de capacidad de tratamiento en la Unidad U-2590 Despojadora de aguas agrias” la Unidad incrementó su capacidad de 330 gpm a 450 gpm.

En el 2010, con el Proyecto de Hidrotratamiento de combustibles de la GRB, entró en operación la Planta de tratamiento de Aguas Agrias U-4840, con una capacidad máxima de tratamiento de 496 gpm. En el diseño de esta nueva planta se consideró que tendría la capacidad de tratar el volumen total de agua agria generada por la GRB, tanto por las nuevas unidades como las antiguas, remplazando la operación de la U-2590. Sin embargo, desde las primeras corridas de la U-4840 se evidenció la necesidad de trabajar en paralelo con la U-2590, debido a un aumento en la producción de aguas agrias en la refinería, generándose hasta 620 gpm (125% del valor de diseño).

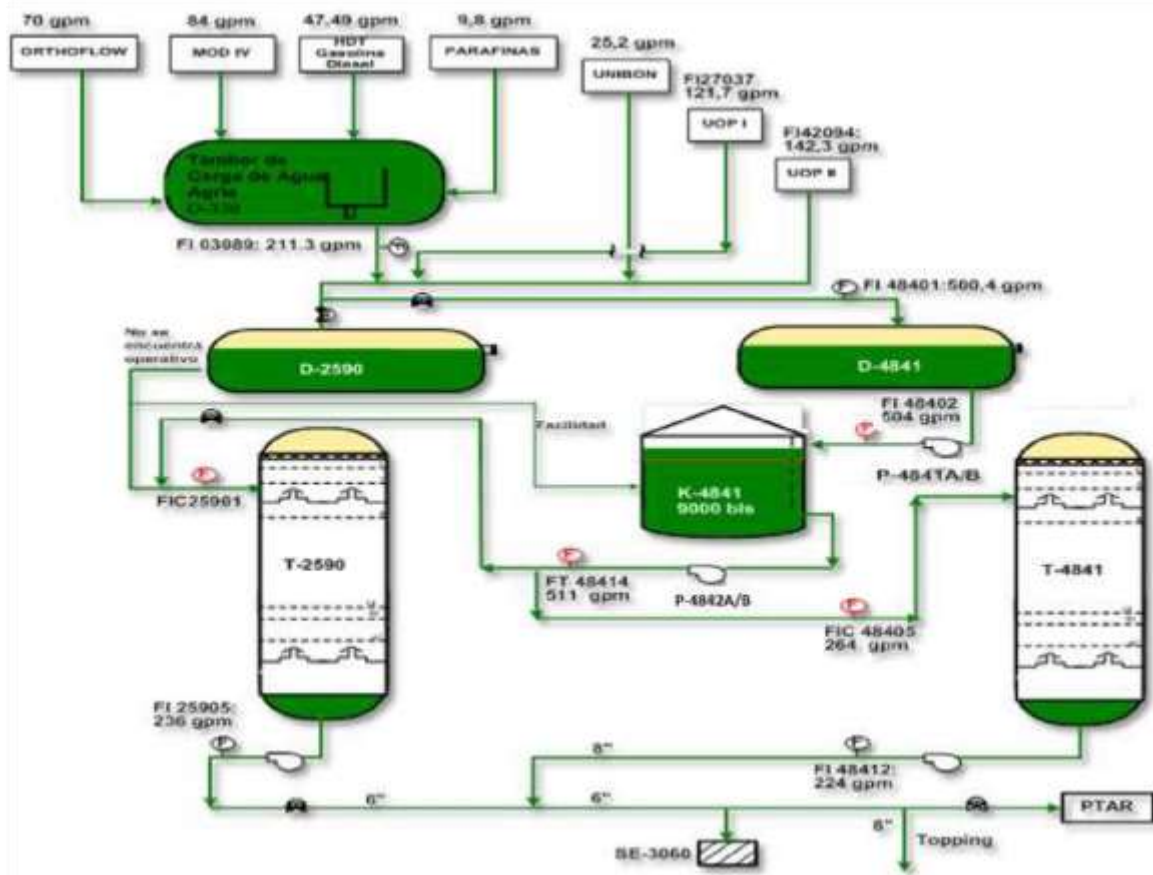


Figura 2. Descripción global aguas agrias en la GRB.

Nota. Adaptado de: GRB (2012). Mapa actualizado de aguas agrias

Por lo anterior, en el año 2006, la GRB adicionó a su lista de buenas prácticas el reúso de aguas agrias en los desaladores. En el tiempo que se llevó a cabo este proyecto, solo se encontraba en operación la U-2590. En el año 2010, con el Proyecto de Hidrotratamiento de combustibles de la GRB, entró en funcionamiento la planta de tratamiento de aguas agrias U-4840. Aunque se esperaba sacar de servicio la U-2590, el aumento en la generación de aguas agrias requirió el trabajo en paralelo de las dos unidades y de esta manera han venido operando hasta el día de hoy. Sin embargo, esta situación ha generado algunas dificultades en el sistema de evacuación de aguas agrias hacia las Topping y hacia la PTAR. En la figura 3, se presenta un diagrama de procesos

general de la operación continua de las Plantas de Aguas agrias U-2590 y U-4840. Estas unidades trabajan simultáneamente desde la entrada en operación de la U-4840, para satisfacer las necesidades de tratamiento de aguas agrias generadas en la Refinería.

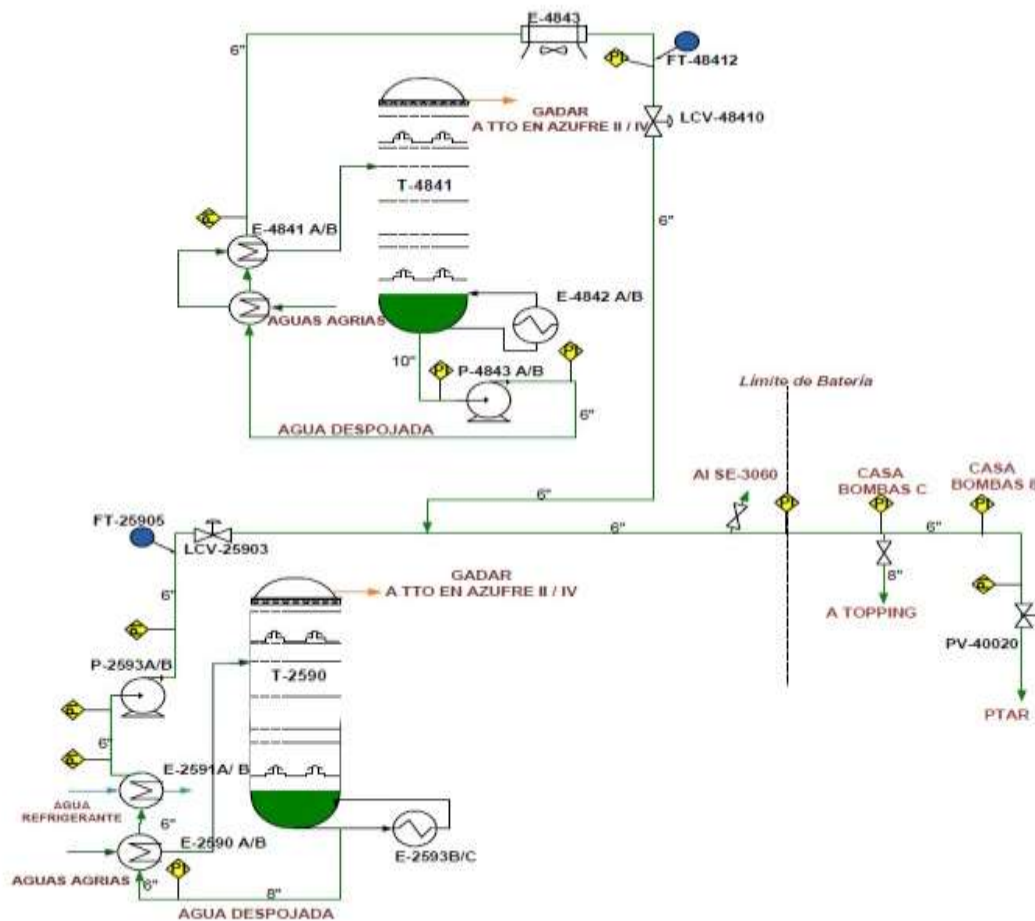


Figura 3. Esquema actual de operación Tratamiento de Aguas Agrias GRB.

Nota. Adaptado de: Ecopetrol S.A. Instituto Colombiano Del Petróleo - Unidad De Disciplinas Especializadas. (2017). Conceptualización para el mejoramiento de la hidráulica del sistema de evacuación de aguas agrias despojadas desde la UOP I hacia la PTAR y TOPPING (Desaladores de Crudo),

3.4 Características de Agua Agria de la GRB

Los principales parámetros a considerar para evaluar la calidad de agua de inyección a los desaladores son: pH, contenido de carbonatos-bicarbonatos, sulfato de calcio, sólidos totales, cloruros, sulfuros y amonio. Sin embargo, en el caso de las aguas agrias las variables que pueden restringir su uso como agua de lavado en los desaladores son el pH y el contenido de amonio y sulfuros. El pH puede ser ajustado a los requerimientos con adición de ácido clorhídrico diluido. En la tabla 1 se muestra la caracterización del agua agria de la GRB, para un monitoreo realizado durante el mes de Julio de 2002.

Tabla 1.

Caracterización de aguas agrias de la T-2590

Análisis	Unidad	Valor
Magnesio	ppm	1.12
Sodio	ppm	20.6
Potasio	ppm	0.78
Hierro Disuelto	ppm	0.36
Manganeso	ppm	<0.05
Aluminio	ppm	<1.47
Estaño	ppm	<2.75
Zinc Disuelto	ppm	0.13
Fosforo Total	ppm	0.147
Fosfato Total	ppm	0.451
Cloruros	ppm	17.23
Sulfatos	ppm	32.94
Calcio	ppm	10.4
DQO	ppm	1400

Análisis	Unidad	Valor
Fenoles	ppm	372
Sólidos Disueltos	ppm	80
Sólidos Suspendidos	ppm	28
Sólidos Totales	ppm	108
Alcalinidad Total	ppm	312.1
pH	----	9.49
Carbonatos	ppm	453.6
Bicarbonatos	ppm	0
Conductividad	microΩ/cm	358/25.6
Nitrógeno Amoniacal	ppm	44
Nitrógeno Kjeldahl	ppm	171.6
Nitritos (No)	ppm	<0.066
Nitritos (No)	ppm	<0.080

Nota. Adaptado de: Reúso de aguas agrias en desaladores de la GRB FASE I.

3.5 Aguas Aceitosas de la GRB

Las aguas provenientes de todos los sistemas de tratamientos de la GRB son denominadas aguas aceitosas. Por lo cual el diseño de los diferentes procesos de una refinería prevé el empleo de grandes cantidades de agua. Estos volúmenes en un alto porcentaje deben restituirse a los cuerpos de agua circundantes, atendiendo las normas vigentes de acuerdo con la legislación ambiental establecida por los organismos encargados de la protección ambiental en cada país.

La GRB utiliza el separador gravitacional agua/aceite, denominado separador API (American Petroleum Institute), cuya función básica consiste en separar el aceite libre contenido en las aguas residuales resultantes de los procesos industriales, con dos claros propósitos: disminuir hasta límites tolerables y legalmente definidos el impacto con el fin de adecuar las aguas para su

restitución a los cuerpos circundantes. Las corrientes que fluyen hacia los separadores se originan en:

- Drenajes que se producen en las plantas durante las operaciones de apagada y puesta en marcha.
- Agua empleada en el alistamiento de cargas y productos (desaladores, tratadores) o drenada de tambores separadores.
- Escapes en las bombas de proceso.
- Drenajes de tanques de almacenamiento.
- Agua lluvia procedente de patios de las plantas y diques.
- Aguas residuales de los laboratorios.
- Desechos de las unidades de proceso.

En las plantas, los desechos líquidos caen al alcantarillado de aguas aceitosas y van a los colectores principales. Estos colectores son tuberías subterráneas de gran diámetro, a través de las cuales fluyen las corrientes por gravedad hacia los separadores API.

Si por falla en el equipo, o por una mala operación, el separador no remueve el hidrocarburo con la eficiencia que debiera, la PTAR tendrá que sobrecargar sus esfuerzos, hasta llegar a un punto en que la calidad del agua efluente de la planta, estará por fuera de los límites de control creando graves problemas sociales y ambientales, con todas las consecuencias que de ello se deriva. Por todo esto, es importante que la operación de los separadores sea controlada cuidadosa y permanentemente, a fin de lograr su máxima eficiencia y reducir la contaminación de las aguas afluentes a PTAR.

3.5.1 Descripción del proceso del separador API. El separador API utiliza proceso físico como principio de operación y debe cumplir las siguientes funciones:

- Remover hidrocarburos e impurezas que llegan al separador y que flotan en la superficie líquida.
- proporcionar el tiempo de retención y las condiciones de flujo necesarias para la sedimentación y flotación de impurezas.
- Eliminar los productos de la sedimentación y flotación mediante limpieza programada.

Un separador API (Figura 4) es un estanque rectangular con un extremo de entrada y otro de salida. En el extremo de entrada hay una cámara pre separadora, para eliminar los sólidos más grandes se utiliza una rejilla. El aceite libre que llega al separador se remueve por medio de un desnatador allí ubicado, ya sea flotante o de tipo flauta. Luego de ésta cámara el afluente líquido pasa por una sección un poco más ancha que se encarga de distribuir el flujo a las cámaras de separación (bahía de acceso). A continuación, el agua aceitosa pasa por las compuertas de acceso para ir a colisionar con los postes deflectores. Estos regulan la velocidad del agua produciendo un flujo suave y más o menos uniforme en las cámaras separadoras. Allí el aceite comienza a flotar mientras el lodo y otras impurezas van sedimentándose en el fondo. El mecanismo de colección de lodos va barriéndolos hacia un depósito y son bombeados periódicamente hacia un tratamiento posterior o hacia el sitio final de disposición. Por su parte, la nata o capa de aceite formada, es vertida hacia el desnatador en forma continua. El aceite así recolectado va a un compartimento separado y se envía posteriormente a tanques para romper, mediante calentamiento con vapor, cualquier emulsión y retirar el agua presente. El extremo de salida tiene un tabique de retención de aceite y luego un vertedero por encima del cual sale el agua con un pequeño remanente de aceite.

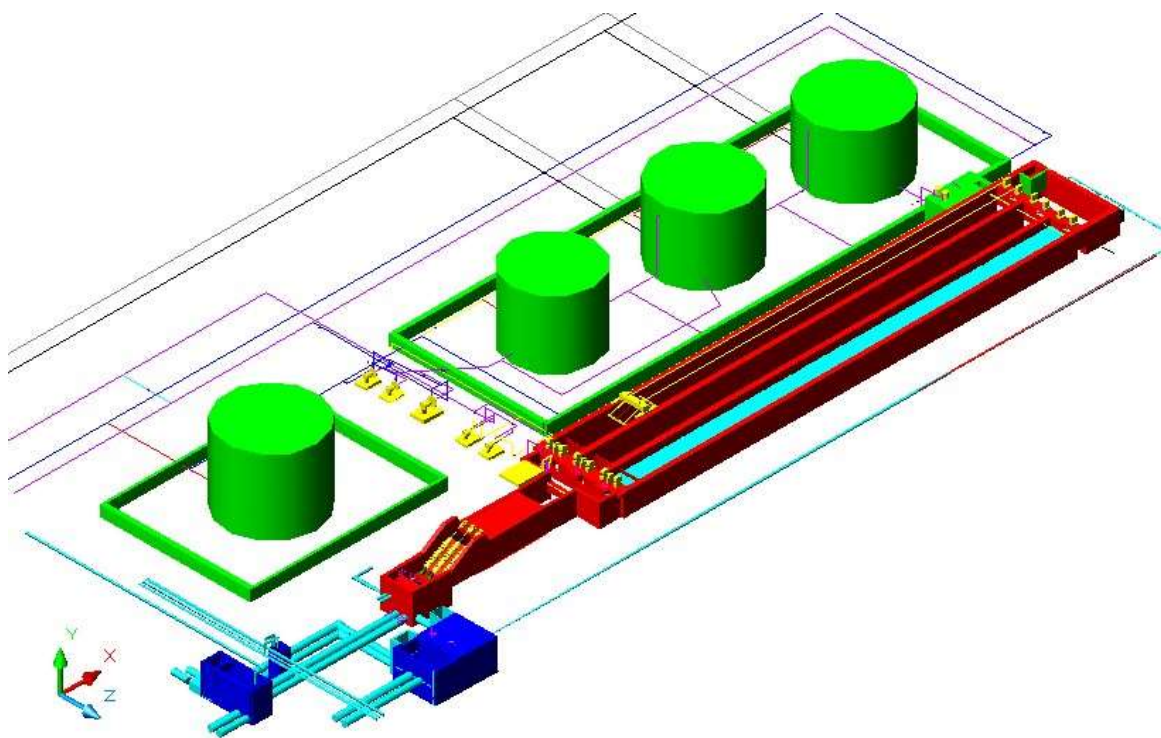


Figura 4. Diagrama general de un separador API.

Nota. Adaptado de: ECOPETROL S.A. Manual de operación de separadores API.

3.6 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR-GRB

La PTAR, es consecuencia de una disposición de la GRB emanada el 30 de noviembre de 1971 y que dio origen al Proyecto 72-014. La GRB de ECOPETROL S.A., consciente de la necesidad de preservar el recurso agua y temiendo su deterioro por efectos de la expansión de la industria del petróleo, dispuso parte de su personal técnico especializado y destinó ingentes recursos económicos para afrontar su responsabilidad social y legal de planificar la defensa de nuestro medio ambiente.

La ingeniería básica de diseño de la planta fue encomendada a la firma UOP de los Estados Unidos y la ingeniería de montaje y construcción fue realizada por DEGÉMONT de Francia. La

interventoría de la obra estuvo a cargo de la firma TPL de Italia, conjuntamente con el departamento de interventoría de ECOPETROL. En 1982 la PTAR, entra en operación. Todo el control de proceso se hace mediante un Sistema de Control Distribuido (DCS), mediante consolas ubicadas en el cuarto de control. El DCS permite al operador realizar operaciones de monitoreo, control directo, control regulatorio, funciones de control avanzado, funciones de control supervisarlos, y adquisición de datos. En la figura 5, se presenta la PTAR-GRB y sus operaciones básicas.

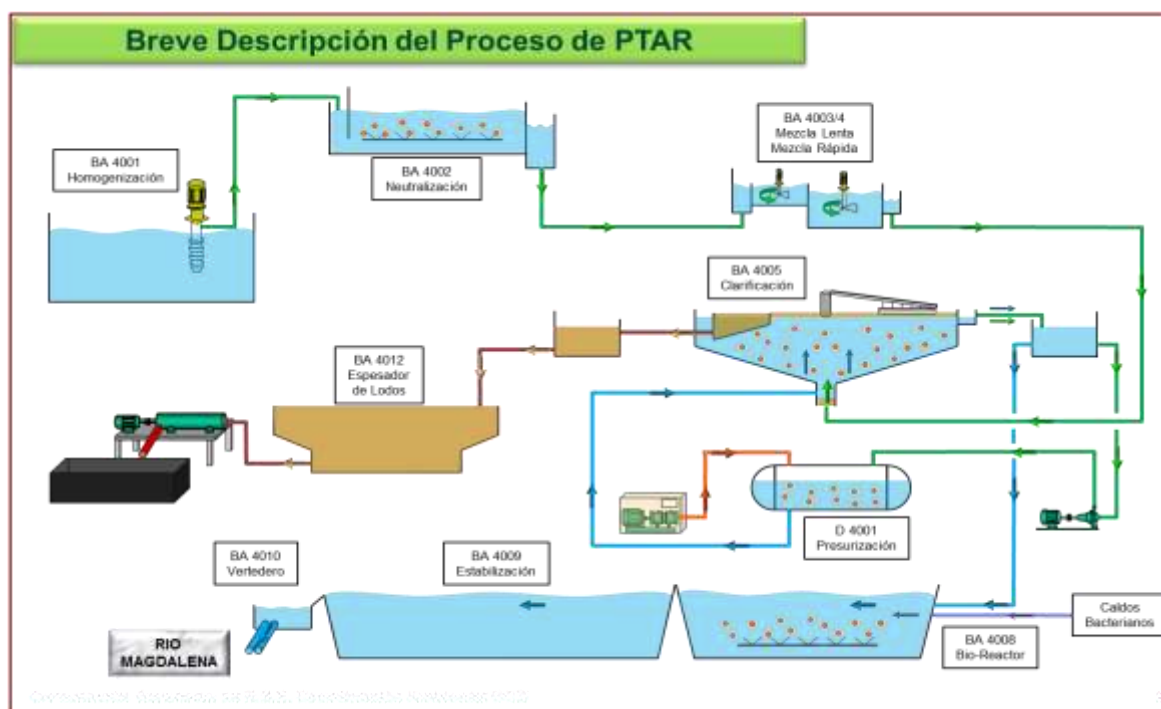


Figura 5. Etapas de la PTAR-GRB. RWD.

Nota. Adaptado de: GRB (2015). Manual de descripción de procesos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR-

3.6.1 PTAR-GRB Operación de Homogenización. El flujo de entrada de agua a la unidad se recibe en la piscina de homogenización o de carga BA-4001. Este flujo consiste en: Agua de

separadores gravitacionales, aguas agrias de la unidad ubicada en el área de balance y todos los drenajes de la planta. Estas corrientes se homogenizan en la piscina con el fin de evitar su estratificación y disminuir así el impacto de variación del pH. El flujo de carga es impulsado por tres bombas verticales SP-4001 (A/B/C) de 6600 gpm cada una.

3.6.2. PTAR – GRB Operación de Neutralización. La piscina de neutralización, denominada BA-4002, está diseñada para el ajuste puntual del pH del agua de carga hasta valor de 7.0 (pH neutro) indispensable para el proceso (coagulación). En esta piscina la carga se airea y al tiempo se agita, mediante el suministro y difusión de aire. El aire es inyectado por la parte más baja de la estructura, mediante dos cabezales de tubos perforados alineados en forma de espina de pescado. El aire se envía por medio de dos sopladores en línea denominados MC-4002 A/B, uno en servicio a flujo máximo y otro como relevo.

3.6.3. PTAR-GRB Operación de Coagulación. El propósito de la coagulación es reunir los sólidos suspendidos y materias coloidales muy finas y que se encuentran disueltas en el agua, las cuales sin un tratamiento adecuado no precipitarían y el agua saldría con la misma turbiedad de entrada. El pH del medio es muy importante en la coagulación. Los coloides presentes en forma natural en el agua impiden la coagulación; por esta razón, una cantidad mayor de coloides inhiben el efecto de la dosificación óptima del coagulante, implicando un consumo mayor de reactivos para la clarificación del agua (Ecopetrol S.A, 2016).

La naturaleza de los hidrocarburos influye sobre la coagulación más que su concentración y no hay una relación simple entre esta concentración y la cantidad requerida de coagulante. Su eliminación primaria se facilita dado que la densidad de la suspensión es inferior a la del agua, lo

que ocasiona inicialmente una separación gravitacional de la interfase agua-hidrocarburo. No así el hidrocarburo disuelto, emulsionado con la turbidez del agua, que requiere entonces la adición de un coagulante y su separación es más efectiva en un medio neutro (pH de 7.0). La dosificación del ayudante de coagulación el Hidroxicloruro de la compañía NALCO COLOMBIA referencia comercial 8577 (NALCOWATER, 2019) con una dosificación de 80 ppm, así como su selección, dependen de la naturaleza del agua a tratar y solo se puede determinar apropiadamente después de realizar numerosas pruebas de laboratorio.

3.6.4. PTAR-GRB Operación de Floculación. La floculación es un proceso consecutivo a la coagulación y consiste en agrupar los grumos en forma de un precipitado voluminoso y pesado (FLOC). Esto se logra al introducir en el agua un ayudante electroquímico, generalmente un polímero sintético; con el cual, mediante una agitación lenta, se obtiene el contacto íntimo entre los grumos ya formados facilitando su adherencia a las moléculas del polímero (Ecopetrol S.A, 2016). La agitación lenta de esta mezcla de agua y flocs aumenta las posibilidades de colisión y atracción entre las partículas coaguladas y por tanto facilita la formación de nuevos flocs.

El ayudante más utilizado es un poli electrolito de la compañía NALCO COLOMBIA referencia 1303 (NALCOWATER, 2019) con una dosificación de 8 ppm, cuya carga iónica depende de la conductividad del agua a tratar. Este polímero solo reacciona a pH de 6.0 y su dosificación se determina, al igual que el ayudante de coagulación, mediante el ensayo de jarras. El pH del agua no sufre variación.

3.6.5. PTAR-GRB Operación de Flotación. La flotación puede definirse, como un proceso de clarificación mediante la separación ascensional de los sólidos suspendidos en un líquido. Este

proceso hace uso de la densidad aparentemente más baja de estos sólidos, para tratar de agruparlos y recogerlos sobre la superficie del líquido en un tiempo muy corto. La flotación puede ocurrir en forma natural cuando el volumen y la densidad de las partículas a eliminar es menor que la del agua. Puede ser también provocada y resulta de la fijación de aire o burbujas de oxígeno a las partículas a remover. Esto hace que el promedio de la densidad de las partículas se haga menor que el mismo valor para el agua (Ecopetrol S.A, 2016).

La presurización es una técnica empleada en la producción de micro burbujas obtenidas por descomposición de una solución acuosa enriquecida con el aire bajo una presión de varias atmósferas. Una disminución brusca de la presión nuevamente a la presión atmosférica hace que el aire que se había disuelto en exceso de la concentración de saturación, se escape formando pequeñas burbujas; las cuales arrastran las partículas hacia la superficie del líquido. En sistemas pequeños el flujo completo se presuriza a 50 o 60 PSIG por medio de una bomba añadiendo aire comprimido a la descarga de la bomba. El líquido mezclado con el aire se almacena en un tambor, bajo presión, por un espacio corto de tiempo y luego se lleva al tanque de flotación, donde se mezcla con el agua a clarificar.

3.6.6. PTAR-GRB Operación de Biodegradación de Fenoles. Luego del proceso de clarificación el agua residual pasa al biorreactor BA-4008 donde ocurre el tratamiento biológico de fenoles. Este reactor cuenta con un volumen útil de 4000 m³ y un tiempo de residencia de 8 horas. En este biorreactor se aplica el consorcio microbiano aerobio especializado en el consumo y degradación de fenoles. Este consorcio microbiano fue desarrollado en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) de ECOPETROL S.A. está constituido por un conjunto de microorganismos aislados de aguas aceitosas y lodos aceitosos (Ecopetrol S.A, 2016).

3.6.7. PTAR-GRB Operación de Estabilización. Los efluentes clarificados en los Trenes de Flotación-Clarificación se envían, por gravedad, desde las columnas de equilibrio hacia el área de estabilización conformada por el biorreactor BA-4008, y piscinas de estabilización BA-4009A/B y obra de salida al Río Magdalena BA-4010. Las lagunas de estabilización son depósitos de agua de profundidad de entre 1 y 3.5 m, y tienen como finalidad estabilizar la materia orgánica presente en las aguas residuales. Este tipo de tratamiento se emplea extensamente por su flexibilidad, bajo costo de inversión, operación y mantenimiento, es una opción a los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales. En términos generales las lagunas se pueden clasificar como lagunas de estabilización o como lagunas de oxidación.

3.6.8. Evaluación de Desempeño de la PTAR-GRB. La GRB evalúa el desempeño de la PTAR-GRB a partir de un índice de calidad del agua y de la carga real de la planta. Con estos dos indicadores se califica el desempeño del tratamiento realizado en la planta.

3.6.9. Índice de Calidad del Efluente (ICE) de la PTAR-GRB. El ICE es un indicador de la efectividad de la planta de la PTAR-GRB es de gran importancia ya que un componente de la perspectiva financiera de la refinería. El I.C.E. es un modelo en el cual se cuantifica el peso de cada una de las variables que establecen la calidad del efluente (según los requerimientos ambientales del país). El I.C.E. se expresa mediante el siguiente modelo (Ecopetrol S.A, 2016):

$$ICE = (\sum(Vi * wi))[HC - CF - OD - pH - DQO - SST - NH^3 + T] \quad (1)$$

En la Tabla 2 se presenta la descripción de las variables y sus respectivos pesos de valoración cuantitativa asignados. Es de observar que el hidrocarburo y fenol son los de mayor peso, por lo cual son parámetros que se mantienen con mayor seguimiento para su cumplimiento.

Tabla 2.

Pesos a cada variable del modelo ICE

Parámetro	Nomenclatura	Unidades (Vi)	% (Wi)
Índice de Calidad del Efluente	ICE	Adimensional	
Concentración Hidrocarburo	HC	ppm	0.40
Sólidos suspendidos	SST	mg/l	0.08
Concentración iones H ⁺	pH	---	0.10
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	0.06
Oxígeno disuelto	OD	mg(O ₂)/l	0.10
Concentración Nitrógeno amoniacal	NH ³	mg/l	0.04
Concentración Fenol	CF	mg/l	0.20
Temperatura	T	°C	0.02

Nota. Adaptado de: RIS (Sistema de Información de la Refinería) de ECOPETROL S.A.

Durante el periodo 2008 al 2017 se ha evaluado el desempeño de la PTAR a partir del ICE. La Tabla 3 presenta un histórico general y la Tabla 4 un histórico por variables. En esta tabla, en color verde se representa el cumplimiento del parámetro y rojo el incumplimiento.

Tabla 3.

Histórico de la evaluación del efluente en PTAR mediante ICE

Año	ICE		Año	ICE	
	Real	Meta		Real	Meta
2007	67	62.31	2013	74	74.03
2008	68	66.38	2014	74	74.05
2009	72	69.77	2015	74	73.92
2010	72	71.90	2016	74	74.21
2011	74	73.92	2017	74	74.12
2012	74	73.01	2018	74	74.12

Nota. Adaptado de: RIS (Sistema de Información de la Refinería) de ECOPETROL S.A.

Tabla 4.

Cumplimiento de I.C.E. por parámetro.

Parámetro	Año											
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
CH												
SST												
pH												
DQO												
OD												
NH ₃												
CF												
°T												

Nota. Adaptado de: RIS (Sistema de Información de la Refinería) de ECOPETROL S.A.

Se observa que la PTAR ha tenido incumplimiento con el Fenol y la Demanda Química de Oxígeno durante 10 años e Incumplimiento con respecto a los Solidos Suspendidos Totales SST y pH durante 8 años.

3.6.10. Evaluación de Carga de la PTAR-GRB. En la actualidad la GRB cuenta con indicador de carga promedio de 4500 gpm de aguas industriales que llegan a la PTAR-GRB; de las cuales se están reusando alrededor de 2500 gpm y el resto se está vertiendo al río en carga real como se representa en la Tabla 5.

Tabla 5.

Histórico año 2017 de la Carga que maneja la PTAR-GRB.

Mes	Carga Promedio (gpm)	Carga Real (gp m)
Enero	4.500	743.98
Febrero	4.500	1.119.66
Marzo	4.500	1.187.50
Abril	4.500	970.41
Mayo	4.500	1.094.43
Junio	4.500	1.139.66
Julio	4.500	1.869.97
Agosto	4.500	2.121.26
Septiembre	4.500	2.302.70
Octubre	4.500	2.363.89
Noviembre	4.500	1.183.35
Diciembre	4.500	1.342.67
Promedio	4.500	1.456.99

Nota. Adaptado de: RIS (Sistema de Información de la Refinería) de ECOPETROL S.A.

Es responsabilidad directa de la GRB la correcta operación de la PTAR y aun cuando tiene un elevado costo de operación y mantenimiento, éste no es considerado como un gasto, sino como una inversión para las generaciones futuras por el innato derecho humano a un mejor ambiente y por el equilibrio global. Los costos actuales son de 76 pesos/m³ de agua residual tratado. En la tabla 6 se observa la tendencia de la cantidad de galones tratados y respectivo costo anual.

Tabla 6.

Costos Anuales Tratamiento de Aguas.

Año	Clarificación	
	m³	Costo [\$]
2012	459.588.50	406.276.234
2013	499.343.50	455.401.272
2014	462.334.50	434.594.430
2015	485.187.00	456.075.780
2016	415.221.50	476.026.289
Total	2.321.675.00	2.228.374.005

Nota. Adaptado de: Contrato Tratamiento de Aguas PTAR-GRB.

En la figura 6 se observa la operación actual de la PTAR, en la cual las aguas agrías de las T-4841 / T-2590, las aguas aceitosas del SE-3060 y los drenajes de sodas de la U-4050 / U-4090 como carga a la PTAR para corriente a vertimiento.

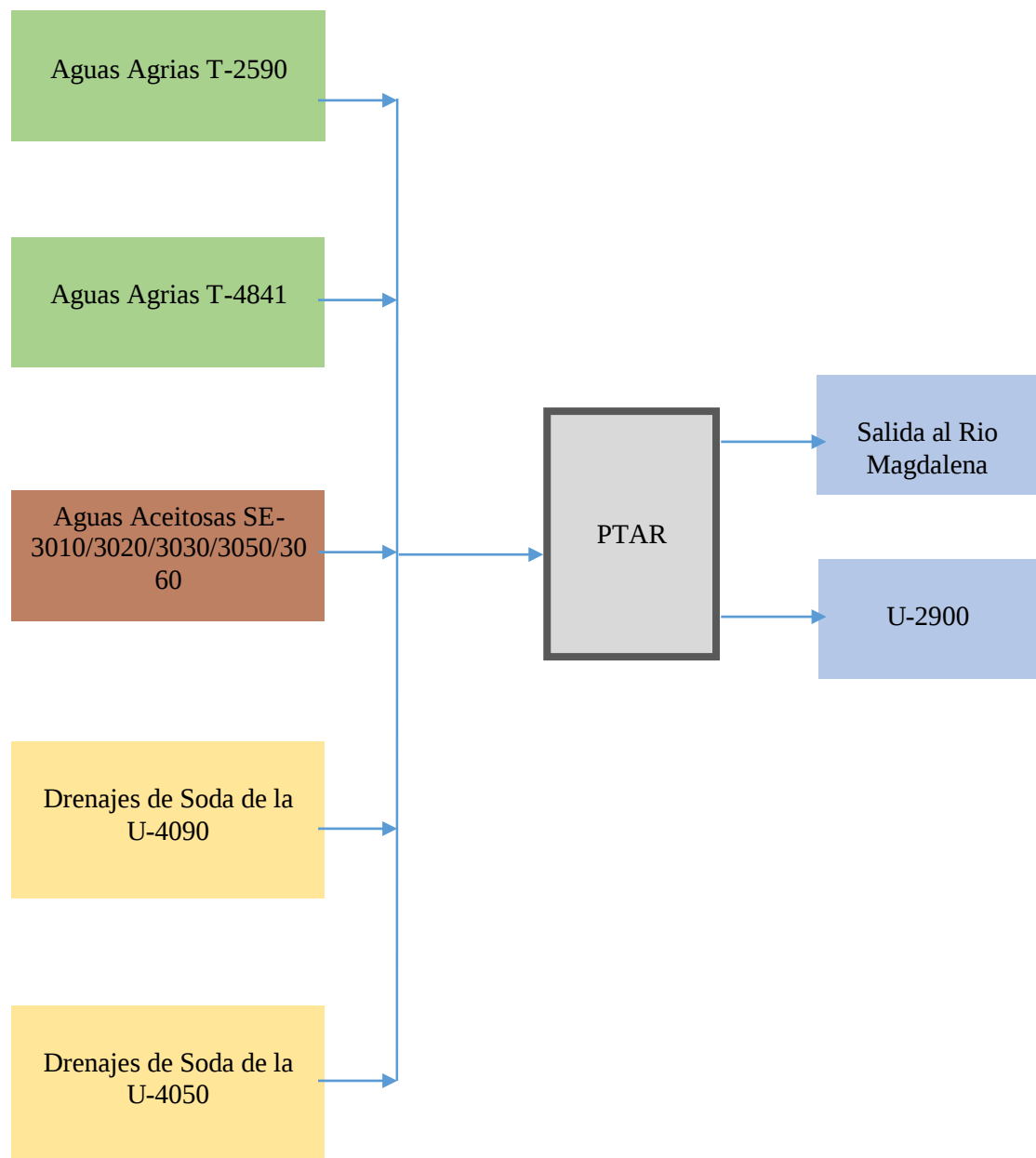


Figura 6. Operación actual PTAR.

3.7 Reúso de las Aguas Residuales Industriales de Refinerías a Nivel Mundial

3.7.1. Petroleras en Brasil. Brasil es privilegiado posee aproximadamente el 13% del agua dulce del mundo (Mierzwa J.C, *et al.* 2005). Sin embargo, algunas regiones tienen abundancia y

otras escasean (árido y regiones semiáridas) y en regiones altamente urbanizadas (Río de Janeiro y São Paulo), existen problemas con la calidad del agua (Hespanhol I, *et al.* 2003). La legislación de los recursos hídricos en Brasil (Ley 9433 de 1997) ha hecho que la reutilización de los efluentes industriales sea económicamente atractiva, además de mejorar la imagen de las empresas (Mierzwa J.C, *et al.* 2005). En 2011, la refinería estatal brasileña

“Petrobras”, procesó 226,042 m³ de petróleo crudo/día, con un consumo de agua de 0.9 m³ de agua/m³ de petróleo procesado correspondiente a 203,438 m³ de agua/día (National Petroleum Agency, 2019).

3.7.2. Petrolera Mexicana Pemex, la petrolera estatal mexicana, llevó a cabo la reutilización de aguas residuales en su refinería de Minatitlán, cuya capacidad de procesamiento es 170,000 barriles de petróleo/día. El principal objetivo era proporcionar agua para las torres de refrigeración. El diseño del proceso incluyó filtración con membrana, tratamiento biológico (secundario) y RO en tratamiento terciario (Peeters J, *et al.*).

El tema económico la Oportunidad de ahorrar en costos de tratamiento de aguas residuales y tratamiento de aguas residuales (consumo químico, activación de carbón, manejo de lodos). La disminución en la captación de los recursos de agua dulce. Los requisitos de calidad cada vez más estrictos. Tratamiento de aguas residuales para su reutilización en la refinería: la eficiencia total de reciclaje de agua es del 70%.

3.7.3. Petrolera en Estados Unidos. En Virginia (EE. UU.) un esfuerzo cooperativo entre los Hampton Roads Sanitation District y la refinería de Yorktown (con capacidad de 70,000 barriles de petróleo/día), propiedad de Western Refining, suministra 500,000 galones/día de aguas

residuales altamente tratadas para uso en torres de enfriamiento y otros procesos de refinería. Otro esfuerzo es la refinería Gold Bar, propiedad de Petro-Canada, en Edmonton, con capacidad para procesar 135,000 barriles de petróleo/día. Este proyecto implica el uso de tratamiento terciario con membranas (UF y RO) para uso en las corrientes de hidrógeno y vapor de la desulfuración proceso.

3.7.4. Petrolera en China. En China, la refinería Yanshan en Beijing probó un sistema combinado de UF (con capacidad de 560 m³ /h) y tres unidades de RO (cada una con capacidad 103 m³ /h) para reducir el nivel de aceite/DQO, eliminar los sólidos en suspensión y desmineralizar el agua de salida (Tong F, *et al.* 2009). Según la experiencia de la planta de Sinopec Yanshan, el uso combinado e integrado de la tecnología UF y RO se adapta a su necesidad de reutilizar las aguas residuales, El sistema UF fue operado a una recuperación de agua del 92-95%. (Wang D, *et al.* 2011).

3.7.5. Petrolera en Australia Se implementaron otros dos proyectos relevantes en Mobil Altona refinería, propiedad de Esso, ubicada en Victoria, Australia, con capacidad de procesamiento de 80,000 barriles/día y en Petromidia complejo de refinería, propiedad de Rompetrol, ubicado en Ravodari, Rumania, con capacidad de 100,000 barriles/día. Estudios preliminares en la refinería australiana (Mobil Altona Refinery, 2006) y la rumana es un complejo identificado como de gran importancia en ahorros de agua, minimización las descargas de aguas residuales y el uso efluentes tratados para los sistemas de contra incendios como principal objetivo de los proyectos mencionados. Además, el Petromidia complejo adoptado como una medida de conservación de agua el reemplazo de las torres de enfriamiento con unidades más pequeñas (con ahorro de energía como bien) y la modificación y reparación del tratamiento de aguas residuales

sistema, y como medida de reciclaje la reutilización de la purga en los sistemas de generación de vapor.

3.5.6. Petroleras Rusas La compañía petrolera rusa Bashneft es planeando usar General Electric's Último biorreactor de membrana (MBR) (GE) con portador que acomoda la membrana (MACarrier) tecnología para tratar aguas residuales de Bashneft-Ufaneftekhim complejo de procesamiento de petróleo y otras empresas del Norte Industrial Bloque de Ufa. Según GE, las regulaciones estrictas de descarga y la necesidad de reutilizar el agua tratada llevaron a Bashneft a elegir también su ZeeWeed MBR, inversión de electrodiálisis (EDR), ósmosis inversa (RO) y tecnologías de intercambio iónico selectivas de iones para su nueva planta de tratamiento de aguas residuales.

Este anuncio representa la primera aplicación en Rusia de la MBR de GE con Tecnología MACarrier. Este sistema está diseñado para ayudar a los clientes industriales a cumplir estrictos requisitos de descarga de agua y permiten mayor reutilización del agua mientras se logran ahorros de costos y Aumento de la eficiencia operativa (ver Membrana Tecnología, julio de 2014, página 4). Bashneft usa esta tecnología para hacer más eficiente la eliminación de productos derivados del petróleo, fenoles y otras sustancias tóxicas de aguas residuales.

Bashneft se compromete a tener el mejor sistema de tratamiento de agua para su procesamiento de aceite complejo. Las tecnologías avanzadas de GE ayudarán a cumplir con las estrictas regulaciones necesarias para la descarga de agua para los parámetros como demanda de oxígeno químico y 20 otros parámetros. El tratamiento de aguas residuales de la empresa nos permitirá hacer que el agua se pueda verter al río Belaya ", explicó Alexander. Korsik, presidente y presidente de OJSC Oil Procesamiento de la sociedad anónima Bashneft.

Según GE, una característica distintiva de su paquete de tratamiento de agua es la ausencia de primario y clarificadores secundarios. Lodo activado está separado del agua tratada por ZeeWeed 500 membranas de ultrafiltración (UF) en la aireación descarga de tanques. La deshidratación de residuos sólidos se realiza mediante centrífugas compactas. Estas características garantizar la reducción del área ocupada por instalaciones de tratamiento de efluentes y eliminar la posibilidad de contaminación ambiental. "Hemos trabajado con Bashneft en todo un programa piloto para diseñar una estrategia que funciona mejor para tratar el agua del Complejo de procesamiento de aceite Bashneft-Ufaneftekhim.

La tecnología avanzada de tratamiento de efluentes de GE permite reutilizar la mayor parte del agua tratada y reduce el consumo de agua dulce. El proyecto también significa la primera aplicación de nuestro nuevo MBR con tecnología MACarrier en Rusia ", dijo Yuvbir Singh, gerente general, Sistemas de ingeniería, agua y proceso Tecnologías, GE Power & Water.

Durante abril-julio de 2013, un estudio piloto exitoso de diferentes tecnologías fue realizado por GE en cooperación con Bashneft y State Unitary Enterprise Institute of Petroleum Refining y Petroquímica de la República de Bashkortostán, que demostró la viabilidad tecnológica de purificación de aguas residuales de refinería en cumplimiento con los estrictos requisitos de la legislación ambiental de la Federación de Rusia. De acuerdo con los resultados del preliminar estudio y otros análisis de viabilidad, Bashneft eligió el MBR de GE con MACarrier, EDR, RO y las tecnologías de intercambio iónico selectivas de iones como la base para el proyecto de actualizar las biológicas instalaciones de tratamiento (BTF) de Bashneft-Ufaneftekhim. Para continuar el desarrollo del proyecto BTF Bashneft solicitado que GE desarrolle el diseño básico de los principales equipos y procesos tecnológicos. Esta se completó antes de finales de 2013 (Faccini M.)

3.7.7. Refinerías Canadienses. Las Cooperativas Federadas Ltda Complejo Refinería Co-op en Regina, Saskatchewan, Canadá, está usando agua tecnología de reciclaje de General Electric Co (GE) en aguas residuales, proyecto de mejora que habilitará la refinería para limpiar el 100% de sus aguas residuales en el sitio.

El movimiento significa que será la única refinería en América del Norte para reciclar todas sus aguas residuales para la producción de vapor, que se usa para calefacción, producción de hidrógeno, para alimentar equipos y para torres de enfriamiento, dice GE.

Hace varios años, la refinería amplió sus operaciones para producir 30 000 barriles más de petróleo por día (BPD) - tomándolo de 100 000-BPD a una instalación de 130 000 BPD, que aumentó su uso de agua. La refinería se basó en una fuente de agua compuesta de una mezcla de agua de pozo y agua de la ciudad, pero las restricciones en el uso del agua obligaron a tenía que encontrar una nueva fuente de agua. GE combinó su membrana ZeeWeed tecnología de biorreactor (MBR) y una alta eficiencia sistema de ósmosis inversa para reciclar y reutilice 2 millones de galones de aguas residuales por día. Las refinerías requieren una enorme cantidad de agua. Tratamiento de aguas residuales y reutilización es económico y ecológico. En el caso del Complejo de Refinería Cooperativa, la expansión requirió una nueva fuente de agua. Las tecnologías MBR y RO de GE ayudarán a la refinería recicla el 100% de sus aguas residuales, que es sostenible y amigable con el medio ambiente opción, 'dijo Kevin Cassidy, Líder Global, Sistemas de ingeniería - Agua y proceso Tecnologías, GE Power.

3.8 Tecnologías para Reutilización de Aguas Residuales en Petroleras

Las alternativas para la reutilización del agua pueden ser: (a) reutilización directa de aguas residuales, cuando el nivel de contaminación no interfiere en el próximo proceso y (b) reutilización con regeneración, que es la reutilización de aguas residuales tratadas en otro proceso (Wang Y & Smith R. 1994) En las refinerías, los tratamientos primarios son la alternativa más convencional para mejorar el uso del agua residual e implican separación de aceite / agua y la flotación por aire disuelto. El tratamiento secundario tiene como objetivo eliminar la mayor parte del material orgánico biodegradable, mediante el uso de biorreactores de membrana (MBR). Esta alternativa es una combinación del proceso de lodo activado con separación por membrana (micro o ultrafiltración - UF) (Merli T, *et al.* 2006). Finalmente, el tratamiento terciario elimina iones (sales disueltas) para obtener la calidad adecuada para su reutilización, principalmente en torres de refrigeración o sistemas de generación de vapor.

Estos procesos incluyen ósmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés) o electrodiálisis inversa (EDR), que se basa en el movimiento de especies cargadas en un campo eléctrico. La polaridad de los electrodos es periódicamente invertida, influyendo en la dirección del movimiento iónico. Los costos de las tecnologías empleadas para reutilización de las aguas residuales en refinerías de petróleo son generalmente altos. Las tecnologías que utilizan membranas como la MBR, la ósmosis inversa y la electrodiálisis inversa, son competitivas, tienen costos operativos similares y se utilizan para eliminar los iones cloruro (Chao Y, *et al.* 2008)

Algunas tecnologías, todavía no aplicadas a gran escala para tratar agua residual de refinería para su reutilización, son prometedores y pueden ser probadas. Entre ellas se encuentran la nanofiltración, el intercambio iónico, que podrían ser útil para el paso de pulido de ósmosis inversa

y en los procesos oxidativos, que son efectivos para tratar el agua agria. La nanofiltración (NF): esta tecnología es prometedora por su eficacia de eliminación y se podría ubicar entre la ultrafiltración y la osmosis inversa. Las membranas de NF son las más costosas, debido a su pequeño tamaño de poro.

El intercambio iónico: esta tecnología se puede usar como un paso de pulido del proceso de ósmosis, ya que para una baja concentración de sal es económicamente atractivo (Rautenbach R, *et al.* 2003) El intercambio de iones también podría ser utilizado después de los procesos de ósmosis inversa o electrodialisis, posiblemente reduciendo el costo del último paso de tratamiento para el cloruro eliminación de aguas residuales. Los procesos oxidativos avanzados (AOP): estos procesos son útiles para tratar agua agria de las refinerías, dado que contienen aceite emulsionado, fenoles, sulfuros, mercaptanos y cianuros. La AOPs contribuye a la degradación de sustancias tóxicas o refractarias a través de la producción de hidroxilos radicales.

Absorción en carbón activado: Después del tratamiento convencional, las aguas residuales de la refinería de petróleo aún contienen una cantidad considerable de compuestos orgánicos recalcitrantes y la adsorción sobre carbón activado se utiliza actualmente en las refinerías brasileñas, aunque sigue siendo costosa debido a la dificultad de su regeneración. Se usaron experimentos de isotermas de adsorción para evaluar resinas comerciales, y el más eficiente se sometió a experimentos en columna, donde la absorbancia (ABS) y el carbono orgánico total (TOC) eliminación se midieron. Finalmente, una estimación de la vida útil de la resina que utiliza condiciones de regeneración intermedias encontró que es siete veces mayor que la del carbón activado cuando este último no se regenera. Debido a estos factores, la optimización del proceso, procedimientos y acciones de reutilización se están aplicando cada vez más para mejorar la eficiencia de los procesos y la recuperación de agua.

La industria petrolera está incluida en este contexto ya que es mayor consumo, en muchos casos, está situado en regiones con escasez de agua tanto en Brasil y en todo el mundo. De acuerdo con PETROBRAS (2015), una refinería de petróleo consume un promedio de 0.9 m³ de agua por m³ de aceite procesado, con sistemas de refrigeración a base de agua y generación de vapor siendo los mayores consumidores (Amorim R. 2005) Como resultado, también se genera una gran cantidad de agua residual, que debe ser tratado antes de su eliminación ya que el contiene altos niveles de contaminantes como petróleo, amoníaco, fenoles, sulfuros, metales pesados y orgánicos compuestos (Nacheva P. 2011)

El tratamiento de aguas residuales en refinerías consiste principalmente en dos pasos: eliminación de contaminantes (aceite y sólidos suspendidos) mediante procesos físicos y físico-químicos, seguido de un proceso biológico para eliminar compuestos orgánicos y nitrógeno. Según lo presentado por IPIECA 2010 (IPIECA, 2010) y (Tchobanoglous G, *et al.* 2003) una tercera etapa, por lo general llamado tratamiento terciario, puede ser necesario para hacer el efluente adecuado para su eliminación o reutilización como agua de reposición de torre de enfriamiento, proceso de agua o agua de alimentación de la caldera.

Los procesos de tratamiento terciario varían según los contaminantes ser eliminado. En refinerías, clarificación, filtración o membrana separación se aplican comúnmente para eliminar los sólidos en suspensión, que es seguido por uno o más procesos de eliminación de sales disueltas, como la inversión de electrodialisis (EDR), ósmosis inversa (RO) o iones resinas de intercambio (IEX). Sin embargo, la mayoría de los procesos de eliminación de sal disueltos requiere la reducción o eliminación de compuestos orgánicos residuales presente en las aguas residuales, ya que estas pueden dañar las membranas y IEX resiste irreversiblemente. Estos compuestos

recalcitrantes son difíciles eliminar utilizando el tratamiento convencional de aguas residuales porque son poco biodegradable, como lo indica (Touma S. 2013).

El proceso más utilizado para eliminar estos compuestos en la industria es la adsorción en carbón activado granular (GAC) (Yang R. 2013) que generalmente se emplea después de un paso de tratamiento biológico como el costo del consumo de GAC sin tratamiento previo haría el proceso económicamente inviable, Aunque la adsorción de GAC se ha utilizado durante muchos años para el tratamiento de agua y aguas residuales, tiene algunas desventajas cuando se usa en refinerías. Debido a los altos niveles de materia orgánica (OM) presente después del tratamiento biológico, el GAC se satura rápidamente y debe ser reemplazado con un nuevo inventario, o regenerado / reactivado. La reactivación térmica de GAC generalmente no se aplica desde no se realiza in situ, lo que requiere que GAC sea transportado a sitios de reactivación que no siempre están cerca de las refinerías. Además, requiere una mano de obra frecuente para el manejo, alto capital gastos, y tiene altas pérdidas de GAC de 5e10% (Sufnarski M. 1999). La regeneración del GAC también sigue esta tendencia y por lo tanto no se aplica comúnmente tampoco.

La eliminación de materia orgánica de aguas residuales de dos derivados del petróleo se estudió refinerías que usaban resinas adsorbentes e IEX. En experimentos de isotermas, se ajustó el modelo de Freundlich para determinar la capacidad de adsorción de las resinas IEX y GAC para ambas refinerías. Sin embargo, la resina seleccionada R8 tuvo un buen rendimiento en experimentos de columna, con la comparación de la literatura que muestra que el Eficiencia de eliminación de TOC de la resina cuando se opera de forma continua el modo fue igual o incluso mejor que el del GAC. Isotermas y experimentos de columna también mostraron que algunos orgánicos recalcitrantes los compuestos tienen baja o nula tendencia a retenerse en las resinas. Los se encontró que la cantidad de tales materiales variaba del 24 al 31%. Estas los compuestos también

tienen una alta resistencia a la desorción, lo que requiere mayor regeneración EBCT y consumo de regenerante.

Las eficiencias de regeneración para todas las condiciones utilizadas en este estudio fueron más bajas de lo que cabría esperar para evitar la rápida saturación de resinas, que van del 57 al 94%, mostrando la gran resistencia de los compuestos recalcitrantes a la desorción. Diferentes condiciones, como variando la temperatura y las concentraciones de regenerante, deben ser considerado en futuros estudios. La vida útil de la resina cuando se usa las condiciones intermedias de regeneración se estimó en siete veces más alto que el de GAC cuando este último no se regenera. Las resinas deben proporcionar un alto número de ciclos de operación antes llegando a su punto de ruptura para ser más atractivo que el GAC, ya que tienen mayores costos operativos y de inversión que el GAC.

Además, el único proceso de eliminación de sólidos disueltos de manejar la salida de TOC de las columnas es EDR. La mayoría de RO los sistemas no toleran valores TOC por encima de 3e5mg L⁻¹ sin un estudio extenso de sus impactos en las membranas, y IEX normal los sistemas esperarían altos niveles de contaminación en las resinas aniónicas.

Paras el año 2016 se analiza el mapeo de oportunidades para la reutilización del agua en un sistema basado en cascada en una industria petroquímica en el sur de Brasil. Este sector industrial tiene una gran demanda de agua para su operación. El objetivo del estudio fue evaluar la implementación de la reutilización de agua en cascada en una industria petroquímica, centrándose en la reutilización de corrientes acuosas para reponer las pérdidas en las torres de enfriamiento. La reutilización del agua se realizó utilizando un enfoque heurístico basado en explotación de los conocimientos adquiridos durante el proceso de búsqueda. El estudio mostró la viabilidad de la reutilización de las corrientes internas como agua de reposición en refrigeración torres.

Frente a estos problemas de escasez, es necesario desarrollar estrategias para mejorar la gestión del uso del agua en sus diferentes aplicaciones (Gutterres M, *et al.* 2010). En las industrias química y petroquímica, el agua es un recurso clave para la operación del proceso de producción. Destilación, extracción líquido-líquido, operaciones de lavado y sistemas de enfriamiento son algunos de los diversos procesos en estas industrias donde el agua es usada intensivamente. Unidades de producción y procesamiento de petróleo, para ejemplo, use alrededor de seis barriles de agua por barril de aceite procesado (Bagajewicz M. 2000)

Las torres de enfriamiento se encuentran entre los mayores consumidores de agua en procesos industriales debido al uso de grandes volúmenes de agua dulce como agua de maquillaje en el sistema, que se debe a las pérdidas a través de evaporación, salpicaduras y purgas (Wang Y, *et al.* 2014). Algunos los autores han estudiado alternativas para reducir el consumo de agua en Torres de enfriamiento. Usó la ósmosis inversa para el tratamiento de una corriente de recirculación de una torre de enfriamiento, logrando una 16% de reducción en el reemplazo de agua y 49% en la purga de efluentes (Altman S, *et al.* 2011) Trataron el flujo de maquillaje lograron ahorros de hasta 85% de insumos químicos, 28% de agua de reposición y el 48% del efluente descargado (Van Limpt B & Van der Wal A. 2014) Evaluaron el uso de aguas residuales municipales para la reposición de pérdidas en torres de refrigeración (Chien S, *et al.* 2012) y utilizado industrial tratado aguas residuales para reponer las pérdidas en la torre de enfriamiento de una refinería en Brasil (Santos V, *et al.* 2015). También usó convencional efluente tratado como agua de reposición en una torre de enfriamiento en una industria de agro negocios (Durante L, *et al.* 2015). El escenario de escasez y los estudios presentados anteriormente muestran que la adopción de agua la reutilización es un paso importante y estratégico para lograr desarrollo, especialmente desde el punto de vista del posible medio ambiente, beneficios económicos y sociales que se pueden lograr

(costo reducción, aumento de la productividad, minimización de los impactos ambientales del uso incontrolado de agua, etc.) (Gutterres M, *et al.* 2010).

En este contexto, este estudio tiene como objetivo realizar un mapeo del agua oportunidades de reutilización en las torres de enfriamiento de una industria petroquímica, lo que podría ahorrar grandes volúmenes de agua extraída directamente de las fuentes de agua. Este es un caso a escala industrial estudio y la relevancia del trabajo se distingue por la aplicación de un enfoque heurístico basado en la explotación de conocimiento adquirido durante el proceso de búsqueda y por datos reales obtenido de la investigación de campo.

Resultados del consumo de agua y caracterización de corrientes de agua en un proceso petroquímico obtenido en este trabajo son relevantes para futuros estudios en esta área, una vez real los datos de las actividades industriales generalmente no están disponibles.

Los resultados muestran un gran potencial para la reutilización de efluentes en la industria petroquímica y puede reducir significativamente el volumen de agua obtenida directamente de fuentes de agua. La reutilización basada en cascada también puede ahorrar gastos en tratamiento de agua y aguas residuales. Resultados del agua consumo y caracterización de diferentes corrientes de agua en un proceso petroquímico obtenido en este trabajo son relevantes para el futuro estudios en esta área, una vez que los datos reales de distinguido industrial las actividades generalmente no están disponibles.

4. Propuesta de Alternativas para el Reúso de Aguas en la GRB

Las alternativas planteadas se basarán en el mapa de aguas de la refinería, a partir de la reutilización y redistribución de algunas corrientes de aguas industriales del proceso, con el fin de disminuir los contaminantes y el flujo en la carga que se requiere reutilizar.

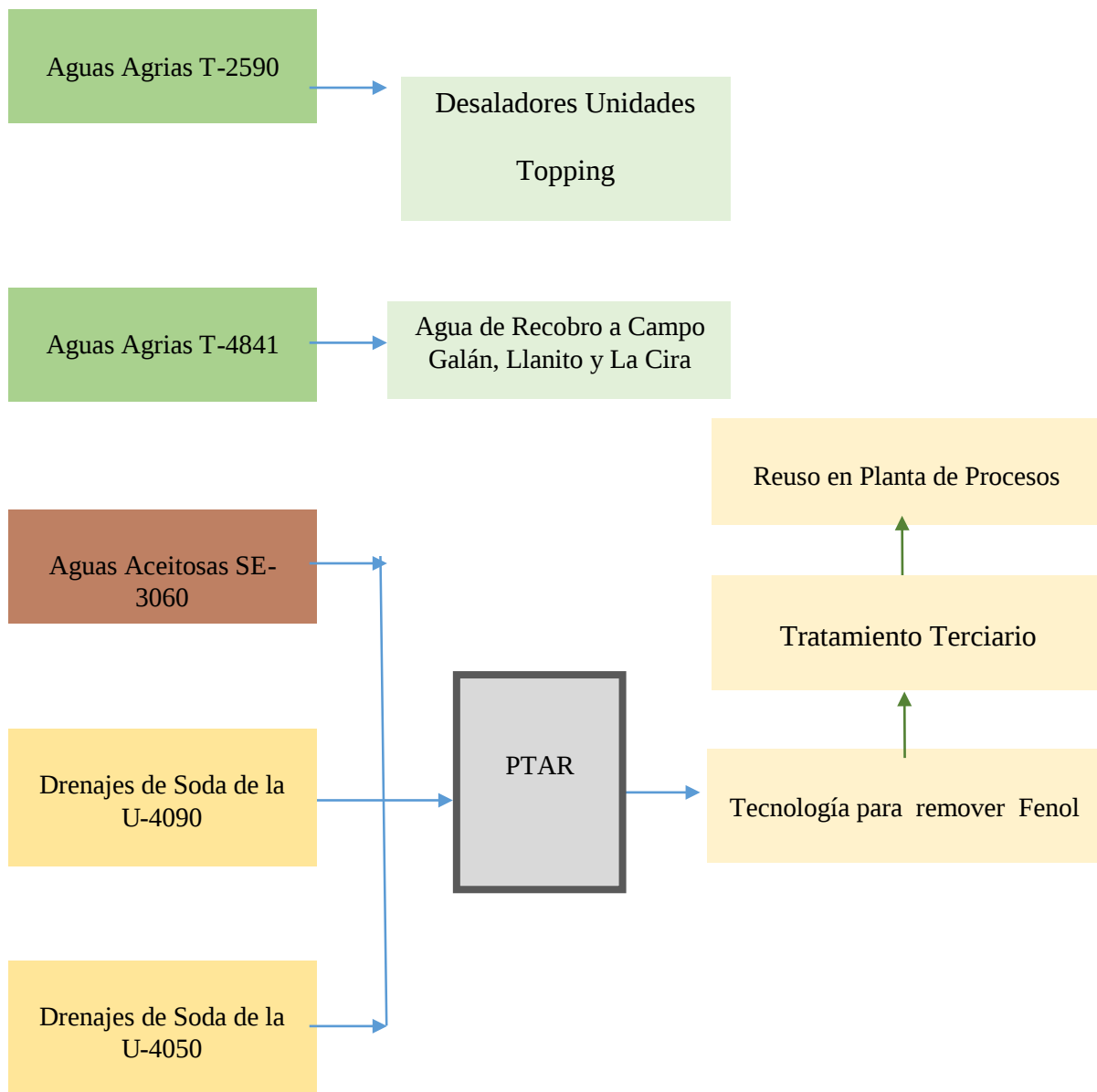


Figura 7. Propuesta de nueva estructura para reúso de aguas residuales de la GRB.

4.1 Reúso de Aguas Agrias en Desaladores

Las aguas agrias son aguas residuales industriales procedentes de los procesos petroquímicos de refinería y están compuestas por diferentes vertimientos generados en varias etapas de refinación

y petroquímica. Por ejemplo, en las etapas de destilación primaria y de vacío de las UDCs, se generan condensados agrios, así como en las etapas de fraccionamiento precedentes a los procesos de rompimientos térmicos y catalíticos. La combinación de estos condensados de diversa naturaleza se denomina aguas agrias.

En la GRB las aguas agrias se generan en las plantas de Orthoflow, Modelo IV, parafinas, Cracking UOP1, Cracking UOP2 y Unibón. Las aguas agrias, contienen principalmente compuestos fenólicos, sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, cianuros, cloruros, nitrógeno amoniacal e hidrocarburos cuya concentración depende tanto de la carga de hidrocarburo tratada, como de la operación, así como de la eficiencia de los procesos de despojo.

A nivel mundial, muchas refinerías utilizan las aguas agrias en los procesos de desalado de crudos, con el fin de ir cerrando los ciclos de producción. La GRB, no puede ser ajena a estas prácticas, que apuntan a la reducción de costos y a la disminución de la contaminación ambiental. Por esta razón el objetivo de esta aplicación se centra en el diseño conceptual de facilidades para transportar las aguas agrias desde su sitio de generación, hasta la red independiente de distribución de agua clarificada a los desaladores de las UDCs, con el fin de que esta agua, pueda reusarse en dichos sistemas, mejorando de esta forma el suministro de agua en los procesos de desalado en cuanto a cantidad y calidad. La implementación de esta alternativa, además de contribuir al mejoramiento de los sistemas de desalado de crudos; contribuye a la disminución en el consumo de agua fresca y en la cantidad de agua residual a tratar; y lo más importante, a una disminución sustancial en el aporte de compuestos fenólicos al sistemas de aguas aceitosas; contribuyendo de esta manera, al logro de uno de los principales compromisos ambientales de la Empresa como es el del cumplimiento de las normas ambientales en lo referente a la descarga de fenoles en el vertimiento.

La GRB en cumplimiento de los requerimientos ambientales de ley, cuyo compromiso está consignado en nuestro plan ambiental, tiene contemplado como uno de los puntos de interés, la disminución de la concentración de fenoles en el vertimiento de las aguas residuales; es así como a través del Instituto Colombiano del Petróleo se vienen desarrollando diferentes proyectos que apuntan al logro de este objetivo. Dentro de estos proyectos se cuenta el reúso de aguas agrias en procesos de desalado de crudos, evitando de esta forma que la totalidad de la carga de fenoles contenidos en esta agua, vaya directamente a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, dificultando el proceso biológico existente, para la reducción de fenoles en el vertimiento al río.

El uso de aguas agrias despojadas es una de las prácticas utilizadas en muchas refinerías alrededor del mundo. El agua agria despojada debe cumplir con las características de calidad requerida para no afectar negativamente la operación de los desaladores. Actualmente en la GRB se tiene implementada esta práctica, A continuación, se enuncian generalidades del proceso de desalado.

4.1.1. Proceso de Desalado de Crudo. El proceso de desalado permite eliminar las sales e impurezas que tiene el crudo de carga a las unidades de destilación (Topping). Mediante el desalado es posible remover las sales solubles en agua y algunos sólidos insolubles, las cuales en gran medida son responsables de ensuciamiento y corrosión en diferentes unidades del proceso de refinación (figura 8).

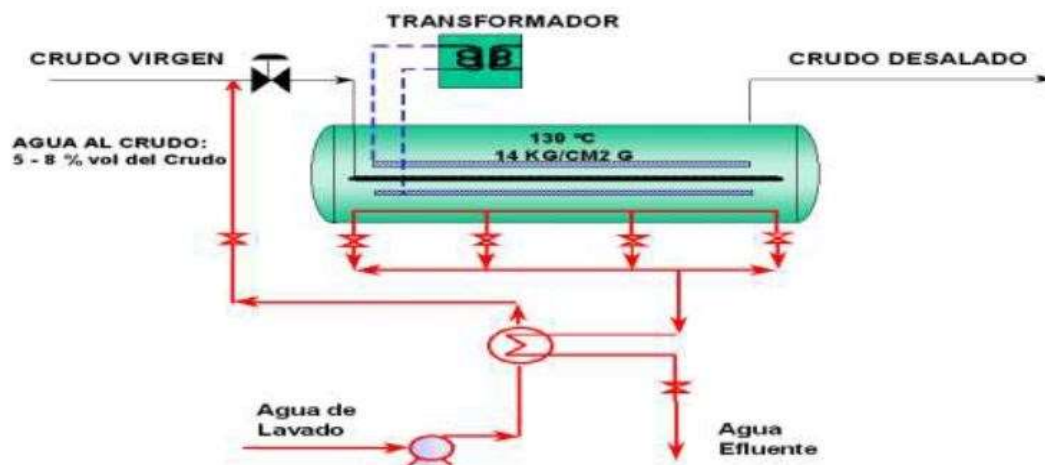


Figura 8. Esquema general Desalador de Crudos.

Nota. Adaptado de: Mateiras FI (s.f.) Refinería recuperado de:
<http://materias.fi.uba.ar/7605/Archivos/Refineria.pdf>

El proceso de desalado consiste en precalentar el crudo para disminuir su viscosidad, inyectar agua de lavado, llevar a cabo una disolución de las sales presentes en el crudo en el agua inyectada y posteriormente separar esta agua del crudo. Actualmente en el proceso de desalado se tiene la opción de utilizar agua clarificada, condensados de vacío de los procesos de las unidades de Topping y agua agria despojada.

4.1.2. Variables de Operación en el proceso de desalado de crudo Mantener las variables de operación de un desalador dentro de los límites permisibles es fundamental para su buen funcionamiento y entrega de producto. Las variables de este proceso son: el caudal de carga, la temperatura, la presión y porcentaje de agua de lavado (Ecopetrol S.A, 2014).

Caudal de carga: El flujo de carga puede trabajarse hasta 10% por encima de la capacidad de diseño sin afectar su rendimiento. En la tabla 7 se presentan dos factores importantes a tener

en cuenta, en primer lugar, la cantidad de aguas agrias que puede recibir cada Topping, este valor corresponde a utilizar 6% del volumen respecto a la carga de crudo en cada unidad. En operación normal de las plantas de tratamiento de aguas agrias (450-550 gpm de carga), toda el agua requerida por las Unidades de Topping, para el proceso de desalado podría ser suministrada por la red de aguas agrias y el excedente enviado a PTAR. En segundo lugar, la presión mínima que se requiere a la entrada de los tambores en las Topping para garantizar el suministro de aguas agrias.

Tabla 7.

Condiciones Agua de lavado a desaladores

Unidad	Tanque de carga de Agua	Agua de lavado requerida [gpm]	Presión a la entrada de tambores de carga [psia]
U-150	D-151	65	30
U-200	D-221	140	30
U-250	SK-251	78	30
U-2000	D-2004	105	30
U-2100	D-2105	62	30

Nota. Adaptado de: Ingeniería conceptual para el reúso de aguas agrias en desaladores de la GRB.

Temperatura: El rango de temperatura seleccionado depende de la densidad, viscosidad, conductividad eléctrica, contenido de sal y BSW del crudo. A mayor viscosidad del crudo se requiere mayor temperatura para facilitar la separación del agua. La máxima temperatura esta generalmente determinada por el límite de resistencia mecánica y térmica de los aisladores de teflón de 155°C (311°F), por la solubilidad del agua en el crudo, la conductividad eléctrica y el

punto de intersección entre las curvas de gravedad específica del crudo y del agua. Generalmente la máxima y económica temperatura de operación está alrededor de los 145°C +/- 10 °C.

Presión: La presión en el desalador debe mantenerse en un valor que evite la ebullición tanto del crudo como del agua a las condiciones de temperatura de operación, ya que esto causaría una fuerte turbulencia y un remezcla del crudo y el agua dificultando la separación de las fases. Para prevenir este fenómeno, la presión de operación del desalador debe ajustarse por lo menos 25 Psi por encima de la presión de vapor del sistema la cual corresponde a la suma de la presión de vapor real del crudo y a la presión de vapor real del agua. (Una alta presión no tendrá efectos sobre la eficiencia del desalador).

Agua de lavado: La cantidad de sal 3.1.2.3 contenida en el crudo, esta normalmente en forma de pequeñas gotas de salmueras dispersas y cristales de sal suspendidos en fase oleica. El proceso de desalado consiste en la reducción de la concentración de sal de las pequeñas gotas de salmuera dispersas por efecto de un íntimo mezclado con el agua de lavado y la posterior separación de fases en el desalador.

La calidad de agua acompañada de una buena mezcla debe ser suficiente para asegurar dicho contacto y una efectiva remoción de las impurezas insolubles en aceite, principalmente sales, y obtener una densidad óptima de gotas por unidad de volumen en el campo eléctrico. El rango más satisfactorio, según la práctica, está entre el 5% y 10% de agua con respecto a la carga de crudo. Se pueden considerar tres tipos de aguas como alternativas típicas para lavado de crudo en los desaladores:

- Agua no despojada de las columnas de destilación (condensados)
- Aguas agrias de procesos (despojadas)
- Condensados des aireados de agua de calderas

El agua nunca debe inyectarse antes de la bomba de carga ya que, por el alto esfuerzo de corte, puede formar una emulsión difícil de separar. Se recomienda inyectar una cuarta parte del agua antes del tren de precalentamiento y el resto en un sistema de mezcla crudo/agua, instalado un poco antes de la entrada al desalador.

El propósito del mezclado es lograr que las pequeñas gotas de salmuera y sólidos suspendidos que vienen en el crudo entren en contacto con el agua de lavado. Tradicionalmente en las unidades de desalado se utilizan válvulas de mezcla para este propósito, donde la intensidad de mezclado es controlada por la caída de presión de la válvula. Estos sistemas presentan desventajas debido a su corta zona de mezcla y a los extremadamente altos esfuerzos de corte localizados lo que conlleva a la formación de emulsiones estables de difícil separación, resultando en un alto contenido de agua en el crudo desalado.

Rompedores de emulsión: En muchos casos se requiere el uso de demulsificantes para la correcta operación del desalador. La cantidad y tipo de demulsificante a ser inyectado depende del tipo de crudo y/o las impurezas contenidas en el crudo. La velocidad de inyección de este tipo de químicos puede estar entre 5-10 mg/kg de crudo. Por razones de mezclado, generalmente el punto de inyección debe estar antes de la bomba de carga, para aprovechar la turbulencia generada en el impulsor de la bomba.

4.1.3. Reúso De Agua Agria En Los Desaladores. Los procesos de desalado en la mayoría de las refinerías del mundo, están relacionados con los sistemas de aguas agrias; normalmente el agua agria despojada es usada como agua de lavado en los desaladores siempre y cuando se suministre con niveles aceptables de contaminantes (amonio <150 ppm y H₂S < 20 ppm); estos límites se requieren para evitar corrosión en las unidades corriente abajo.

La sal contenida en el crudo, esta normalmente en forma de pequeñas gotas de salmueras dispersas y cristales de sal suspendidos en fase oleica. El proceso de desalado consiste en la reducción de la concentración de sal de las pequeñas gotas de salmuera dispersas por efecto de un íntimo mezclado con el agua de lavado y la posterior separación de fases en el desalado. La eficiencia del proceso de desalado depende de la cantidad y calidad de agua de lavado que se inyecta en los desaladores. En cuanto a su cantidad, el rango más satisfactorio está entre el 5-10 % de agua de lavado con respecto al volumen de crudo a tratar.

Por otra parte, el agua de inyección para desalado de crudos debe tener la siguiente calidad:

- pH entre 5.0 y 8.0
- Bajo contenido de amoníaco (<150 ppm)
- Bajo contenido de sulfuros (<20 ppm)
- Cloruros <100 ppm
- Baja concentración de sólidos
- Carbonato de calcio <150 ppm
- Oxígeno disuelto <100 ppb

Los procesos de desalado en la mayoría de las refinerías del mundo, están relacionados con los sistemas de aguas agrias; normalmente el agua agria despojada es usada como agua de lavado en los desaladores siempre y cuando se suministre con niveles aceptables de contaminantes.

4.1.4. Agua de Lavado en los Desaladores de la GRB Los desaladores de la GRB utilizan agua clarificada, agua Miramar y algunos condensados de las UDCs en diferentes proporciones de mezcla. La cantidad de agua que se ha venido utilizando en los procesos de desalado en la GRB es insuficiente para lograr un buen desalado de los crudos; aproximadamente entre 180 y 200 gpm

lo cual corresponde a una relación agua/crudo menor al 3 %, en promedio. Una relación apropiada debe estar entre el 5 % y el 8 % incluso hasta 10 % de ser necesario dependiendo de la calidad de los crudos. Un valor apropiado para nuestro caso debe ser de mínimo un 6 % equivalente a 420 gpm de agua para una carga de 240,000 bpd de crudo.

El efluente de aguas agrias despojadas en la T- 2590 Y T-4841 procesando todas las aguas agrias actuales de la refinería debe ser de 500 a 600 gpm, y 50 gpm adicionales de los futuros sistema de Hidrotratamiento de diésel y gasolina. Con lo cual se puede concluir que se cuenta con agua agria despojada suficiente para reemplazar toda el agua requerida en los procesos de desalado de las UDCs de la GRB. En el Apéndice B se presentan las características fisicoquímicas de las aguas de inyección y efluentes de los desaladores de la GRB.

4.1.5. Propuesta Del Diseño Para El reúso De Las Aguas Agrias A Desaladores. Este trabajo de aplicación plantea la ingeniería conceptual de la línea para transportar el agua agria desde el punto de interconexión con la línea existente para este fin, hasta el empalme con la red independiente de suministro de agua clarificada a los procesos de desalado de las UDCs. En la figura 9 se observa el diagrama que se realizó la simulación de la hidráulica del sistema, utilizando HYSIS y teniendo en cuenta las distancias, los cambios de altura, la ruta, el caudal, la complejidad de la red de suministro del agua a los desaladores y los requerimientos de presión a la entrada de los sistemas de desalado. Así mismo como apoyo para el diseño se tomo parte del desarrollo realizado en el trabajo "Red independiente de suministro de agua clarificada a desaladores de las UDCs de la GRB". El alcance incluyó un análisis hidráulico de la línea y la red de suministro de agua agria a los desaladores, desde la salida de la T-2590 hasta cada uno de los tambores de suministro de agua a desaladores.

2	8	984.25	450	30,7	20,6	Del Tie-in 7 a derivaciones a la U2000 y 2100.
3	8	114.82	283	20,6	33,2	De derivaciones U2000 y U2100 a derivación U250
4	6	508.53	205	33,2	34,5	De derivación U250 al Tie-in 1
5	6	246.06	205	34,5	34,1	De Tie-in 1 a derivación U150
6	4	606.95	140	34,1	28,1	De derivación U150 al D221 (de la U200)
7	3	262.46	65	34,1	23,3	De derivación U150 al D151 (de la U150)
8	4	328.08	78	33,2	35,3	De derivación U250 al TK nuevo (de la U250)
9	3	442.91	62	20,6	21,2	De derivación U2100 al D2105 (de la U2100)
10	3	328.08	105	20,6	26,8	De derivación U2000 al D2004 (de la U2000)

La bomba con la cual se realizará la transferencia de la torre de aguas agrias a los desaladores de TOPPING, tiene las características que se especifican en la tabla 9.

Tabla 9.

Referencia bomba de carga de aguas agrias a desaladores

DATOS DE LA BOMBA P2593 A/B	
Marca	: Ingersol Dresser Pump
Type	: SVCN6
Flujo	: 550 gpm

DATOS DE LA BOMBA P2593 A/B

Cabeza	: 283 ft (aproximadamente 123 psi)
RPM	: 3570
Fluido	: Agua

Además, se propone un sistema de control a nivel conceptual en la línea de aguas agrias, a la llegada de la PTAR, que garantice la operatividad de la despojadora (en cuanto a nivel de operación), y el suministro de agua a los tambores de los sistemas de desalado. También se presenta un análisis de los requerimientos de cantidad y calidad de agua en los desaladores y, por último, se da un valor estimado del costo de montaje del nuevo sistema.

Área de influencia de la propuesta del diseño y las planta que involucra, El Proyecto de reúso de Aguas Agrias en desaladores tiene incidencia directa sobre las unidades de despojo de aguas agrias (actual y futura), sobre las unidades de desalado en las unidades “Topping” y sobre la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Por una parte, la Torre despojadora de aguas agrias deja de enviar la totalidad de su efluente a la PTAR, generando un gran impacto positivo de tipo económico y ambiental en dicha planta, al tratar menor cantidad de agua y disminuir el aporte de fenoles y materia orgánica al proceso de biodegradación lo que implica una menor demanda de oxígeno disuelto en las piscinas de estabilización.

Por otro lado, en los desaladores se reducirá considerablemente el uso de agua clarificada con el respectivo ahorro por costos de producción de dicha agua. Además, el agua agria que reemplaza al agua clarificada, es de mejor calidad para el proceso de desalado debido a que no tiene oxígeno disuelto, lo que implica una disminución en los problemas de corrosión corriente abajo de los procesos de desalado de crudos.

Esta práctica de reúso del agua agria, implica que la torre despojadora T2590 y la nueva despojadora deban trabajar en condiciones estables, de tal forma que se pueda garantizar que las aguas agrias despojadas que se envíen a los sistemas de desalado mantengan unas características aceptables y tolerables por dichos procesos.

4.1.6. Propuesta de distribución de aguas agrias a los desaladores y sistema de control.

Actualmente el efluente de la torre T-2590 va por una línea de 6" hasta PTAR, esta alternativa propone re direccionar dicha corriente hacia los sistemas de desalado en el área de refinación, conservando la línea hacia el destino actual con las modificaciones de control necesarias para la correcta operación global tanto del proceso en las torres despojadoras como de los sistemas de suministro de agua agria a cada uno de los desaladores.

La línea de aguas agrias desde su punto de origen (torre despojadora en la Unidad de Balance), hasta la PTAR, y el nuevo destino (adicional) propuesto hasta su empalme en el con la "Red de suministro de agua clarificada a los desaladores de las UDCs" aprovechando al máximo los bancos de tubería y pasos en *box colver* existentes. La conexión de la nueva línea de agua agria permite el suministro de esta agua a todos los sistemas de desalado de las Topping y con el sistema de control adicional propuesto, el cual consiste en una válvula de control de presión localizada en la línea a la llegada de la PTAR, la cual tiene como fin garantizar el funcionamiento del sistema de control de la T-2590, dejando pasar hacia la PTAR el agua agria en exceso y que no se utiliza en los desaladores.

En la figura 10 se muestra la red de suministro de agua agria despojada a los desaladores de las Unidades de Topping y PTAR, la línea roja indica el recorrido de salida de las torres de aguas agrias a la PTAR GRB sin el sistema de reúso.

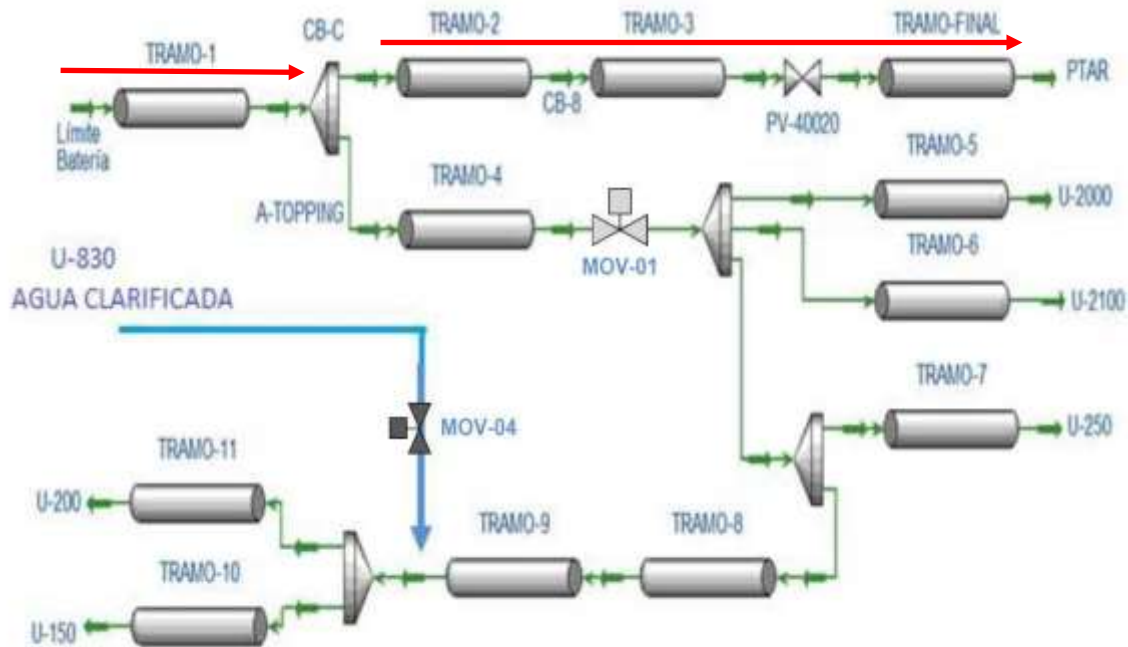


Figura 10. Red de distribución de aguas agrias a desaladores.

A continuación, en la tabla 10, se encuentran las características de la tubería en cada tramo representado en la red de aguas agrias a las unidades de Topping y PTAR, diámetros y longitudes equivalentes (incluyen los accesorios en la línea). Los datos para la ruta hasta PTAR, fueron obtenidos por medición en Campo, debido a que no se encontraron isométricos para esta línea. La información de la ruta a Topping fue tomada de la Ingeniería para el Reúso de aguas agrias en los desaladores de la GRB y verificados en los isométricos de las líneas.

Tabla 10.

Características tuberías red aguas agrias despojadas a Topping y PTAR.

Tramos	Desde	Hasta	Diámetro Nominal (In)	Longitud Equivalente (ft)
Tramo 1	Límite de batería	Casa Bombas C	6	1976
Tramo 2	Casa Bombas C	Casa Bombas 8	6	1961
Tramo 3	Casa Bombas 8	Antes PVC-40020	6	3270
Tramo Final	Antes PVC-40020	PTAR	6	700
Tramo 4	Casa Bombas C	Derivación a U-2000, U2100 y U-250	8	6764.3
Tramo 5	Derivación en TR-4	U-2000	3	355.8
Tramo 6	Derivación en TR-4	U-2100	3	555.3
Tramo 7	Derivación en TR-4	U-250	4	535.3
Tramo 8	Derivación en TR-4 A CABEZAL DE 6"	Cabezal de 6"	6	2303.4
Tramo 9	Cabezal de 6"	Derivación a U-150 y U200	8	865.8
Tramo 10	Derivación a U-150 y U200	U-150	3	342.2
Tramo 11	Derivación a U-150 y U200	U-200	4	922.9

4.1.7. Beneficios del Reúso de Agua en los Desaladores Debido a que esta agua posee a menudo una concentración de sulfuro entre 100 y 2000 ppp, además de amonio, cianuros y fenol, antes de ser enviadas a posteriores tratamientos o a reúso, deben someterse a un proceso de despojo donde se elimina del 90 al 99% de los sulfuros, del 90 al 95 % del amonio, un alto porcentaje de los cianuros y una mínima parte de fenoles. Por lo tanto, esta agua debe ser sometida

posteriormente a un proceso de biodegradación, en piscinas especiales, para eliminar al máximo los fenoles antes de su disposición final.

La alternativa de utilizar las aguas agrias despojadas en sistemas de desalado es muy atractiva tanto técnica como económicamente, ya que estas aguas poseen bajas concentraciones de sólidos suspendidos y sulfuros, y no contienen oxígeno disuelto. Por otra parte, la carga de fenoles al contacto del agua con el crudo, se transfiere hacia el crudo en un alto porcentaje.

4.1.8. Impacto Ambiental del reúso de Aguas Agrias en Desaladores En los procesos de refinación y petroquímica los usos que se le dan al agua son: generación de vapor, enfriamiento de equipos, lavado de productos, potabilización, tratamiento para servicio industrial, sistemas de contraincendios, etc, siendo muchos los procesos involucrados y gran cantidad de agua residual generada con una amplia gama de contaminantes. La GRB buscando cumplir con sus compromisos ambientales en cuanto a la preservación de las fuentes de agua, requiere involucrarse de lleno en el proceso de reúso de sus propias aguas, disminuyendo de esta forma, los costos de tratamiento y el impacto ambiental que genera el vertimiento permanente de agua contaminada a los cuerpos receptores.

4.1.9. Impacto Económico del reúso de Aguas Agrias en los desaladores Por otro lado, existe la variable económica relacionada con el reúso, lo que implica un menor volumen de aguas tanto de captación como residuales a ser tratadas. En la Tabla 11 se presentan los costos relacionados con el montaje de la línea de aguas agrias en 8" de 1900 metros aproximadamente, desde la conexión de la línea actual de aguas agrias, con la nueva red de suministro de agua clarificada a los desaladores de las UDCs. Y un tramo adicional en 8" de 334 metros que tendría

que construirse en caso que se decida cambiar el tramo de 10" existente, hasta la interconexión con las U-2000, U-2100 y U-250.

Tabla 11.

Estimado de costos para la línea de aguas agrias hasta la red de suministro a desaladores

ITEM	CANTIDAD	VALOR
TUBERIA, 8" SC 40	2330 m	\$ 680'000.000
ACCESORIOS	GLOBAL	\$ 45'000.000
MONTAJE Y CONTRUCCION	GLOBAL	\$ 370'000.000
TOTAL		\$ 1.095'000.000

En la Tabla 12 se puede observar el cálculo del ahorro anual por el reemplazo del 100% del agua clarificada usada en los procesos de desalado, por agua agria despojada.

Tabla 12.

Ahorro anual por consumo de agua agria

Desalador	Carga Total Curdo [Bl/día]	Carga promedio de Agua [Bl/día]	Agua de lavado [%]	Ahorro anual [Pesos]
D-253	38000	1400	3,7 - 4%	31,370,976
D-2101/2101 A	38000	990	3 - 3,5%	22,183,560
D-2001	38000	600	1%	13,444,560
D-222	38000	2240	2,80%	50,193,576
D-152	28000	1000	3,5 - 4%	22,407,840
Total Ahorro				139,600,512

Nota. Adaptado de: ECOPETROL S.A. Instituto Colombiano Del Petróleo – (2004). Reúso de Aguas Agrias en Desaladores de la GRB

La Tabla 12 muestra que la carga de agua a los desaladores oscila entre el 1% y el 4% de la carga total de crudo al equipo, sin embargo la literatura recomienda lavados con agua promedio del 5% a 8% de la carga total; compañías como Shell hablan incluso de valores entre 5% y 10%. De esta forma se observa que, si se incrementa el porcentaje de agua de lavado en los desaladores, podría aprovecharse aún más el reúso de la misma y disminuir el impacto ambiental que se genera al ser enviada al sistema de tratamiento de aguas residuales. En caso de utilizar las aguas agrias en un 6%, reemplazando el agua clarificada, se estiman ahorros cercanos a los \$298 millones por año. Esta práctica reduciría la carga anual de fenoles a la PTAR en cerca de 162 toneladas. Para el cálculo se estimó que el 80% de los fenoles contenidos en esta agua son removidos en el desalador.

4.1.10 Potenciales Problemas del Reúso de Agua Agria en los desaladores La utilización de las aguas agrias en desalado puede tener consecuencias directas en tres aspectos de interés:

- Eficiencias de desalado
- Eficiencias en el desalador
- Corrosión en la planta de crudo

Las eficiencias del desalado son afectadas por altos contenidos de cloruros en las aguas agrias despojadas que van a ser reusadas como agua de desalado. Según las caracterizaciones del agua agria de la GRB, el contenido de cloruros es bajo, por tanto, este problema no aplica.

Las eficiencias en el desalador son afectadas por los parámetros de pH y concentración de amonio de las aguas de lavado. Estos dos parámetros pueden originar problemas de emulsificación del crudo en el drum de deshidratación. En este aspecto en la literatura se encuentran discrepancias entre los valores de amonio aceptables (algunos autores hablan de máximo 40 ppm, otros consideran operaciones sin problemas con concentraciones de amonio entre 200 –250 ppm). Con

respecto al pH, la literatura presenta rangos de manejo entre 5 y 8 en el efluente del desalador; sin embargo, es recomendable no usar aguas de lavado con pH superiores a 7.5, ya que causan reducción de la tensión interfacial, incrementando el riesgo de emulsificación. Los problemas de emulsificación pueden ser mitigados en buena parte con el uso de los nuevos sistemas de contacto, en reemplazo de las válvulas mezcladoras, las cuales producen emulsiones de agua en el hidrocarburo mucho más fuertes, por los altos esfuerzos de corte.

Problemas de corrosión en la planta de crudo pueden ser originados por una mala calidad de las aguas agrias despojadas principalmente por las altas concentraciones de cloruros, H_2S , N_3H , cianuros y presencia de oxígeno. El estudio de la fenomenología de la corrosión en plantas de crudo y las variables que lo afectan, pueden servir como guías que permitan predecir la existencia de problemas serios de corrosión en la implantación de esta práctica de reúso. A continuación, se señalan algunos componentes que pueden llevar las aguas agrias despojadas y que originan problemas de corrosión:

Amonio: un pH superior a 7.5 en el agua de lavado aumenta la transferencia de amonio al crudo, lo cual implica formación y precipitación de sales de amonio, las cuales de no ser removidas por un lavado adecuado producen corrosión.

Oxígeno y agentes oxidantes: Las fuentes de oxígeno la constituye el aire que se introduce por las grietas o huecos en las bombas de reflujo o descarga de la torre despojadora hacia desaladores. La presencia de azufre libre en la cima de la unidad de crudo puede confirmar el ingreso de oxígeno al sistema. El oxígeno acelera la corrosión acuosa en presencia de H_2S (cuatro veces).

El ácido sulfhídrico: El H_2S es un compuesto muy corrosivo bajo una variedad de condiciones de pH y temperatura, y su acción corrosiva toma lugar por diferentes mecanismos:

- Combinación de H_2S con Fe o sus aleaciones formando depósitos de FeS a temperaturas superiores $204^{\circ}C$ ($400^{\circ}F$). Este fenómeno se llama sulfidación a alta temperatura.
- Corrosión por H_2S cuando se disuelve en agua; la cual ocurre en la cima de las unidades de destilación de crudo donde la condensación del agua tiene lugar. La solubilidad de H_2S se incrementa al disminuir la temperatura y al aumentar el pH; luego se tiene que la velocidad de corrosión es mínima en la región ligeramente ácida para un pH entre 5 y 6, y máxima en la región alcalina donde el H_2S aumenta su solubilidad.

4.1.11. Conclusiones Con los análisis físico-químicos realizados a las corrientes de salida de las aguas agrias de las T-2590, el análisis hidráulico se observó que viable en su totalidad el reúso de las aguas agrias a los desaladores de las UDCs. Las plantas de aguas agrias deben garantizar un buen despojo de las aguas agrias, que permita un pH y una calidad adecuada que garantice el uso de este tipo de agua en los desaladores de crudo, sin afectar su operación. Adicionalmente, para poder garantizar el uso de la mayor cantidad posible de aguas agrias se verá reflejado en cuanto al mejoramiento ambiental, ya que se evitará ser vertida a las aguas residuales. Logrando este reúso de aguas el ahorro en el tratamiento químico necesario para poder obtener tener estas aguas dentro de los parámetros establecidos son muy elevados.

4.2 Reúso de Aguas Agrias para proceso de recobro

En el presente documento se realiza una descripción de las actividades desarrolladas por el equipo de trabajo conformado por la GRB, GMR, GDY, GMA y el ICP, que permitirán identificar los requerimientos específicos para lograr la “Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de

Recobro”. Se presenta información general de la alternativa: proyecto de tratamiento de agua de la GRB, los balances de agua requeridos para los proyectos de inyección en recobro, estudios adelantados por el ICP, calidad de agua, que permitan orientar acciones futuras en el desarrollo de dicho proyecto. Adicionalmente, se incorporan hallazgos realizados sobre los riesgos ambientales, legales, sociales, técnicos, sostenibilidad de la demanda, ciclo de vida, tratamiento químico requerido, seguridad, inversión.

Por otra parte, en la VRC y VAS se tienen implantados y/o finalizados proyectos de inyección de agua (Campos Casabe y La Cira Infantas), así como también pilotos de inyección de agua en los campos Galán, Llanito, Provincia y Tisquirama, en estos últimos campos la GMR y la GDY han determinado la factibilidad de pasar de la fase de piloto de inyección de agua a fase de expansión. Cabe destacar, que actualmente en los campos Casabe y La Cira Infantas se está utilizando agua de captación para completar los volúmenes requeridos de inyección, ya que el agua producida no es suficiente para alcanzar dichos volúmenes de inyección de agua. Similar evento ocurrirá con la fase de expansión de los proyectos de inyección (Galán, Llanito, Provincia y Tisquirama), que se tendrá que utilizar agua de captación.

En la figura 11, se muestra el cronograma estimado para los proyectos de recobro en la VRC en campos cercanos a la GRB, donde se puede reusar las aguas de la GRB para reinyección:



Figura 11. Cronograma estimado para los proyectos de recobro en campos de la VRC.

4.2.1. En Proyectos de Recobro en Pozos Estudios realizados muestran la viabilidad de “Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro”, que permitirá definir la factibilidad de uso de dichas aguas de la GRB y el tratamiento requerido para el cumplimiento de calidad y límites permitidos en agua. Adicionalmente, presentar los principales riesgos identificados para la viabilidad de utilización del agua de la GRB para inyección en los campos cercanos a la Refinería para presentar los resultados en el comité de Start Up de la presidencia de la empresa.

Por otra parte, en la Vicepresidencia Regional Central (VRC) y Vicepresidencia de Abastecimiento y Servicios (VAS) se tienen implantados y/o finalizados proyectos de inyección de agua (Campos Casabe y La Cira Infantas), así como también pilotos de inyección de agua en los campos Galán, Llanito, Provincia y Tisquirama, en estos últimos campos la Gerente de Recobro Mejorado (GMR) y la Gerencia de Estrategia de Desarrollo de Yacimientos (GDY) han determinado la factibilidad de pasar de la fase de piloto de inyección de agua a fase de expansión. Cabe destacar, que actualmente en los campos Casabe y La Cira Infantas se está utilizando agua de captación para completar los volúmenes requeridos de inyección, ya que el agua producida no es suficiente para alcanzar dichos volúmenes de inyección de agua. Similar evento ocurrirá con la fase de expansión de los proyectos de inyección (Galán, Llanito, Provincia y Tisquirama), que se

tendrá que utilizar agua de captación. En la tabla 13 se presenta un consolidado del suministro de agua de la refinería.

Tabla 13.

Balance de agua GRB.

Área	Volumen Agua (gpm)	Volumen Agua (BWPd)
Salida Desaladores Topping Wenco U-200	500	17150
Torre de Enfriamiento T-2590	200	6860
Efluente Torre Despojadora Aguas Agrias T-4841	250	8575
Efluente Torre Despojadora Aguas Agrias T-2590	300	12005
Totales	1300	44590

Nota. Adaptado de: Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

4.2.2. Balance de Agua Proyectos Recobro Campos de la VRC En este numeral se mostrarán los perfiles de agua de formación para los potenciales campos conexos para el reúso de las aguas de la GRB: Cira Infantas, Casabe, Galán, Llanito, Provincia y Tisquirama. Como se puede apreciar en las Figuras 12 hasta la 17, a excepción del campo Casabe, el resto de campos: La Cira Infantas, Provincia, Tisquirama, Llanito y Galán, son candidatos potenciales para el reúso de agua de la GRB, debido al déficit de agua de formación comparado con los volúmenes requeridos de inyección de agua, por lo que tendrían que utilizar agua de captación para completar los objetivos.

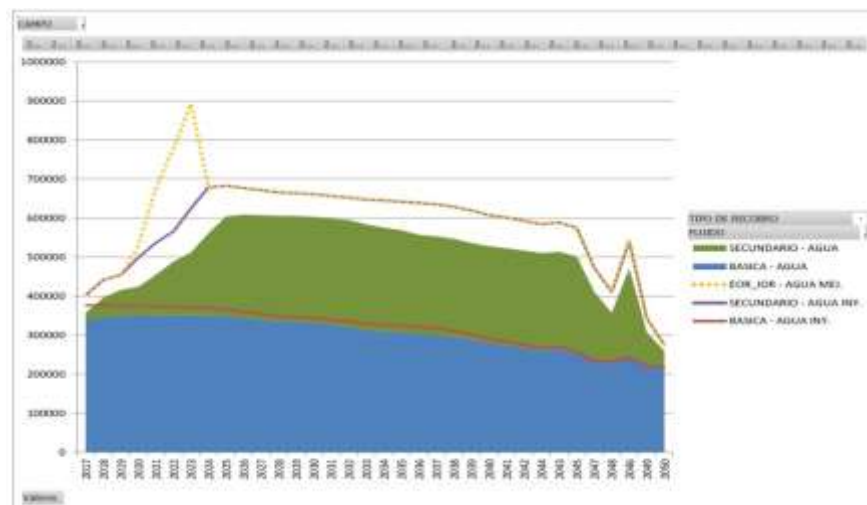


Figura 12. Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo La Cira Infantas.

Nota. Adaptado de Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

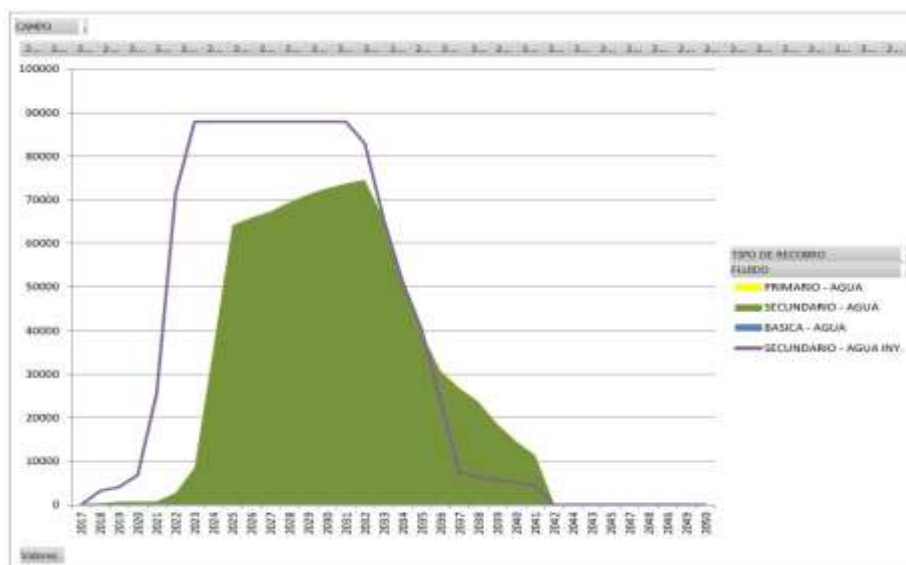


Figura 13. Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Provincia.

Nota. Adaptado de Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

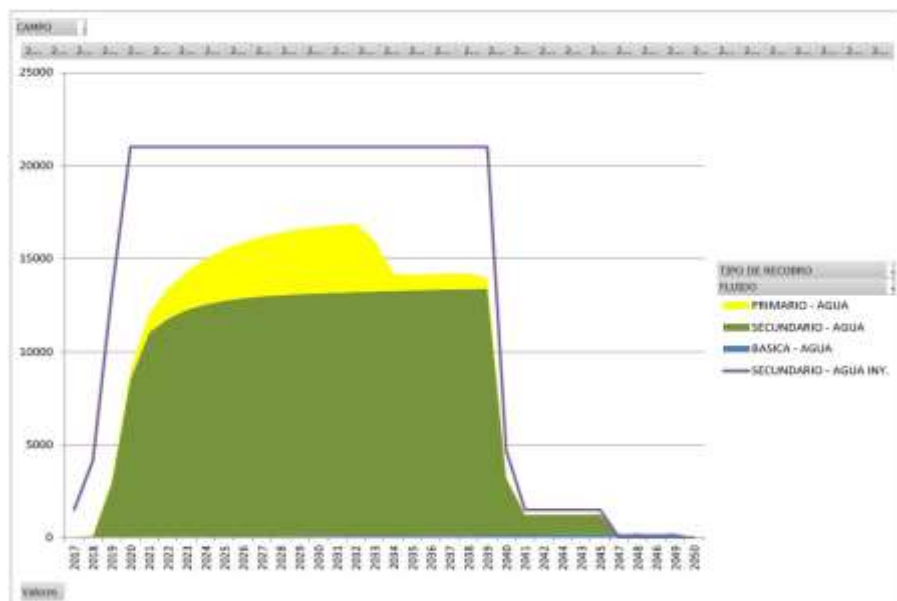


Figura 14. Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Tisquirama.

Nota. Adaptado de Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

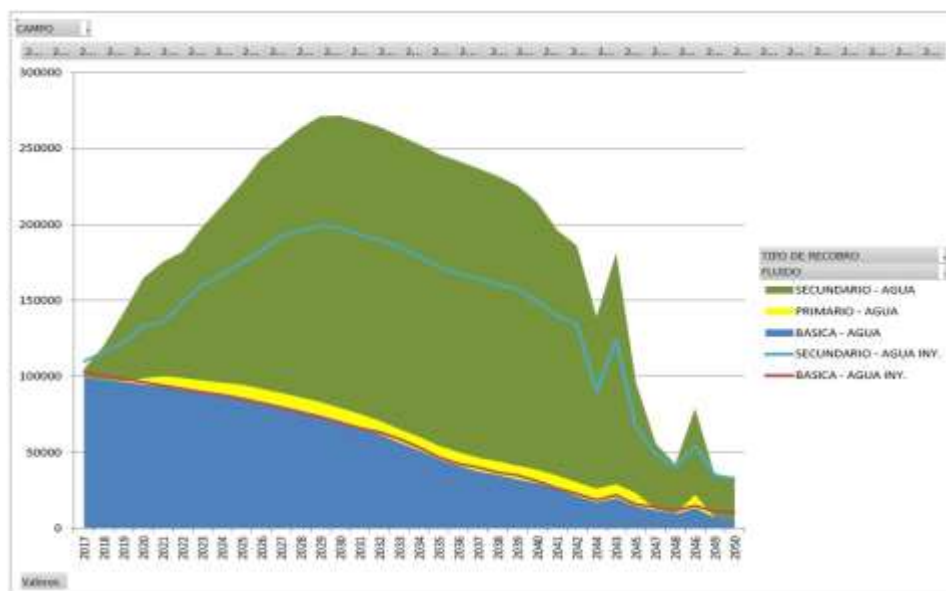


Figura 15. Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Casabe.

Nota. Adaptado de Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

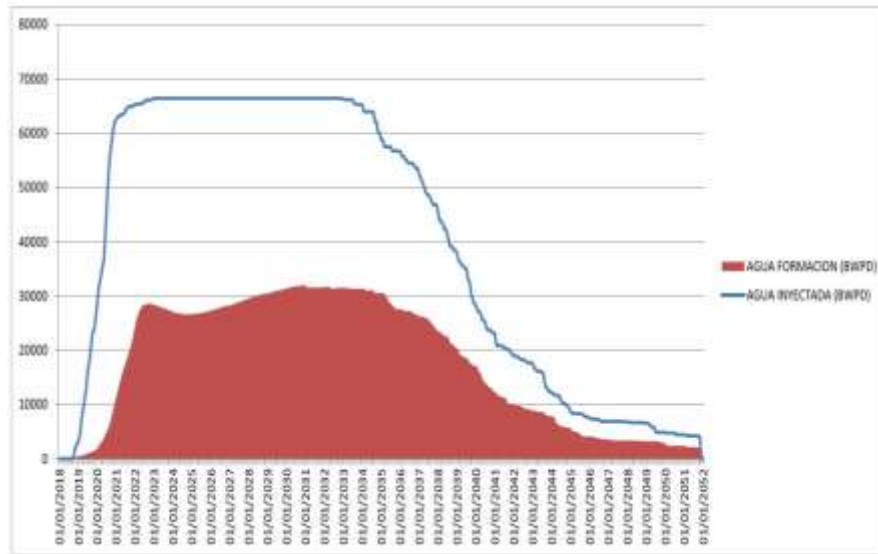


Figura 16. Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Llanito.

Nota. Adaptado de Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

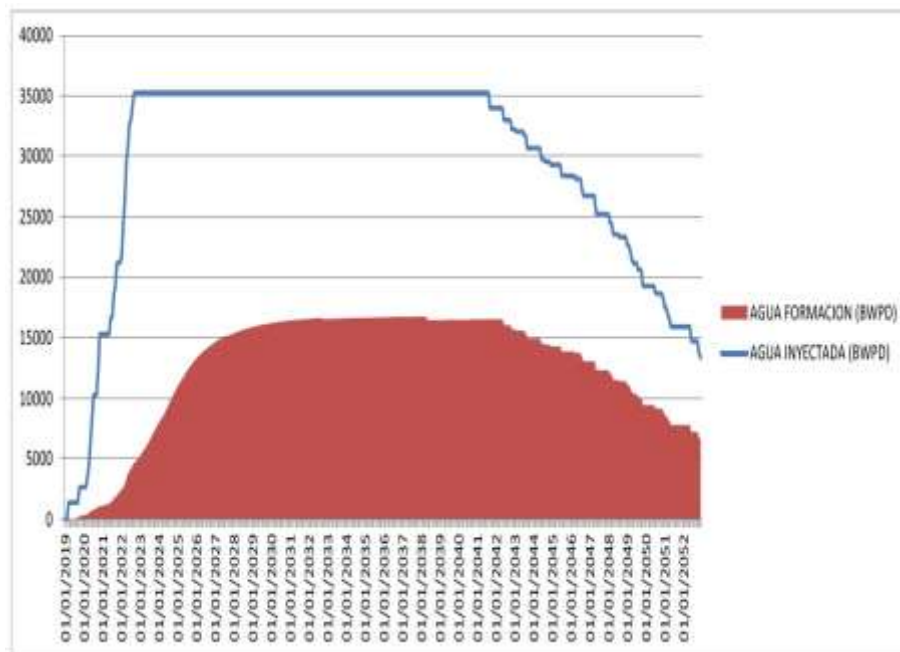


Figura 17. Perfil de agua de formación e inyección de agua del campo Galán.

Nota. Adaptado de Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

4.2.3. Calidad de Agua Reinyección La calidad del agua para inyección a los yacimientos de los campos candidatos para el reúso de la GRB, tiene influencia en el tipo de muestreo necesario e incluso en los parámetros que necesitan ser analizados *in-situ* y/o en forma continua. Para los análisis debe considerarse los siguientes criterios:

- Parámetros que exige la norma y/o criterio de calidad para inyección a yacimientos.
- Parámetros de diseño que se estime necesario para las facilidades de tratamiento de agua.
- Considerar análisis completos como referentes de calidad a monitorear.

La tabla 14 presenta los parámetros actualmente utilizados para calidad de agua de inyección:

Tabla 14.

Parámetros de calidad para agua de inyección a pozo.

Parámetros	Unidad	Especificación
Grasa y Aceites	ppm	<3,0
Sólidos Suspendedos [S.S.]	ppm	<3,0
Tamaño de Sólidos	µm	< 3
Oxígeno [O ₂]	ppb	< 1,0
Bacterias	ufc/ml	< 104
Hierro Disuelto como Fe ⁺⁺	ppm	< 1,0
Dióxido de Carbono disuelto	ppm	< 10,0
Cloruro [Cl ⁻]	ppm	13,249
Dureza Total	ppm	1,093
pH	---	6,5 - 7,5
Alcalinidad	ppm	200
Turbidez	NTU	< 2

Nota. Adaptado de: Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PROIF-001. 13 diciembre 2016.

4.2.4. Resultados Análisis del ICP Toda la información contenida en este numeral, se basa en el informe desarrollado por el ICP (ECOPETROL S.A.). Ya definidos los puntos del balance de agua de la GRB, (Tabla 18), se elaboró un plan conjunto GRB-GMR-GDY- Gerencia Operación de Mares (GMA) - Instituto colombiano de petróleos (ICP) para realizar toma de muestras y posterior análisis de compatibilidad con las aguas de producción de los campos potenciales objetivos.

Los análisis de mezcla de aguas en superficie de fuentes diferentes, para propósitos de inyección, son necesarios para determinar alteraciones en el equilibrio que pueden generar precipitados. Estos precipitados pueden adherirse a las paredes de la tubería hasta formar películas con espesores que pueden llegar a ser considerables o pueden afectar equipos (bombas, filtros, celdas de flotación, etc.). Por ello, es necesario hacer dichos estudios de compatibilidad entre las aguas candidatas a ser utilizadas como fluido de inyección y también con el agua de se encuentra en el yacimiento. El muestreo de las aguas de la GRB se realizó el 29-02-2016 por personal del ICP. El rango de fechas de ejecución de análisis fue en el periodo entre marzo - abril de 2016. Se realizaron estudios de compatibilidad entre el agua de producción utilizada habitualmente como fluido de inyección (Galán, Llanito y La Cira Infanta) y las cuatro fuentes de agua tomadas de la refinería, de los diferentes procesos mostrados en la Tabla 18. El objetivo fue verificar si existía alguna incompatibilidad entre estos fluidos desde el punto de vista químico ya que, al poder utilizarlos dentro del proceso de reinyección, podría permitir una disminución en los volúmenes de agua de vertimiento y contribuir a la reducción del impacto generado sobre los cuerpos de agua superficial. En la tabla 15 se presenta el análisis fisicoquímico de las muestras utilizadas en la simulación de compatibilidad de aguas involucradas.

Tabla 15.

Análisis fisicoquímico de las muestras utilizadas en la simulación.

No.	Fecha de Muestreo	Muestra	Parametro											
			Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Ba mg/l	Sr mg/l	Fe mg/l	ST D mg/l	Salinidad mg/l NaCl	Turbidez NTU	SIO mg/l	Formiatos mg/l
1	05/08/2014	Entrada Planta PTAR I Galan	14900	71,8	4042	226	82,6	128	20	49287	49068	14,1		NR
2	17/05/2014	Salida Filtro SB-126 Llanito	12500	86,2	3792	276	67,8	141	16	43917	43840	4	11,2	NA
3	11/07/2014	Salida Filtro F-5372 PIA 5A LC	4384	62,7	743	173	86,4	43,3	20	14634	14245	5,78	22,8	NA
4	01/03/2016	WENCO U-200 (Desaladores TOPPING)	63,9	2,78	56,5	3,16	1,17	NR	0,5	437	298	141	14,8	NA
5	01/03/2016	T-2590 (Agua despojada ambiental UOP I)	37	0,84	11,8	1,26	0,43	NR	0,2	116	127	65		NA
6	01/03/2016	T-4841 (Agua despojada ambiental UOP I)	28,7	2,19	1,09	0,15	0,22	NR	0,3	85	75	40,4		NA
7	01/03/2016	Retorno TE-2940	186	10,7	114	14,5	0,48	NR	0,1	983	868	23,1		NA
No.	Fecha de Muestreo	Muestra	Parametro											
			pH	T (°C)	Resistiv. Ωm @ 25°C	H S mg/l	O Disuelto ppb	CO mg/l	HCO mg/l	CO mg/l	SO mg/l	Cl mg/l	Conductividad mS/cm @ 25°C	I.S. @ 40°C
1	05/08/2014	Entrada Planta PTAR I Galan	6,04	33,3	0,175	ND	ND	25	61	0	4	29740	57,3	-0,98
2	17/05/2014	Salida Filtro SB-126 Llanito	6,41	37,7	0,138	ND	ND	25	84	0	4	26927	72,6	-0,44
3	11/07/2014	Salida Filtro F-5372 PIA 5A LC	6,5	37,4	0,526	0,3	ND	60	793	0	4	8310	19	0,76
4	01/03/2016	WENCO U-200 (Desaladores TOPPING)	7,88	22	13,4	ND	NR	<10	217	0	26,9	65	0,744	0,9
5	01/03/2016	T-2590 (Agua despojada ambiental UOP I)	9,34	22,6	31,9	ND	NR	<10	0	30	4	30	0,313	
6	01/03/2016	T-4841 (Agua despojada ambiental UOP I)	8,84	21,6	54,6	ND	NR	<10	15	22,5	4	10,3	0,183	-1,01
7	01/03/2016	Retorno TE-2940	7,31	21	8,52	ND	NR	<10	38	0	412	207	1,17	-0,13

Nota. Adaptado de: Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 Diciembre 2016.

Adicionalmente, en la tabla 16 se muestra la tendencia de formación de escamas de las aguas utilizadas en las simulaciones.

Tabla 16.

Tendencia de formación de escamas de las aguas utilizadas en las simulaciones

Variable \ Pozo	WENC O U-200	T-2590 (Agua despojada ambiental UOP I)	T-4841 (Agua despojada ambiental UOP I)	Retorno Torre Enfriadora (TE-2940)	Entra da Planta PTAR I (Galan)	Salida Filtro SB- 126 (Llanito)	PIA 5A: Salida Filtro F- 5372 (Cira)
P (psi)	500	500	500	500	500	500	500
T (°C)	35	35	35	35	35	35	35
ST BaSO ₄	7.43	-	0.33	30.60	2.17	1.93	7.07
lb / kBlS BaSO ₄	0.60	-	0.00	0.29	1.78	1.57	2.91
ST CaCO ₃	3.45	7.09	0.03	-	-	-	2.74
lb / kBlS CaCO ₃	7.82	8.62	0.00	-	-	-	57.9 6
ST FeCO ₃	-	-	0.31	-	-	-	4.13
lb / kBlS FeCO ₃	-	-	0.00	-	-	-	5.65
ST FeS	-	-	-	-	-	-	101. 91
lb / kBlS FeS	-	-	-	-	-	-	0.26

Nota. Adaptado de: Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

Por otra parte, la tabla 17 contiene un resumen de los ensayos realizados y el resultado obtenido, así como también se detallan cada una de las pruebas ejecutadas. En general se observó que el agua proveniente de la T-4841 es compatible con los tres tipos de agua de producción evaluados (Galán, Llanito y LCI), mientras que las tres fuentes de agua restantes de la refinería presentan incompatibilidades, debido a que su mezcla con las aguas de producción incrementa significativamente la tendencia a formar escamas de carbonato de calcio y sulfato de bario, principalmente.

Para evitar las incompatibilidades observadas, se puede implementar la dosificación de inhibidores de escamas multipropósito, lo cual viabilizaría las mezclas de las tres fuentes de agua restantes de la refinería con las aguas producidas, no obstante, se incurriría en gastos adicionales para el tratamiento químico de inhibición.

Tabla 17.

Listado de compatibilidades simuladas realizadas

Compatibilidad Simuladas (Condiciones: 35°C, 500psi)					
#	Campo		Agua Refinería	Resultado de Compatibilidad	Condición de Compatibilidad
1			WENCO U-200 (Desaladores Topping)	X	Incompatible
2	Galán	Vs	T-2590 (Agua despojada ambiental UOP I)	~	Agua de T-2590 <50%
3			T-4841 (Agua despojada ambiental UOP I)	√	Totalmente Compatible
4			Retorno Torre Enfriadora TE-2940	X	Incompatible
5			WENCO U-200 (Desaladores Topping)	~	Agua WENCO U-200 >50%
6	Llanito	Vs	T-2590 (Agua despojada ambiental UOP I)	X	Incompatible
7			T-4841 (Agua despojada ambiental UOP I)	√	Totalmente Compatible
8			Retorno Torre Enfriadora TE-2940	X	Incompatible
9			WENCO U-200 (Desaladores Topping)	X	Incompatible
10	La Cira	Vs	T-2590 (Agua despojada ambiental UOP I)	~	Aguas T-2590 <80%
11			T-4841 (Agua despojada ambiental UOP I)	√	Totalmente Compatible
12			Retorno Torre Enfriadora TE-2940	X	Incompatible

Nota. Adaptado de: Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

4.2.5. Campos Potenciales de Reúso de Agua de GRB Para seleccionar los campos candidatos para el reúso de agua de la GRB se definieron de acuerdo a las siguientes premisas:

- Campos cercanos a la GRB.
- Campos con déficit de agua de formación, comparada con los objetivos de inyección de agua y que tendrían que utilizar agua de captación.
- Infraestructura existente y requerida.

Basado en las premisas anteriores, se determinaron los siguientes campos candidatos: La Cira Infantas, Casabe, Provincia, Tisquirama, Llanito y Galán. No obstante, y tal como se indicó en el numeral 9.1.2 el campo Casabe no sería candidato, ya que de acuerdo a los perfiles de fluidos Figura 25, el agua de formación supera los objetivos de inyección de agua.

4.2.6. Distancia de GRB a Campos de VRC Una vez definidos los campos candidatos, se realizó un estimado de los requerimientos de agua por campo, la distancia desde la GRB, y el diámetro de la línea para el transporte del volumen de agua, todo esto con la finalidad de contar con un orden de magnitud y visualizar para un estimado futuro las inversiones requeridas por este concepto. Los resultados se presentan en la tabla 18:

Tabla 18.

Distancia estimada desde la GRB a campos de producción de la VRC.

Campo	Volumen agua a transportar (BWPD)	Distancia desde la GRB Corredores (km)	Diámetro línea requerida (in)	Observaciones
Cira-Infantas	70.000	25	16 Sch 40	Se utilizaría el actual corredor de la deshidratadora Lizama a GRB, para el tendido de esta línea.
Galán	19.000	3	6 Sch 40	Se utilizaría el actual corredor de la línea de bombeo a la GRB, par tendido de esta línea.
Llanito	34.000	14,5	12 Sch 40	Se utilizaría el actual corredor de la línea de bombeo a la GRB, par tendido de esta línea.
Provincia	18.000	72	12 Sch 40	Se utilizara el actual corredor de la VIT para el tendido de esta línea.
Tisquirama	4.000	120	8 Sch 40	Se utilizara el actual corredor de la VIT para el tendido de esta línea.

Nota. Adaptado de: Vicepresidencia de ingeniería y proyectos – gerencia de ingeniería de proyectos. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-3311-16241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

4.2.7. Conclusiones

- a. Según el informe del ICP (QP-16-018) de compatibilidad fluido-fluido, para los campos LCI, Llanito y Galán, actualmente habría una sola fuente de agua compatible de la GRB (agua de la T-4841), desde el punto de vista de NO generar precipitados de escamas inorgánicas. Sin embargo, se requieren análisis complementarios que definan de una

manera concluyente la compatibilidad/incompatibilidad y el tratamiento requerido para hacerla compatible.

- b. De acuerdo con los balances de agua disponibles de la GRB y campos de la VRC, existe una oportunidad de reúso de las aguas de la GRB en proyectos de recobro (ver Tablas 13 y 18).
- c. Con el panorama anterior y de acuerdo a la demanda y oferta de agua, se puede pensar que el agua producida por refinería podría ser utilizada en los procesos de recobro en los campos candidatos LCI, Provincia, Tisquirama, Llanito y Galán.

5. Estrategias de mejoramiento de afluente y efluente de PTAR de la GRB

Para el reúso de la totalidad de las aguas aceitosas se requiere la sincronización de la operación de varios tratamientos que tenemos actualmente fuera de servicio y en proceso de corrida de eficiencia. Logrando la puesta en servicio de las U-4050 la cual nos eliminaría gran cantidad de sulfuros disueltos en la soda sulfhidrica y la U-4090 nos ayudara en la remoción del fenol en la soda cresílicas que son vertidas al afluente y el estudio de alternativas para la remoción de fenol (Nicolas Gonzales Galvis) en el efluente. Podemos mejorar algunos parámetros los cuales afecta la operación normal de la PTAR e incluso presentan algunos problemas con los tratamientos químicos.

5.1. Drenaje de la U-4050

Debido al compromiso de la GRB por disminuir el impacto de sus vertimientos al río Magdalena, y mejorar las condiciones de salud ocupacional por olores ofensivos, a finales de los años 80, se inició un proyecto para el tratamiento de las sodas gastadas sulfhídricas que tenía como objetivo la remoción de compuestos azufrados; sulfuros de sodio (Na_2S) y mercaptidos de sodio (NaHS).

En la selección de tecnología se eligió la compañía Merichem para que desarrollara el proyecto de tratamiento de sodas gastadas sulfhídricas para la remoción de compuestos azufrados. La tecnología implementada es una planta de tratamiento definida como MERICOM I licenciada por Merichem, que opera a presión y temperaturas consideradas medias, mediante un proceso de oxidación con aire para reducir los compuestos azufrados, sulfuros de sodio (Na_2S) y mercaptidos de sodio (NaHS) a compuestos más estables.

En 1992 se dio la instalación y puesta en servicio de la unidad. En su momento no se tenía la segregación de las sodas gastadas que se generan en la refinería. La planta inicio con el tratamiento del pool de sodas gastadas (sodas sulfhídricas, nafténicas y cresílicas) generando perturbaciones operacionales, debido a que en el proceso de oxidación con las condiciones de presiones y temperaturas establecidas ocasionaban formación de espumas (saponificación) teniendo como resultado la inviabilidad operacional de la unidad y su salida de operación.

Continuando con el interés de la GRB por mejorar la calidad en sus vertimientos y el cumplimiento legal ambiental, en el año 2008 se inició la segregación de las sodas gastadas (sulfhídricas - nafténicas y cresílicas) y la estructuración del proyecto de tratamiento de sodas gastadas nafténicas y cresílicas. Con iniciativa del ICP se diseñó el proceso RESOx (U-4090) como tratamiento de las sodas. En este proceso mediante la neutralización con ácido sulfúrico, se

recupera los ácidos cresílicos y nafténicos. Adicionalmente se produce una salmuera ya neutralizada y el manejo de los gases producidos, en la reacción de neutralización en el sistema de soda de lavado con soda sulfhídrica regenerada proveniente de la planta de tratamiento de sodas gastadas sulfhídricas U-4050.

La planta regeneradora de sodas sulfhídricas, tiene como materia prima las sodas gastadas provenientes de los tratamientos en petroquímica (Etileno II y Aromáticos) y Cracking Catalítico (Modelo IV y Orthoflow) para oxidación de sulfuros de sodio y mercaptanos y llevarlos a compuestos más estables que son sus sales correspondientes. Las cargas que llegan a la planta de tratamiento de sodas sulfhídricas, poseen ciertas características químicas generadas en los procesos de tratamiento de gases, las cuales se muestran en la tabla 19.

Tabla 19.

Características sodas gastadas en tanque de carga

Parámetro	Unidad	Valor
pH	--	12- 13.5
Sulfuros - S	% peso	1.5 – 3.0
Mercaptidos - S	% peso	1.5 – 3.0
Gravedad Específica		1.1 – 1.25
Fenoles	% en volumen	0.5- 2.0
Sólidos Suspendidos	% en peso	1.0 – 1.6
Hidrocarburos	% en volumen	1.0-2.0
Nitrógeno Amoniacal	ppm	10-100
NaOH	% en peso	5-20
Gastado de soda	%	50 - 60
Ácido nafténico	ppm	<10
Ácido cresílico	ppm	<10

Nota. Adaptado de:: ECOPETROL S.A. VICEPRESIDENCIA REFINACIÓN Y PETROQUÍMICA GERENCIA COMPLEJO BARRANCABERMEJA. Manual de descripción de procesos de la unidad sodas sulfhídricas ambiental (U-4050).

El objetivo de la unidad es el retiro de los contaminantes de sulfuro de sodio y mercaptanos de las sodas gastadas. En la siguiente tabla 20 se muestran los valores obtenidos después del proceso oxidativo que se lleva en la unidad.

Tabla 20.

Características de soda oxidada en tanque producto

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	12-14
Sulfuros	Ppm	< 100
Mercaptanos	Ppm	< 100
Gravedad Específica		1.2
Soda NaOH	% peso	5 – 10

Nota. Adaptado de:: ECOPETROL S.A. Vicepresidencia refinación y petroquímica gerencia complejo Barrancabermeja. Manual de descripción de procesos de la unidad sodas sulfhídricas ambiental (U-4050).

5.2. Drenaje de la U-4090

La GRB como parte de sus objetivos para el cumplimiento de las normas ambientales vigentes y aplicables a sus operaciones, determinó construir en sus instalaciones, una Planta de Tratamiento de Sodas Gastadas, del tipo nafténicas y cresílicas. El proceso a usar, denominado SOLVEX y licenciado por el ICP, consiste básicamente en una neutralización con ácido sulfúrico, donde se separan y recuperan aproximadamente el 80% de los compuestos fenólicos disueltos en la soda,

seguido finalmente, por una etapa de extracción con solvente Aceite Liviano Ciclo (ALC), donde se extrae de la soda neutralizada (salmuera), casi todos los componentes fenólicos remanentes. En este proceso, se recuperan también, un porcentaje de hidrocarburos disueltos en las sodas gastadas.

Durante los años 2009- 2011 la planta de sodas gastadas RESOX (U-4090) opero, obteniéndose cumplimiento en su objetivo de remoción de fenoles, la figura 18 el diagrama global del proceso.

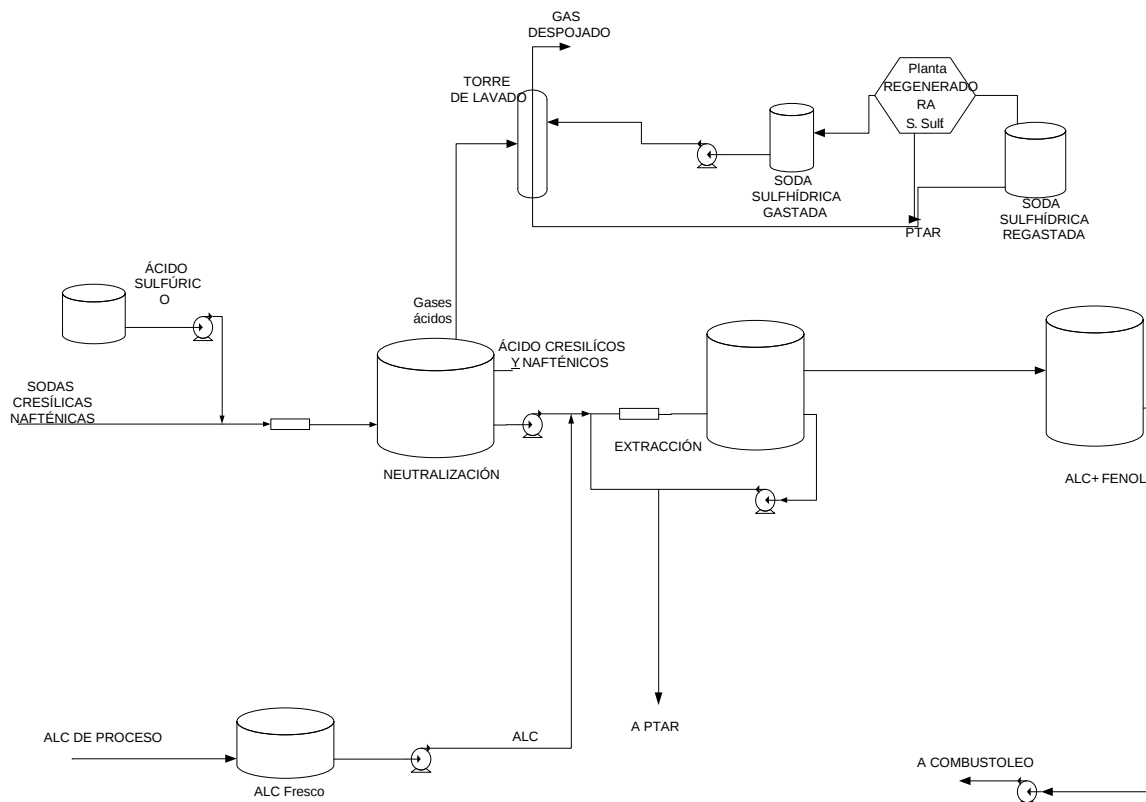


Figura 18. Diagrama del proceso de tratamiento de sodas gastadas nafténicas y Cresílicas.

Nota. Adaptado de: ECOPETROL S.A. Vicepresidencia refinación y petroquímica gerencia complejo barrancabermeja. Manual de operaciones del sistema de segregación y tratamiento de sodas gastadas (U-4090).

El resultado final de la planta es minimizar el impacto ambiental que produce la descarga de los vertimientos con altos contenidos de fenoles, a la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR de la GRB.

En la actual Planta de tratamiento con soda U-4600 de productos de la refinería, se producen las sodas cresílicas resultantes de los tratamientos de las naftas tanto craqueadas como virgen y también se producen las sodas nafténicas, producto del tratamiento de todo el JP 1A, producido en la refinería.

Con relación a las Sodas Gastadas resultantes de los tratamientos en las unidades de ruptura catalítica UOP I y UOP II, no se consideró necesario separar internamente las Sodas Cresílicas y Nafténicas de las Sulhídricas, en razón a los bajos volúmenes de estas últimas y a los altos costos de los nuevos equipos requeridos (tanques, bombas y líneas). Por lo anterior, todas las sodas generadas en los tratamientos cáusticos de las plantas anteriores, llegarán mezcladas al tanque K-4090, y serán tratadas en la U-4090, como Sodas Cresílicas/Nafténicas.

El proceso RESOX, aplicado al tratamiento de las sodas gatadas cresílicas y nafténicas consiste, en la remoción de los compuestos fenólicos de dichas sodas, los cuales están presentes en concentraciones entre 20000 a 150000 ppm (según su procedencia), y reducirlos hasta valores igual o inferiores a 1000 ppm. Además, se recuperarán hidrocarburos valiosos y se obtendrá como residuo final, una salmuera de fácil disposición en PTAR.

5.3. Alternativa de Remoción de Fenol

Para mejorar las condiciones del efluente se requiere la disminución del parámetro de fenol por lo cual se utilizó y desarrollo una investigación (Nicolas González Galvis) y se orientó ese trabajo

por parte de ECOPETROL S.A. con el objetivo primordial de ayudar a la remoción de este contaminante. Después de la investigación y el estudio de las alternativas y con el resultado que se obtuvo se puede concluir que es de gran ayuda esta implementación en el proceso el cual mejora notablemente el parámetro y es clave para poder aplicar otros procesos los cuales pueden mejorar el efluente de PTAR y por reusar el agua en su totalidad.

Los análisis realizados para la corrida para el desarrollo del estudio en la operación normal de la planta PTAR y poder tener el estado actual de la remoción con el proceso de biodegradación con aireación inducida durante un periodo comprendido entre enero a junio de 2016, mostrado en la tabla 21.

Tabla 21.

Concentración de fenol en la PTAR-GRB.

	Flujo (gpm)	TRH (Horas)	Fenol (ppm)			
			Entrada BA-4008		Salida BA-4010	
			Día	Noche	Día	Noche
Promedio	3981	7	51	50	19	19
Máximo	6561	10	126	118	71	59
Mínimo	3250	4	21	11	1	1

Nota. Adaptado de: Datos de laboratorio de la planta.

El valor promedio de fenol en la entrada del tratamiento biológico de las aguas (piscina BA4008) es de 50 ppm, el tratamiento biológico actual permite reducir el vertimiento al río

Magdalena (BA-4010 salida de la planta) entre los 10 a 19 ppm de fenol, presentando un incumplimiento al artículo 11 de la resolución 631 del 17 de marzo de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Dado que con la biodegradación de fenoles es posible disminuir en algunos casos el contenido de fenol a un dígito, es requerido por tanto evaluar alternativas que lleven el tratamiento a control y cumplimiento legal, por lo que se hace inminente evaluar alternativas que sean sostenibles y factibles técnico económicamente, para aplicar en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR-GRB que permitan su sostenibilidad ambiental.

Con el objetivo de la reducción de fenol ha sido una necesidad por lo largo de muchos años en la GRB, por lo que se hizo necesaria buscar y analizar las mejores estrategias para poder desde las plantas aportantes tener control desde la fuente por lo cual mencionamos algunas que se han implementado:

- La reducción y segregación en la fuente
- La biodegradación de fenoles
- El re-uso de aguas agrias
- La implementación de la planta de tratamiento de sodas gastadas Resox (tratamiento de extracción líquido a líquido) la cual se encuentra en período de revisión de metalurgia para puesta a punto y operación finalizando el año 2019.

Las tecnologías utilizadas para la remoción del Fenol en aguas residuales se muestran en la tabla 22.

Tabla 22.

Principales tecnologías para el tratamiento del fenol en aguas residuales.

TIPO DE TRATAMIENTO	TECNOLOGÍA
Físicos	Adsorción
	Membranas
	Extracción
	Adsorción
	Incineración
Químicos	Oxidación no catalítica con aire húmedo (WAO)
	Oxidación catalítica con aire húmedo (CWAO)
	Ozono
	Reacción Fenton ()
	Oxidación húmeda con peróxido (CWPO)
	Oxidación electroquímica
Biológicos	Fotocatálisis heterogénea ()
	Aerobios
	Anaerobios

Nota. Adaptado de: Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques in Common Waste Water and Waste Gas Treatment / Management Systems in the Chemical Sector February 2003 pag 8.

5.3.1. Tecnologías para la Remoción de Fenoles Evaluadas Para PTAR de la GRB se realizaron una serie de estudio buscando la mejor alternativa para la remoción del fenol por lo cual se realizaron una serie de corridas buscando los mejores resultados realizando un análisis costo – beneficio los cuales fueron:

- Aireación inducida y su efecto en el tratamiento biológico de fenoles
- Oxidación química con peróxido catalizado con hierro
- Oxidación electroquímica

5.3.2. Conclusiones Los procesos de degradación de fenol utilizando la oxidación anódica y la aireación inducida (como refuerzo de la biodegradación utilizada actualmente en la planta) presentaron la más alta eficiencia de entre el 95 al 100% de remoción de este contaminante, así como el más alto índice del proceso jerárquico de alternativas realizado presentando los mejores criterios de relación costo beneficio.

El proceso de oxidación química del fenol usando peróxido catalizado se ubica en el siguiente lugar dentro del ranking de alternativas, con una remoción del 100% del fenol, pero el costo de los insumos químicos y la necesidad de realizar una segunda neutralización en el efluente de la planta en los casos que el fenol > 25ppm y DQO >1.000ppm hacen que se afecte la valoración final.

Se evidencia que las tecnologías de oxidación química con peróxido catalizado, la aireación inducida y la oxidación anódica del fenol logran a nivel de laboratorio el cumplimiento de la norma colombiana de vertimientos (Resolución 631 del 17 de marzo de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible) con valores por debajo de este límite. Por lo tanto, esta experiencia se convierte en un referente para el uso de estas alternativas tanto en las refinerías de Ecopetrol S.A. como en otras áreas de la misma.

6. Resultado del Diseño para las Alternativas del Sistema de Reúso.

Logrando la reutilización de las aguas agrias de las T-4841 para recobro en el sistema de pozos y T-2590 para el tratamiento de desalado de crudos, la puesta en servicio de la U-4090 para la disminución de fenol y continuar la operación de la U-4050 para disminución de sulfuros, se lograría bajar la carga química de la carga de la PTAR del flujo de vertimiento al río.

Adicionalmente utilizando las alternativas de tecnología para la remoción de fenol tales como son de oxidación química con peróxido catalizado, la aireación inducida y la oxidación anódica del fenol a nivel de laboratorio, logra ser más viable la reutilización del agua residual a varios procesos de la refinería.

Con la carga libre en gran porcentaje de los contaminantes se recomienda la implementación de procesos de tratamiento terciarios tales como:

- Ultrafiltración.
- Bioreactor de Membrana.
- Osmosis Inversa.
- Nanofiltración.
- Electrodialisis Inversa.

7. Conclusiones

Con el diseño básico propuesto en este trabajo de aplicación la GRB estaría dispuesta a obtener un margen de utilidad de alrededor de \$ 210.000.000 mensuales correspondiente a \$ 2.520.000.000 anuales por el tratamiento de las aguas, ya que estos costos de tratamiento son vertidos con la corriente de vertimiento al río. Con la segregación, la operación eficiente de las diferentes unidades aportantes, la retoma de los proyectos y realizando un tratamiento terciario se lograría primero cumplir con la Resolución 631 del 17 de marzo de 2015, y sobre logrando ser una compañía ambientalmente sostenible.

La operación actual de la PTAR-GRB es muy compleja por la gran variedad de parámetros que lleva la carga actual, por lo cual con el proceso de segregación de aguas se logró un avance importante para el diseño básico para reutilización de las aguas residuales en la GRB.

Actualmente las refinerías de gran importancia a nivel mundial, no solo son importantes por los procesos que manejan, avances tecnológicos si no porque dentro de sus propósitos son ser ambientalmente sostenibles por lo cual la implementación de tecnologías para el reúso de las aguas residuales de sus procesos son de gran importancia ya que disminuye costos de captación y evitando impactar el medio ambiente.

Las alternativas que se logran con este trabajo de aplicación son retomar las estrategias que alguna vez se realizaron, pero quedaron solo en estudio, pero con la aplicación y dando un mejor enfoque se lograría la implementación en su totalidad. Damos como iniciativa lograr la implementación de la tecnología para la remoción de fenol, dando un paso importante para la

disminución en este parámetro. También es claro que el éxito depende básicamente de la operación eficiente de las unidades de proceso que son afluentes a la PTAR. Como son las torres T-2590, T-4841, U-4050 y la U-4090, y lograr reutilizar el efluente de la PTAR.

El diseño básico de las alternativas se basa básicamente en un mapa de cargas con un objetivo común que es la reutilización de las aguas residuales, se lo logra realizando procesos eficientes en las unidades aportantes al afluente de la PTAR-GRB. Buscando la mejor forma de segregar y dar disposición en los procesos internos que tenemos en la refinería que consumen gran cantidad de agua para su operación.

8. Recomendaciones

- Operación continua de la entrega de la corriente a la U-2900.
- Se requiere que la operación de las torres U-2590 y T-4841 operen dentro de los parámetros de control, logrando la entrega de manera continua a los procesos mencionados anteriormente.
- Como resultado del desarrollo de este trabajo de aplicación se recomienda la continua operación de las plantas de sodas U-4050 y U-4090.
- Los procesos de degradación de Fenol utilizando la oxidación anódica y la aireación inducida (como refuerzo de la biodegradación utilizada actualmente en la planta) presentaron la más alta eficiencia de entre el 95 al 100% de remoción de este contaminante,

así como el más alto índice del proceso jerárquico de alternativas realizado presentando los mejores criterios de relación costo beneficio.

Referencias Bibliográficas

- Altman, S.J., Jensen, R.P., Cappelle, M.A., Sanchez, A.L., Everett, R.L., Anderson, H.L., McGrath, L.K., (2012). Membrane treatment of side-stream cooling tower water for reduction of water usage. *Desalination* 285, 177e183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.052>.
- American Society For Testing And Materials. (1976) Manual de aguas para usos industriales, Volumen 3. Ediciones ciencia y técnica, S.A 1988 AZAD S. Hardam. Industrial Wastewater Management Handbook. McGraw-Hill..
- Amorim, R.S., (2005). Abastecimento de agua de uma refinaria de petroleo: Caso REPLAN. Masters Thesis. Federal Fluminense University, Rio de Janeiro.
- Bagajewicz, M., (2000). A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. *Comput. Chem. Eng.* 24, 2093e2113. CETESB, 2014. Reuso de Agua.
- Berné F., Cordonnier J. (1995) Industrial water treatment, refining, petrochemicals and gas processing techniques. Editions technip..
- Castellanos Ibarra H. E. – Diaz Mateus F. A. (2004). Desarrollo de una herramienta computacional para la reutilización y redistribución del agua de uso industrial en una refinería. TESIS DE GRADO. Universidad Industrial de Santander,
- Chao Y, Liang TM. (2008) A feasibility study of industrial wastewater recovery using electrodialysis reversal. *Desalination*; 221:433–9.
- Chien, S.-H., Chowdhury, I., Hsieh, M.-K., Li, H., Dzombak, D.A., Vidic, R.D., (2012). Control of biological growth in recirculating cooling systems using treated secondary effluent as makeup water with monochloramine. *Water Res.* 46, 6508e6518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.027>.

Colombia. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (17, marzo, 2015). Decreto 631 Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, p. 12-14. J. N. Tanis. Procedures of industrial water treatment. Ltan Inc. Ridgefield Connecticut. 1987.

Durante, L., Trombeta, A., Prado, E., Paraíso, P., Jorge, L., (2015). Reuso de Efluentes em Torres de Resfriamento. Blucher Chem. Eng. Proc. 1, 11701e11708.

ECOPETROL S.A. (s.f.) Caracterización de aguas de la Estación Galan para diagnóstico de daño. QP-14-148.

ECOPETROL S.A. (s.f.) Compatibilidades simuladas entre aguas provenientes de la GRB y aguas de producción de los campos Llanito, Galan y La Cira. QP-16-018.

ECOPETROL S.A. (s.f.) Guía para la definición del esquema de proceso para el tratamiento de aguas de producción. DY-C-G-032.

ECOPETROL S.A. Instituto Colombiano Del Petróleo - Unidad De Disciplinas Especializadas. (2017). Conceptualización para el mejoramiento de la hidráulica del sistema de evacuación de aguas agrias despojadas desde la UOP I hacia la PTAR y TOPPING (Desaladores de Crudo),

ECOPETROL S.A. Instituto Colombiano Del Petróleo (Mayo 30 de 2014.) Unidad De Disciplinas Especializadas. Propuesta para la degradación de fenoles y DBO5 en Caribe y Quilili /Grupo Tecnologías limpias Instituto Colombiano del Petróleo / Piedecuesta- Santander;

Ecopetrol S.A. (2016). Manual de descripción de procesos de la unidad ptar ambiental. Barrancabermeja, Colombia.

ECOPETROL S.A. Vicepresidencia refinación y petroquímica gerencia complejo Barrancabermeja. (s.f.) Manual de operaciones del sistema de segregación y tratamiento de sodas gastadas (U-4090).

ECOPETROL S.A. Vicepresidencia refinación y petroquímica gerencia complejo Barrancabermeja. (s.f.) Manual de descripción de procesos de la unidad sodas sulfhídricas ambiental (U-4050)

- ELSEVIER. Membrane Technology Volume (2017), Issue 2, February 2017, Pages 4-5, Oil refinery uses GE technology to clean all of its wastewater. Available online 24 February 2017.
- Everton H. Marco A. Siqueira Rodrigues, P. Monteiro de Aquim. (s.f.) Wastewater reuse in a cascade based system of a petrochemical industry for the replacement of losses in cooling towers. Pure Sciences and Technology Institute, Feevale University, Highway RS 239, n. 2755 e Vila Nova, Novo Hamburgo, RS, Brazil.
- González Galvis, J. N. R. (2017). Selección a través del análisis comparativo de la mejor alternativa de remoción de fenol en el efluente de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Gerencia Refinería de Barrancabermeja. TESIS DE GRADO. Universidad Industrial de Santander,
- Gutterres, M., Aquim, P.M., Passos, J.B., Trierweiler, J.O., (2010). Water reuse in tannery beamhouse process. J. Clean. Prod. 18, 1545e1552.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.017>.
- Hespanhol I. (2003) Potencial de reúso de água no Brasil: Agricultura, indústria, municípios e recarga de aquíferos. In: Mancuso P, Santos H, editors. Manole (USP): São Paulo.
- Higuita R. (1999) Gestión ambiental durante el mantenimiento con parada de planta de las unidades de alquilación y ácido de la refinería de Barrancabermeja. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.
- Ipieca, (2010). Petroleum Refining Water/wastewater Use and Management – Operations Best Practice Series. <http://www.ipieca.org/publication/petroleumrefining-water-wastewater-useand-management/> (Accessed 05.07.17).
- Mann G. James, LIU Y. A. (1999) Industrial water reuse and wastewater minimization. McGraw-Hill..
- Melin T, Jefferson B, Bixio D, Thoeye C, De Wilde W, De Koning J, et al. (2006) Membrane bioreactors technology for wastewater treatment and reuse. Desalination;187:271–82.
- Mierzwa JC, Hespanhol I. (2005) Água na indústria – Uso racional e reúso. São Paulo: Oficina de Textos;.

- Mirko Faccini, Centro Tecnológico Leitat, C/ de la Innovació 2, 08225 Terrassa (Barcelona), Spain. Russian refinery selects GE's MBR with MACarrier technology.
- Mobil Altona Refinery. (2006) Environment improvement plan 2004–2006. Australia: Mobil Altona Refinery.
- Nacheva, P.M., (2011). Water Management in the Petroleum Refining Industry, Water Conservation. <http://www.intechopen.com/books/water-conservation/watermanagement-inthe-petroleum-refining-industry/> (Accessed 15.02.17).
- Nalcowater. Ecolab Company. (2019). Recuperado de: <https://es-es.ecolab.com/nalcowater> National Petroleum Agency (ANP, in Portuguese). Available at <http://www.anp.gov.br> [accessed 2.2.12].
- Peeters JG, Theodoulou SL. (s.f.) Membrane technology treating oily wastewater for reuse.
- Rautenbach R, Melin T. (2003) Mebranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag.
- Rodrigo de Abreu Domingos, Fabiana Val_eria da Fonseca. Evaluation of adsorbent and ion exchange resins for removal of organic matter from petroleum refinery astewaters aiming to increase water reuse. a PETROBRAS, School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Av. Henrique Valadares, 28, Centro, Rio de Janeiro, RJ, 20231-030, Brazil b School of Chemistry, UFRJ, Federal University of Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos 149, Cidade Universit_aria, Ilha do Fund~ao, Rio de Janeiro, RJ, 21941-909, Brazil.
- Santos, V.L., Veiga, A.A., Mendonça, R.S., Alves, A.L., Pagnin, S., Santiago, V.M.J., 2015. Reuse of refinery's tertiary-treated wastewater in cooling towers: microbiological monitoring. Environ. Sci. Pollut. Res. 22, 2945e2955. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-3555-7>.
- SIMS, J. J. & PUCKORIUS, P. A practical guide to water recycle-reuse. Nace International Corrosion 1997, 484/1 - 484/12.
- Sufnarski, M.D., 1999. The Regeneration of Granular Activated Carbon Using Hydrothermal Technology. Masters thesis. University of Texas, Austin.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, fifth ed. McGraw-Hill Companies, New York.

Ticsa, (2019). Recuperado de: <http://www.ticsa.com.mx/>

Tong F, Aerts P. RO & Petrochemicals. Water & Wastes Digests 2009(September):26–7.

Touma, S.L., 2013a. Testes acelerados em colunas de pequena escala: o uso de carvão ativado granular em projetos de reúso de efluentes de refinarias de petróleo. Masters Thesis. Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Van Limpt, B., van der Wal, A., 2014. Water and chemical savings in cooling towers by using membrane capacitive deionization. Desalination 342, 148e155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.022>.

VICEPRESIDENCIA DE INGENIERIA Y PROYECTOS – GERENCIA DE INGENIERIA DE PROYECTOS. Reutilización de Agua de la GRB en Proyectos de Recobro. GMR-331116241-ES-PRO-IF-001. 13 diciembre 2016.

Wang D. et al. / Desalination and Water Treatment 25 (2011) 133–142. Application of the combined ultrafiltration and reverse osmosis for refinery wastewater reuse in Sinopec Yanshan Plant.

Wang, Y., Chu, K.H., Wang, Z., 2014. Two-step methodology for retrofit design of cooling water networks. Ind. Eng. Chem. Res. 53, 274e286. <http://dx.doi.org/10.1021/ie400906r>.

Wang YP, Smith R. Wastewater minimization. Chemical Engineering Science 1994;49:981–1006.

Yang, R.T., 2013. Adsorbents: Fundamentals and Applications, first ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

You, S.-H., Tseng, D.-H., Guo, G.-L. & Yang, J.-J. The potential for the recovery and reuse of cooling water in Taiwan. Resources, Conservation and Recycling 1999, 26, 53-70

Apéndices

Apéndice A. Marco Jurídico

Requerimientos de Ley

Debido a la naturaleza tóxica de algunos de compuestos, en Colombia se ha establecido el límite máximo para el vertimiento proveniente de aguas residuales industriales hacia cuerpos de agua a través de la Resolución 631 de marzo 17 de 2015. Esta nueva norma de vertimientos “Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 del 25 de octubre de 2010 del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, y actualiza el decreto 1594 de 1984, respondiendo a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país (Min Ambiente, 2015).

La Resolución 631 del 17 de marzo de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible modifica el sistema de medición de los factores contaminantes que pueden presentarse en las aguas residuales; ahora se definen unos límites máximos de las concentraciones de cada uno de los parámetros contaminantes, clasificándolos por las diversas actividades económicas desarrolladas por las empresas, lo cual vuelve más exigente los requerimientos para obtener los permisos de vertimientos. La resolución 631 del 2015 deberá ser aplicada por todos aquellos que realicen vertimientos a los sistemas de alcantarillado público y a aguas superficiales; no incluye vertimientos a aguas marinas o al suelo.

La legislación actual permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por 73 actividades productivas presentes en los siguientes siete (7) sectores económicos del país:

1. Agroindustria
2. Ganadería
3. Actividades de minería
4. Actividades hidrocarburos
5. Actividades de elaboración de productos alimenticios y bebidas
6. Actividades de fabricación y manufactura de bienes
7. Actividades asociadas con servicios y otras actividades.

La Resolución 631 de 2015 a su vez divide el sector de hidrocarburos en cuatro actividades así:

1. Actividades de exploración y producción (upstream)
2. Actividad refino
3. Actividad de venta y distribución (downstream)
4. Actividad de transporte y almacenamiento (midstream)

Las aguas residuales de la GRB son vertidas al río Magdalena teniendo en cuenta los parámetros de control ambientales de la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible los cuales se presentan en la tabla 23.

Tabla 23 Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos en los vertimientos puntuales de aguas residuales.

Resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015	
Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos en los vertimientos puntuales de aguas residuales.	
Parámetros	Unidad
Generales	
Potencial de Hidrógeno	6.0 – 9.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.Q.O.)	200 mg/L O ₂
Demanda Química de Oxígeno (D.Q.B.)	400 mg/L O ₂
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	50 mg/L
Grasas y Aceites	15 mg/L
Fenoles	0.2 mg/L
Hidrocarburos	
Hidrocarburos Totales (HTP)	10 mg/L
Compuesto de Nitrógeno	
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	Análisis y reporte
Iones	
Sulfuros (S ₂ -)	1 ppm
Metales y metaloides	
Cobre (Cu)	1 mg/L
Cromo (Cr)	0.5 mg/L
Hierro (Fe)	3 mg/L
Níquel (Ni)	0,5 mg/L

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Los parámetros establecidos por ECOPETROL S.A. para la corriente de vertimiento y reúso están establecidos como se observa en la tabla 22 y 23.

Tabla 24 Parámetro de calidad para vertimiento.

Parámetros de Calidad de Vertimiento al Río	
Potencial de Hidrogeno	6.0 – 9.0
Solidos Suspendidos	50 ppm
Hidrocarburos Totales	10 ppm
Temperatura	40°C
Sulfuros Totales	1 ppm
Fenol	0.2 ppm
Amoniaco	N.A.
Cloruros	500 ppm
Dureza	N.A.
Grasas y Aceites	30 ppm
Demanda Química de Oxígeno (D.Q.B.)	400
Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.Q.O.)	200

Fuente: Manual de la PTAR-GRB

Tabla 25 Parámetro de calidad para reúso.

Parámetros de Calidad a Reúso U-2900	
Potencial de Hidrogeno	6.5 – 7.5
Solidos Suspendidos	35 ppm
Hidrocarburos Totales	20 ppm
Temperatura	40°C
Sulfuros Totales	0 ppm
Fenol	5 ppm
Amoniaco	8 ppm
Cloruros	100 ppm
Dureza	110 ppm
Grasas y Aceites	30 ppm

Demanda Química de Oxígeno (D.Q.B.)	N.A.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.Q.O.)	N.A.

Fuente: Manual de la PTAR-GRB

Apéndice B. Parámetros Fisicoquímicos en los Efluentes de las Unidades Topping
(Proyecto Reúso de Aguas W3521)

Tabla 26. Parámetros fisicoquímicos medidos en los efluentes de la U-2000

PARÁMETRO	AGUA ENTRADA D-2001A	AGUA SALIDA D- 2001 A	CONDENSAD O VACIO D- 2007	CONDENSAD O ATMOSFÉRIC O D-2004
Nitrógeno Amoniacal	0.756	3.324	62.6	1.43
Sulfuros, (mg/L S ⁻²)	0.146	0.526	48	1.85
Cloruros, (mg/L Cl-)	8.99	123.1	70.93	9.02
Alcalinidad	-----	-----	157	45.40
Índice Langelier	-----	-----	0.26	-1.91
Fenoles, (mg/L)	-----	-----	12.1	25.3
pH	6.4	8.04	8.4	6.8
Sólidos Suspendidos, (mg/L)	1.6	1.0	3	20
Sólidos disueltos, (mg/L)	103	130	9	82
Sólidos Totales, (mg/L)	105	131	12	102
Grasas & Aceites, (mg/L)	-----	-----	880	43.2

Fuente: ECOPETROL S.A. INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO – reúso de Aguas
 Agrias en Desaladores de la GRB (2004).

Tabla 27 Parámetros fisicoquímicos medidos en los efluentes de la U-2100

PARÁMETRO	AGUA ENTRADA D-2101/ A	AGUA SALIDA D-2101	CONDENSAD O VACIO D- 2104	CONDENSAD O ATMOSFÉRI CO D-2102
NH₄, (mg NH₄/L)	33.64	19.78	13.66	28.90
Sulfatos, (mg SO₄/L)	6.24	4.15	0.85	1.25
Cloruros, (mgCl/L)	7.99	29.06	2.60	8.04
Alcalinidad, (mgCaCO₃/L)	72.4	66	68	39.6
Conductividad, (μOhs/cm)	259	238	136	286
Fenoles, (mg/L)	28.6	29.9	86.3	8.6
pH	8.54	8.66	8.57	6.82
Sólidos Suspendidos, (mg/L)	36	44	2.0	22.0
Sólidos disueltos, (mg/L)	20	48	24	32
Sólidos Totales, (mg/L)	56	92	26	54
Grasas & Aceites, (mg/L)	1109	9.6	1100	21.6

Fuente: ECOPETROL S.A. INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO – Reúso de Aguas

Agrias en Desaladores de la GRB (2004).

Tabla 28 Parámetros fisicoquímicos medidos en los efluentes de la U-250

Componentes	Agua Entrada d-253	Agua Salida d-253	Condensado Vacío d-260	Condensado Atmosférico d-250	Condensado Atmosférico d-251
N ₂ Amoniacal (mg NH ₄ /L)	5.35	3.61	2.32	4.66	12.08
Sólidos totales (mg/L)	110	426	14	214	4.0
Carbonatos (mg CO ₃ / L)	0.0	0.0	0.0	199.68	0.0
Bicarbonatos (mg HCO ₃ / L)	85.4	159.6	0.0	65.88	50.75
Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	70	130.8	0.0	220.4	41.6
pH	7.51	7.47	3.92	9.17	7.42
Sulfatos (mg SO ₄ /L)	10.98	22.33	1.69	10.85	< 1.5
Fenoles (mg/L)	0.047	2.31	22.8	16.35	63.7
Grasas y aceites mg/L	0.0	121.2	17.135	96.4	473.0

Fuente: ECOPETROL S.A. INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO – Reúso de Aguas
Agrias en Desaladores de la GRB (2004).

Tabla 29 Parámetros fisicoquímicos medidos en los efluentes de la U-200

Parámetro fisicoquímico	Agua Entrada desalador D-221	Agua salida desalador D-222	Condensado atmosférico D-201 y 203	Condensado vacío D-228
DQO	275.09	556.56	676.58	143.33
Nitrógeno total	9.14	9.06	39.14	1.14
Nitrógeno Amoniacal	1.47	1.84	3.69	0.368
Cloruros	8.07	76.05	23.74	4.73
Sulfatos	56.46	58.46	<1.5	2.217
Fenoles	5.95	2.19	22.33	3.22
pH	6.45/24.3	7.49/24.4	6.85/24.8	4.33/24.9
Sólidos suspendidos	5.0	325	4.0	3.0
Sólidos disueltos	102	551	36	204
Sólidos totales	107	876	40	207
Aceites y grasas	150.2	297.1		4931
Alcalinidad	24	191.6	61.2	0
Conductividad	-	-	-	-
Aniones				
Fosfatos	<0.3	0.386	<0.3	<0.3
Nitratos	2.653	1.035	0	0
Nitritos	0	0	0	0
Carbonatos	0	0	0	0
Bicarbonatos	29.28	234	74.66	0
Cationes				
Calcio	18.52	83.37	0.29	0.58
Sodio	5.48	38	0.78	0.81
Potasio	1.77	3.43	0.39	0.35
Magnesio	2.52	4.14	0.07	0.04
Hierro	1.17	1.56	1.59	3.42
Aluminio	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Estaño	<2.7	<2.7	<2.7	<2.7
Zinc	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Índice de Languelier	-2.31	0.21	>-2.0	>-2.0

Fuente: ECOPETROL S.A. INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO – Reúso de Aguas
 Agrias en Desaladores de la GRB (2004).