

PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA
RESIDUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS

OMAR DAVID BETANCOURT CASTAÑEDA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS LIMPIAS
BOGOTÁ D.C

2026

PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA
RESIDUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS

OMAR DAVID BETANCOURT CASTAÑEDA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER EN
TECNOLOGÍAS LIMPIAS

NIDIA ELENA ORTIZ PENAGOS

Directora

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS LIMPIAS
BOGOTÁ D.C

2026

Contenido	
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
ANTECEDENTES.....	14
MARCO TEÓRICO	18
Agua de producción en la industria petrolera	18
Caracterización fisicoquímica del agua de producción	19
Fundamentos químicos asociados al agua de producción	19
Normatividad aplicable al manejo del agua de producción	20
Reutilización del agua de producción: tratamiento y oportunidades.....	21
Análisis de aspectos ambientales, económicos y sociales del aprovechamiento del agua de producción	22
METODOLOGÍA	23
1. Revisión bibliográfica especializada	23
2. Muestreo y caracterización fisicoquímica del agua de producción	24
Actividades clave:.....	26
2.1 Tratamiento y análisis de datos	28
3. Evaluación del efecto y viabilidad de valorización.....	29
Actividades clave:.....	30
4. Propuesta de estrategias de aprovechamiento en economía circular	32
Actividades clave:.....	33
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE PLATANILLO	35
MÉTODOS DE VALORIZACIÓN DE COMPONENTES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	38
Proceso de precipitación y recuperación de baritina (BaSO_4).....	39
Cuantificación del bario y requerimiento de sulfato	40
PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE APROVECHAMIENTO EN ECONOMÍA CIRCULAR	58
Identificación de sectores industriales receptores.....	59

Lineamientos técnicos para implementación.....	59
Estrategias de escalamiento	59
Beneficios esperados	60
ANÁLISIS COSTO–BENEFICIO Y ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA	60
CONSIDERACIONES AMBIENTALES ASOCIADAS A LAS ESTRATEGIAS DE VALORIZACIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	69
IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO	72
IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES QUE PUEDEN BENEFICIARSE DE LOS PRODUCTOS RECUPERADOS	75
RECOMENDACIONES ESCALONADAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN A NIVEL INDUSTRIAL Y APLICACIONES PRÁCTICAS.....	77
CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

RESUMEN

La gestión del agua de producción constituye uno de los principales retos operacionales y ambientales de la industria petrolera, debido a los elevados volúmenes generados y a la presencia de compuestos disueltos y suspendidos que pueden afectar los sistemas de tratamiento, transporte e inyección. En el campo Platanillo ubicado en el municipio de Puerto Asís en el departamento del Putumayo, la disposición del agua de producción mediante reinyección requiere condiciones fisicoquímicas que minimicen fenómenos de incrustación, corrosión y *fouling*, los cuales impactan la eficiencia de los equipos y los costos operativos. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar fisicoquímicamente el agua de producción del campo Platanillo y evaluar alternativas de valorización de sus componentes, bajo un enfoque de economía circular orientado a mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados al manejo del agua.

La investigación se desarrolló mediante una metodología experimental y analítica que incluyó el muestreo directo en línea de proceso en las corrientes de agua tratada previo a la succión de las bombas de alta presión (HPS) utilizadas en la reinyección. Las muestras fueron recolectadas en frascos de vidrio borosilicato con tapa de PTFE y analizadas inmediatamente después de su recolección para evitar alteraciones en su composición. La caracterización fisicoquímica se realizó mediante métodos analíticos reconocidos internacionalmente, incluyendo técnicas gravimétricas, espectrofotométricas, titulaciones químicas e ICP-OES, con base en los estándares de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, métodos de la EPA y procedimientos del manual de análisis de agua de Hach. Los parámetros evaluados incluyeron sólidos suspendidos totales, aceite en agua, hierro total, bario, sulfatos, cloruros y dureza total.

Los resultados de la caracterización evidenciaron concentraciones representativas de compuestos inorgánicos y material suspendido asociados a procesos típicos de producción petrolera, los cuales constituyen potenciales precursores de

incrustaciones y fenómenos de ensuciamiento en los sistemas de reinyección. Con base en estos resultados, se desarrolló un análisis técnico de alternativas de valorización para los principales componentes presentes en el agua de producción, considerando procesos como precipitación química selectiva, separación por membranas, filtración avanzada y recuperación de compuestos minerales y de esta manera aportar alternativas técnicas orientadas a la reducción de los costos asociados al manejo y reinyección del agua de producción, mediante la identificación de oportunidades de valorización de sus componentes fisicoquímicos y la optimización de los procesos de tratamiento empleados en el campo.

Adicionalmente, se realizó una cuantificación de los flujos másicos de los principales componentes presentes en el agua de producción utilizando el caudal promedio del sistema de reinyección, lo que permitió estimar el potencial de recuperación de compuestos y su efecto en la operación del sistema. A partir de estos balances se efectuó un análisis económico simplificado a diez años con una tasa de descuento del 10 %, evaluando costos operativos asociados al uso de reactivos, mantenimiento de membranas y personal, así como los posibles beneficios derivados de la reducción de incrustaciones, disminución de presión de inyección y ahorro energético en los sistemas de bombeo.

Los resultados del análisis indicaron que la implementación de estrategias de tratamiento orientadas a la remoción selectiva de compuestos incrustantes, hidrocarburos residuales y material suspendido puede contribuir a mejorar la calidad del agua de reinyección y reducir potencialmente los requerimientos energéticos del sistema de bombeo de alta presión. Para efectos del análisis económico, se evaluaron escenarios conservadores de reducción energética entre 10 % y 20 %, asociados a una posible disminución de la carga hidráulica sobre las bombas HPS. Bajo estos supuestos, se estimó un ahorro anual promedio entre USD 150.000 y USD 280.000. De esta manera, el enfoque propuesto representa una alternativa técnica para optimizar la gestión del agua de producción y avanzar hacia esquemas de operación más sostenibles en la industria petrolera. Una limitante importante

para implementar la valorización de los componentes del agua de producción es la variabilidad en la composición química del agua a lo largo del tiempo, lo que podría requerir ajustes continuos en los procesos de tratamiento y valorización.

Palabras clave: agua de producción de hidrocarburos, valorización de residuos, reinyección, tratamiento de agua, economía circular.

ABSTRACT

Produced water management represents one of the main operational and environmental challenges in the oil industry due to the large volumes generated and the presence of dissolved and suspended compounds that can affect treatment, transport, and reinjection systems. In the Platanillo field located in Puerto Asis, Putumayo, produced water disposal through reinjection requires physicochemical conditions that minimize scaling, corrosion, and fouling phenomena, which directly impact equipment efficiency and operational costs. In this context, the objective of this study was to characterize the physicochemical properties of produced water from the Platanillo field and to evaluate potential valorization alternatives for its components under a circular economy approach aimed at improving operational efficiency and reducing water management costs.

The research was developed through an experimental and analytical methodology that included direct sampling from in-line process valves located in the treated water streams prior to the suction of high-pressure injection pumps (HPS). Samples were collected in borosilicate glass bottles with PTFE caps and analyzed immediately after collection to avoid alterations in their composition. Physicochemical characterization was performed using internationally recognized analytical methods, including gravimetric techniques, spectrophotometry, chemical titration, and ICP-OES, based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, EPA methods, and procedures from the Hach Water Analysis Handbook. The evaluated parameters included total suspended solids, oil in water, total iron, barium, sulfates, chlorides, and total hardness.

The results of the characterization revealed representative concentrations of inorganic compounds and suspended materials typically associated with petroleum production processes, which may act as precursors of scaling and fouling in reinjection systems. Based on these results, a technical assessment of potential

valorization routes for the main components present in produced water was conducted, considering processes such as selective chemical precipitation, membrane separation, advanced filtration, and mineral compound recovery and thus provide technical alternatives aimed at reducing the costs associated with produced water management and reinjection, through the identification of valorization opportunities for its physicochemical components and the optimization of the treatment processes used in the field.

Additionally, mass flow quantification of the main components present in produced water was performed using the average reinjection flow rate, allowing estimation of the recovery potential of these compounds and their impact on system operation. Based on these balances, a simplified economic evaluation was carried out over a ten-year period with a 10% discount rate, considering operational costs associated with chemical reagents, membrane maintenance, and labor, as well as potential benefits derived from scaling reduction, decreased injection pressure, and energy savings in high-pressure pumping systems.

The results of the analysis indicated that the implementation of treatment strategies focused on the selective removal of scaling compounds and suspended solids may contribute to improving the quality of reinjection water and reducing the energy requirements of the high-pressure pumping system by between 10% and 20%, generating an average annual savings of USD 150,000 to USD 280,000. In this way, the proposed approach represents a technical alternative for optimizing produced water management and advancing toward more sustainable operational schemes in the oil industry.

An important limitation for implementing the valorization of produced water components is the variability in the chemical composition of the water over time, which may require continuous adjustments in treatment and valorization processes.

Keywords: circular economy, hydrocarbon production water, reinjection, waste valorization, water treatment.

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera, el agua de producción es un subproducto generado en grandes volúmenes durante la extracción de hidrocarburos, en campos maduros, los cortes de agua suelen estar por encima del 80%, es decir, que, del total de los fluidos extraído, el 80% es agua de producción. Tradicionalmente, esta agua ha sido considerada una corriente residual que requiere procesos de tratamiento y disposición final, lo que representa costos operativos significativos para las compañías operadoras. No obstante, su composición fisicoquímica contiene diversos compuestos disueltos y suspendidos que pueden ser potencialmente aprovechados dentro de esquemas de economía circular, lo que abre la posibilidad de transformar este subproducto en una fuente de valor mediante la recuperación de componentes y su posible reutilización en diferentes procesos industriales.

El campo Platanillo, como ocurre en muchas operaciones de producción de hidrocarburos, enfrenta desafíos ambientales, económicos y operacionales asociados a la gestión del agua de producción. Las características fisicoquímicas de esta agua, tales como su alta salinidad, la presencia de metales disueltos, sólidos suspendidos y compuestos asociados a la producción petrolera, requieren procesos de tratamiento que incrementan los costos operativos y energéticos del sistema de manejo de agua. Adicionalmente, una gestión inadecuada de este recurso puede generar impactos ambientales sobre los ecosistemas circundantes, lo que hace necesario desarrollar estrategias que permitan optimizar su manejo y reducir los riesgos asociados a su disposición.

La operación del campo Platanillo enfrenta actualmente una problemática asociada al incremento progresivo del corte de agua en la producción, situación que ha generado una disminución en los volúmenes de petróleo producido y un aumento significativo en los costos operativos relacionados con el manejo y reinyección del agua de producción. Este incremento en los volúmenes de agua tratada implica mayores requerimientos energéticos en los sistemas de bombeo de alta presión

(HPS), así como un mayor consumo de productos químicos y recursos destinados al control de incrustaciones, corrosión y disposición final, afectando la eficiencia operativa y la sostenibilidad económica del campo.

En este contexto, resulta fundamental caracterizar detalladamente el agua de producción del campo Platanillo para identificar sus principales componentes y evaluar su potencial de aprovechamiento. El conocimiento de las propiedades fisicoquímicas permite determinar alternativas tecnológicas que faciliten la recuperación de compuestos presentes, así como mejorar los procesos de tratamiento requeridos para la disposición o reutilización. De esta manera, la caracterización se convierte en una herramienta clave para la toma de decisiones técnicas orientadas a una gestión más eficiente y sostenible del agua de producción.

El análisis de las posibilidades de valorización de los componentes presentes en el agua de producción permite evaluar estrategias que contribuyan a reducir los costos operativos asociados a su manejo. La recuperación de parte de los sólidos y compuestos disueltos presentes en el agua podría disminuir el volumen y la carga de contaminantes que deben ser gestionados mediante reinyección. Esto permitiría mejorar las condiciones operativas del sistema de inyección, reduciendo potenciales problemas de incrustación, corrosión y ensuciamiento en los equipos.

La mejora en la calidad del agua de reinyección puede traducirse en condiciones hidráulicas más favorables para el sistema de bombeo de alta presión (HPS), lo que permitiría disminuir la presión requerida para la inyección. Esta reducción en la presión de operación se reflejaría en un menor consumo energético de las bombas y, en consecuencia, en una disminución del consumo de combustible en los generadores que alimentan el sistema, generando ahorros operativos asociados al manejo del agua de producción y contribuyendo a mejorar el desempeño ambiental de las operaciones petroleras.

A pesar de que a nivel internacional existen múltiples estudios relacionados con el tratamiento y reutilización del agua de producción, en Colombia aún son limitadas las investigaciones que integran la caracterización fisicoquímica del agua producida con análisis de valorización de sus componentes bajo condiciones operativas reales de campos petroleros. En particular, para el campo Platanillo no se encontraron estudios académicos orientados al aprovechamiento de los componentes presentes en el agua de producción como estrategia para reducir impactos ambientales y optimizar los costos asociados a su manejo y reinyección. En este contexto, el presente estudio busca aportar información técnica que permita avanzar hacia modelos más eficientes de gestión del agua de producción, integrando criterios de sostenibilidad, optimización de recursos y reducción de efectos ambientales adversos. De esta manera, la investigación se enfoca en evaluar el potencial de aprovechamiento de los componentes fisicoquímicos presentes en el agua de producción del campo Platanillo, promoviendo estrategias de valorización y enfoques de economía circular que contribuyan a una operación petrolera más competitiva y ambientalmente responsable.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Identificar el potencial de aprovechamiento de los componentes fisicoquímicos del agua de producción petrolera del campo Platanillo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización fisicoquímica del agua de producción del campo Platanillo analizando los parámetros de sólidos suspendidos totales, aceite en agua, hierro total, bario, sulfatos, cloruros y dureza total.
- Analizar los aspectos ambientales asociados a los procesos de recuperación de los componentes del agua de producción.
- Proponer alternativas estratégicas dentro de un contexto de economía circular de aprovechamiento de los componentes del agua de producción.

ANTECEDENTES

El incremento del corte de agua constituye una de las principales problemáticas operacionales de la industria petrolera mundial, especialmente en campos maduros sometidos a procesos de recuperación secundaria mediante inyección de agua. Diversos estudios reportan que, a nivel global, por cada barril de petróleo producido se generan en promedio entre tres y cinco barriles de agua de producción, relación que puede incrementarse significativamente en yacimientos envejecidos, alcanzando proporciones superiores a 10:1 en algunos campos maduros (Iggunnu, E. T., & Chen, G. Z. 2014). El aumento en la producción de agua incrementa considerablemente los costos asociados al tratamiento, manejo, transporte y reinyección, afectando la eficiencia operativa y la sostenibilidad económica de las operaciones petroleras. Este efluente se genera durante la extracción de hidrocarburos y está compuesto por una mezcla de agua de formación, agua de inyección y fluidos asociados al proceso productivo, lo que da lugar a una matriz compleja que contiene sales disueltas, hidrocarburos residuales, metales, compuestos orgánicos y sólidos suspendidos (Veil et al., 2004). Debido a su elevada salinidad y a la presencia de múltiples contaminantes, el tratamiento y disposición del agua de producción representan una parte significativa de los costos operativos en los campos petroleros.

Diversos estudios han documentado la composición química y los posibles impactos ambientales asociados al manejo inadecuado de este tipo de aguas. Silva, Santana y Ribeiro (2019) señalan que la composición del agua de producción puede variar significativamente entre campos petroleros dependiendo de factores geológicos, del tipo de formación y de las estrategias de producción implementadas. Esta variabilidad hace necesario realizar caracterizaciones fisicoquímicas específicas para cada campo con el fin de diseñar estrategias de tratamiento adecuadas.

Parámetro	Rango típico reportado	Unidad	Posible efecto operacional/ambiental
Sólidos suspendidos totales (SST)	10 – 1000	mg/L	Incrustación, taponamiento y fouling
Aceite y grasas (OIW)	2 – 1000	mg/L	Contaminación de cuerpos de agua y emulsiones
Cloruros (Cl^-)	1000 – 200000	mg/L	Corrosión y alta salinidad
Sulfatos (SO_4^{2-})	10 – 3000	mg/L	Formación de incrustaciones
Hierro total (Fe)	0.1 – 100	mg/L	Corrosión y precipitación férrica
Bario (Ba^{2+})	1 – 1000	mg/L	Formación de sulfato de bario (BaSO_4)
Dureza total (CaCO_3)	100 – 20000	mg/L	Incrustaciones carbonatadas
pH	4 – 9	—	Estabilidad química y corrosión
Conductividad	5000 – 250000	$\mu\text{S/cm}$	Indicador de sales disueltas
Oxígeno disuelto	<0.1 – 8	mg/L	Corrosión y biofouling

Tabla 1. Variabilidad típica de la composición fisicoquímica del agua de producción en campos petroleros, Adaptado de Veil et al. (2004), Neff et al. (2011), Fakhru'l-Razi et al. (2009) y Al-Ghouti et al. (2019).

Diversos estudios han reportado eficiencias significativas en la remoción de contaminantes mediante tecnologías aplicadas al tratamiento de agua de producción. Los procesos de separación física primaria pueden alcanzar remociones de sólidos suspendidos entre 50 % y 70 %, mientras que tecnologías de membranas como nanofiltración y ósmosis inversa pueden lograr rechazos superiores al 90 % para sales disueltas y compuestos orgánicos. Asimismo, procesos avanzados de oxidación y filtración especializada han demostrado alta eficiencia en la reducción de hidrocarburos, compuestos incrustantes y material asociado al fouling en sistemas de reinyección (Amakiri, K. T., Onn, C. C., Noeman, A., Bilad, M. R., Nordin, N. A. H. M., & Arahman, N. 2022).

Investigaciones más recientes, como el estudio *“Temporal Characterization and Statistical Analysis of Flowback and Produced Waters and Their Potential for Reuse”* desarrollado por Oetjen et al. (2018), han comenzado a abordar el manejo del agua de producción desde un enfoque de economía circular, en el cual este subproducto deja de considerarse exclusivamente un residuo y pasa a ser evaluado como una posible fuente de recursos recuperables. En esta investigación se realizó una caracterización temporal de aguas de *flowback* y producción provenientes de operaciones petroleras en la formación Niobrara, identificando la presencia de compuestos geogénicos como hierro, cloruros, sales disueltas de alta alcalinidad y otros componentes asociados a procesos de incrustación y corrosión, así como compuestos orgánicos y aditivos químicos utilizados durante las operaciones de fracturamiento hidráulico. Para ello, los autores emplearon técnicas analíticas avanzadas como cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-QToF-MS), cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS) y análisis convencionales de calidad de agua. Los resultados demostraron que, mediante procesos adecuados de separación y tratamiento, es posible recuperar compuestos químicos y minerales con potencial de reutilización en diferentes aplicaciones industriales o de reincorporación en procesos productivos.

De manera similar, otros estudios han señalado que la recuperación de compuestos presentes en el agua de producción puede contribuir a reducir la carga contaminante de los efluentes, disminuir los costos asociados a su tratamiento y promover prácticas más sostenibles en la industria energética (Al-Ghouti et al., 2019). Sin embargo, la viabilidad de estas estrategias depende en gran medida del conocimiento detallado de la composición del agua producida y de las condiciones operativas específicas de cada campo petrolero.

En Colombia también se han desarrollado iniciativas orientadas al aprovechamiento y reutilización del agua de producción dentro del marco de la economía circular. Un ejemplo relevante corresponde a Ecopetrol, empresa que ha implementado estrategias de recirculación y reúso de agua industrial en diferentes áreas de

operación. En el Complejo Industrial de Barrancabermeja se desarrolló un sistema integral de tratamiento y recirculación de agua industrial que ha permitido reducir la captación de agua del río Magdalena y mejorar la sostenibilidad operativa de los procesos de refinación (Asociación Colombiana del Petróleo y Gas [ACP], s.f.). Asimismo, en campos de producción como Cupiagua y Cusiana, ubicados en el departamento de Casanare, se han implementado estrategias de reutilización del agua de producción tratada en actividades como reinyección, lavado de equipos y control de material particulado en vías internas, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales y a la optimización de costos operacionales (ACP, s.f.).

A pesar de los avances en la investigación internacional sobre el tratamiento y valorización del agua de producción, en muchos campos petroleros de América Latina aún existe una limitada disponibilidad de estudios técnicos que integren la caracterización fisicoquímica del agua con análisis de viabilidad para la recuperación de sus componentes. En particular, en el caso del campo Platanillo, representa un caso de estudio relevante debido a las condiciones operativas y ambientales particulares asociadas a su producción petrolera. Su ubicación en el departamento del Putumayo, una región de alta sensibilidad ecológica y estratégica desde el punto de vista ambiental, hace especialmente importante la implementación de alternativas orientadas a optimizar la gestión del agua de producción y reducir los posibles efectos asociados a su manejo y disposición. Adicionalmente, el campo presenta volúmenes significativos de producción de agua asociados al incremento del corte de agua, situación que genera mayores requerimientos de tratamiento, reinyección y consumo energético. Asimismo, la disponibilidad de acceso operacional al campo y a las corrientes de agua de producción permitió desarrollar un análisis técnico bajo condiciones reales de operación, aspecto poco documentado en estudios académicos nacionales. Finalmente, el interés de la compañía operadora en evaluar estrategias de aprovechamiento y optimización del manejo del agua de producción evidencia la pertinencia industrial y aplicada del presente estudio.

En este sentido, el desarrollo de investigaciones orientadas a la caracterización detallada del agua de producción y al análisis de posibles alternativas de valorización resulta fundamental para identificar oportunidades de aprovechamiento de sus componentes y contribuir al desarrollo de estrategias de gestión más eficientes y sostenibles en la industria petrolera.

MARCO TEÓRICO

Agua de producción en la industria petrolera

El agua de producción es el principal subproducto líquido generado durante la extracción de petróleo y gas. Su volumen varía según la edad del pozo y las

condiciones del yacimiento, pudiendo incluso superar al volumen de hidrocarburos extraídos en fases avanzadas de producción (Veil et al., 2004). Esta agua suele contener una mezcla compleja de sales, metales pesados, hidrocarburos disueltos, compuestos orgánicos volátiles, e incluso materiales radiactivos en bajas concentraciones (Silva, Santana & Ribeiro, 2019).

Su disposición sin un tratamiento adecuado representa un riesgo ambiental importante, ya que puede contaminar fuentes hídricas, suelos y afectar la biodiversidad. Por ello, la gestión de este efluente se ha convertido en una prioridad para la industria petrolera, tanto desde una perspectiva ambiental como económica (Al-Ghouti et al., 2019).

Caracterización fisicoquímica del agua de producción

La caracterización fisicoquímica del agua de producción es fundamental para evaluar su comportamiento en procesos industriales y determinar sus posibilidades de tratamiento, reinyección o aprovechamiento. Los parámetros comúnmente analizados incluyen pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza, sólidos totales disueltos (STD), sólidos suspendidos y la presencia de metales y compuestos orgánicos asociados a las operaciones petroleras (Gale, s.f.).

Una caracterización precisa permite seleccionar tecnologías adecuadas de tratamiento, evitar problemas operativos como incrustaciones o corrosión en sistemas de producción, y establecer usos potenciales del agua tratada en procesos secundarios (Gale, s.f.).

Fundamentos químicos asociados al agua de producción

El agua de producción contiene diferentes componentes químicos disueltos y suspendidos que pueden afectar significativamente los procesos de tratamiento, transporte e inyección dentro de las operaciones petroleras. La presencia de iones como calcio, bario, hierro y sulfatos favorece la formación de incrustaciones

minerales cuando se presentan cambios en las condiciones fisicoquímicas del sistema, tales como variaciones de presión, temperatura o composición química (Stumm & Morgan, 1996).

Uno de los fenómenos más comunes en sistemas de reinyección es la precipitación de sulfato de bario (BaSO_4), compuesto de muy baja solubilidad que se forma al entrar en contacto corrientes incompatibles ricas en bario y sulfatos. Estas incrustaciones pueden reducir la eficiencia hidráulica de tuberías, válvulas, filtros y bombas de inyección. Asimismo, altas concentraciones de cloruros y oxígeno disuelto pueden acelerar procesos de corrosión electroquímica en equipos metálicos, afectando la integridad de la infraestructura (Housecroft & Sharpe, 2018).

De igual manera, la presencia de sólidos suspendidos, hidrocarburos residuales y compuestos precipitados puede favorecer fenómenos de *fouling* y taponamiento en sistemas de filtración y membranas, reduciendo la eficiencia operacional de los procesos de tratamiento del agua de producción (Neff et al., 2011).

Normatividad aplicable al manejo del agua de producción

El manejo del agua de producción en la industria petrolera se encuentra regulado por diferentes lineamientos ambientales y operacionales orientados a minimizar los impactos asociados a su tratamiento, disposición y reinyección. En Colombia, el Decreto 1076 de 2015 compila la normativa relacionada con el uso y protección del recurso hídrico, estableciendo disposiciones aplicables al manejo de vertimientos y aguas residuales industriales (Decreto 1076 de 2015). Asimismo, la Resolución 631 de 2015 establece parámetros y límites máximos permisibles para vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado público, sirviendo como referencia para el control de variables fisicoquímicas asociadas al tratamiento de aguas industriales (Resolución 631 de 2015).

En operaciones petroleras, gran parte del agua de producción es gestionada mediante reinyección en formaciones geológicas, proceso que requiere mantener condiciones fisicoquímicas adecuadas para prevenir fenómenos de incrustación, corrosión y taponamiento en los sistemas de bombeo e inyección. Por esta razón, organismos internacionales como la American Petroleum Institute (API), la National Association of Corrosion Engineers (NACE) y la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) han desarrollado lineamientos técnicos relacionados con el monitoreo y control de parámetros asociados a la calidad del agua producida y su impacto sobre la integridad operacional de los sistemas petroleros (API, 2010; EPA, 2019).

Reutilización del agua de producción: tratamiento y oportunidades

La reutilización del agua de producción requiere de tratamientos específicos que permitan remover los contaminantes presentes y adecuar sus propiedades para usos secundarios. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran la filtración, la desmineralización, la ósmosis inversa, la adsorción, y los procesos de oxidación avanzada (SETAPHT, s.f.).

Las tecnologías de membranas, particularmente nanofiltración y ósmosis inversa, han sido ampliamente utilizadas en el tratamiento de aguas industriales debido a su capacidad para remover sales disueltas, compuestos orgánicos y sólidos suspendidos mediante mecanismos de separación selectiva. La nanofiltración presenta alta eficiencia en la remoción de iones divalentes como sulfatos y calcio, mientras que la ósmosis inversa puede alcanzar rechazos superiores al 95 % de sólidos disueltos totales (Baker, 2012).

Sin embargo, el desempeño de estas tecnologías puede verse afectado por fenómenos de *fouling* e incrustación asociados a la presencia de sólidos suspendidos, compuestos precipitados y material orgánico residual, por lo que

generalmente requieren etapas previas de pretratamiento físico y químico (Mulder, 1996; Fakhru'l-Razi et al., 2009)

El agua tratada puede destinarse a diversos usos como el riego en zonas áridas, reinyección para recuperación mejorada, lavado de instalaciones, e incluso en procesos industriales no sensibles. Además, la recuperación de compuestos de valor presentes en esta agua, como boro, litio o hidrocarburos remanentes, representa una oportunidad para desarrollar nuevas líneas de negocio (Oetjen et al., 2018; Câmara, Oliveira & Siman, 2020).

Análisis de aspectos ambientales, económicos y sociales del aprovechamiento del agua de producción

El aprovechamiento del agua de producción desde un enfoque circular puede generar beneficios en múltiples niveles. Ambientalmente, se reduce la presión sobre fuentes hídricas naturales y se minimiza el riesgo de contaminación. Desde el punto de vista económico, se disminuyen los costos de tratamiento y disposición final, mientras que socialmente se favorece la aceptación comunitaria al promover prácticas sostenibles y responsables (Revista Gestión y Ambiente, 2018; Kinnaman, 2011).

En conjunto, estos factores fortalecen la competitividad del sector petrolero y lo alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente los relacionados con agua limpia y saneamiento (ODS 6), producción y consumo responsables (ODS 12), y acción por el clima (ODS 13) (ONU, 2015).

METODOLOGÍA

El desarrollo del presente proyecto se estructuró en cuatro etapas principales, cada una alineada con los objetivos específicos planteados. Estas etapas integran técnicas de análisis documental, trabajo de laboratorio, evaluación técnico-económica y formulación de propuestas estratégicas, dentro de un enfoque interdisciplinario y bajo el marco de la economía circular.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado de tipo descriptivo y analítico, orientado a la caracterización fisicoquímica del agua de producción del campo Platanillo y a la evaluación técnica preliminar de alternativas de valorización de sus componentes. El estudio integró actividades de muestreo, análisis fisicoquímico, revisión bibliográfica, análisis de balances de materia y evaluación técnico-económica simplificada de las tecnologías propuestas.

1. Revisión bibliográfica especializada

Esta etapa tuvo como objetivo construir una base conceptual y técnica sobre las propiedades fisicoquímicas del agua de producción y los métodos de separación, recuperación y valorización aplicables. Se abordaron los siguientes aspectos:

- Composición típica del agua de producción en la industria petrolera.
- Propiedades fisicoquímicas relevantes para su tratamiento.
- Tecnologías de tratamiento y recuperación aplicadas en otros contextos.
- Casos de éxito en el uso del agua de producción como recurso.

La evaluación de alternativas de valorización se realizó mediante revisión bibliográfica especializada y análisis técnico de tecnologías aplicables al tratamiento del agua de producción. Se analizaron procesos de separación física, precipitación química, filtración avanzada y tecnologías de membranas, considerando criterios asociados a eficiencia de remoción, compatibilidad con las condiciones operativas

del campo, potencial de recuperación de compuestos y requerimientos operacionales.

Asimismo, se desarrollaron balances simplificados de materia utilizando las concentraciones obtenidas durante la caracterización fisicoquímica y el caudal promedio diario de agua de producción del sistema de reinyección, con el fin de estimar el potencial de recuperación de componentes presentes en el agua producida.

2. Muestreo y caracterización fisicoquímica del agua de producción

El muestreo se realizó directamente en válvulas ubicadas en la línea de proceso que comunica la etapa final de tratamiento del agua de producción con la línea de precarga de las bombas HPS utilizadas para reinyección. La selección de este punto de muestreo se realizó con el fin de obtener una muestra representativa de las condiciones reales del agua posterior al tratamiento operativo del campo.

Para la recolección de las muestras se utilizaron botellas de vidrio claro de borosilicato con tapa rosca en PTFE (politetrafluoroetileno), con capacidad de 200 mL, volumen suficiente para la obtención de muestra y contramuestra destinadas a los análisis fisicoquímicos. Las muestras fueron analizadas inmediatamente después de la recolección, razón por la cual no se realizaron procedimientos de preservación mediante acidulación.

La elección de los métodos analíticos para la caracterización fisicoquímica del agua de producción se fundamentó en la necesidad de obtener resultados precisos, reproducibles y comparables con los estándares internacionales establecidos para matrices de alta complejidad, como las aguas asociadas a la explotación de hidrocarburos. Los parámetros analizados de sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas, hierro, bario, sulfatos, cloruros y dureza total, fueron seleccionados por su incidencia directa en los procesos de incrustación, corrosión, emulsificación y eficiencia de reinyección, así como por su relevancia en los programas de manejo

ambiental y valorización de componentes inorgánicos (Neff et al., 2011; Al-Ghouti et al., 2019).

El análisis de sólidos suspendidos totales (SST) mediante el método SM 2540 D (gravimétrico) permitió cuantificar la fracción insoluble que afecta la capacidad de filtración, la operación de separadores y la potencial formación de depósitos en líneas y pozos de inyección. Se eligió este método por su robustez, bajo costo y aplicabilidad en matrices con alta carga de aceites y sólidos (APHA et al., 2017).

El contenido de aceite en agua (OIW) se determinó mediante espectrofotometría utilizando el programa analítico correspondiente del espectrofotómetro Hach DR3900, técnica ampliamente utilizada para el monitoreo rápido de hidrocarburos residuales en aguas industriales y de producción petrolera. Este método permite estimar la concentración de compuestos oleosos presentes en el agua mediante medición espectrofotométrica, facilitando la evaluación operacional de la eficiencia de los sistemas de separación y tratamiento implementados en campo. Adicionalmente, su aplicación presenta ventajas operacionales asociadas a rapidez analítica, facilidad de ejecución y menor requerimiento de preparación especializada de muestras en comparación con otras técnicas instrumentales más complejas.

El hierro total (Fe) se analizó con el método colorimétrico Hach 8008 FerroVer®/SM 3500-Fe B, basado en la formación de complejos con fenantrolina, lo cual permite determinar concentraciones bajas con alta sensibilidad en aguas con alto contenido de sales. Su elección responde a la necesidad de monitorear procesos de corrosión y oxidación en líneas de producción e inyección (Hach Company, 2017; Metcalf & Eddy, 2014).

El bario (Ba) se determinó mediante espectrofotometría utilizando el programa analítico correspondiente del espectrofotómetro Hach DR3900, técnica utilizada para la cuantificación de este ion en matrices acuosas industriales. La determinación de bario resulta de especial importancia debido a su relación directa con la

formación de sulfato de bario (BaSO_4), una de las incrustaciones minerales más comunes en sistemas de producción e inyección de agua en la industria petrolera (Veil et al., 2004; Housecroft & Sharpe, 2018). Adicionalmente, la evaluación de este parámetro permite identificar tendencias potenciales de *scaling* y posibles afectaciones sobre la eficiencia operacional de tuberías, filtros y bombas de reinyección.

Los sulfatos (SO_4^{2-}) se determinaron por turbidimetría con el método Hach 8051 SulfaVer 4/SM 4500- SO_4 E, basado en la formación de sulfato de bario coloidal. Este procedimiento es rápido, reproducible y permite evaluar el potencial de incrustación por reacción con cationes como Ca^{2+} y Ba^{2+} (APHA et al., 2017).

Los cloruros (Cl^-), principales responsables de la corrosión localizada en metales, se analizaron mediante los métodos SM 4500- Cl^- B (argentométrico)), seleccionado por su precisión en rangos amplios de concentración (5–20 000 mg/L) y su adaptabilidad a muestras con alto contenido de sales (Stumm & Morgan, 1996).

Finalmente, la dureza total (como CaCO_3) se determinó mediante el método SM 2340 C (titulación con EDTA) , que permite calcular la concentración combinada de calcio y magnesio, factores esenciales para evaluar la propensión a la incrustación en equipos y pozos de reinyección (Davis, 2010).

En conjunto, los métodos seleccionados aseguran la trazabilidad analítica, la comparabilidad con las normas EPA, ASTM y APHA, y la confiabilidad necesaria para desarrollar estrategias de valorización de los componentes presentes en el agua de producción del campo Platanillo.

Actividades clave:

- Selección y aplicación de técnicas analíticas (espectrofotometría, gravimetría, titulación, entre otras) para determinar:
 - Tipos y concentraciones de sales.

- Presencia de hidrocarburos residuales.
- Metales pesados (Hierro Fe, Bario Ba) u otros contaminantes de interés.

Parámetro analizado	Método / Referencia empleada	Técnica analítica utilizada	Equipo utilizado	Objetivo operacional asociado
Sólidos suspendidos totales (SST/TSS)	Standard Methods 2540 D	Gravimetría por filtración y secado	Sistema de filtración y horno de secado	Evaluación de sólidos asociados a taponamiento y fouling
Aceite en agua (OIW)	Programa Hach para aceite y grasas	Espectrofotometría	Hach DR3900	Determinación de hidrocarburos residuales y desempeño del tratamiento
Hierro total (Fe)	Hach Método 8008 FerroVer®	Espectrofotometría	Hach DR3900	Evaluación de corrosión y precipitación férrica
Bario (Ba)	Programa Hach para determinación de bario	Espectrofotometría	Hach DR3900	Evaluación de potencial de incrustación
Sulfatos (SO_4^{2-})	Hach Método 8051 SulfaVer 4	Turbidimetría / espectrofotometría	Hach DR3900	Evaluación de formación de incrustaciones
Cloruros (Cl^-)	Standard Methods 4500- Cl^- B	Titulación argentométrica	Material volumétrico de laboratorio	Evaluación de salinidad y corrosión
Dureza total (como CaCO_3)	Standard Methods 2340 C	Titulación con EDTA	Material volumétrico de laboratorio	Determinación de tendencia incrustante
Conductividad eléctrica	Standard Methods 2510 B	Conductimetría	Conductímetro portátil	Evaluación de sales disueltas
pH	Standard Methods 4500- H^+ B	Potenciometría	pH-metro portátil	Evaluación de estabilidad química

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos analizados, métodos y técnicas analíticas empleadas en la caracterización del agua de producción

- Clasificación y priorización de componentes en función de su viabilidad de recuperación o reutilización.

2.1 Tratamiento y análisis de datos

Los resultados obtenidos durante la caracterización fisicoquímica fueron organizados y analizados mediante herramientas de procesamiento de datos en Microsoft Excel®. Debido a que la investigación correspondió a una caracterización puntual basada en un único evento de muestreo y un resultado analítico por parámetro evaluado, no se desarrolló un tratamiento estadístico inferencial ni análisis de variabilidad temporal.

El análisis de los resultados se realizó mediante interpretación técnica de las concentraciones obtenidas y su relación con fenómenos operacionales asociados a incrustación, corrosión, *fouling* y desempeño de los sistemas de reinyección. Asimismo, los datos obtenidos fueron utilizados para el desarrollo de balances simplificados de materia y estimaciones preliminares relacionadas con el potencial de valorización de los componentes presentes en el agua de producción.

Para la estimación de masas teóricas recuperables se utilizaron ecuaciones básicas de conservación de masa y conversiones de unidades entre concentración, caudal y masa, empleando como base de cálculo el caudal promedio diario de agua de producción del sistema de reinyección del campo Platanillo. La estimación de masa recuperable se desarrolló mediante la siguiente relación:

$$M = Q \times C$$

donde:

M = masa estimada del componente (mg/día o kg/día)

Q = caudal de agua producido (L/día)

C = concentración del componente en el agua (mg/L)

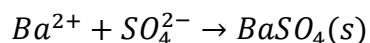
Posteriormente, se realizaron conversiones de unidades para expresar los resultados en kg/día o toneladas/año, utilizando factores de conversión entre barriles, litros y metros cúbicos:

$$1 \text{ bbl} = 158,987 \text{ L}$$

y:

$$\text{kg/día} = \frac{C \text{ (mg/L)} \times Q \text{ (L/día)}}{1.000.000}$$

Adicionalmente, para el análisis preliminar del potencial de formación de incrustaciones se consideraron las relaciones químicas asociadas a la precipitación de sales de baja solubilidad, particularmente sulfato de bario (BaSO_4), derivadas de la interacción entre iones bario y sulfatos presentes en el agua de producción:



Las conversiones, balances y estimaciones técnico-económicas fueron desarrolladas utilizando hojas de cálculo en Microsoft Excel®, con base en criterios operacionales y fundamentos químicos reportados en literatura técnica especializada.

3. Evaluación del efecto y viabilidad de valorización

Con base en los resultados obtenidos durante la caracterización y los balances de materia realizados, se desarrolló un análisis técnico-económico simplificado orientado a estimar el efecto potencial de las estrategias de valorización propuestas sobre los costos operativos asociados al manejo del agua de producción.

El análisis consideró variables relacionadas con consumo energético, requerimientos de tratamiento químico, operación de sistemas de reinyección y posible reducción de problemas operacionales asociados a incrustación y fouling. Asimismo, se realizó una proyección económica a diez años utilizando una tasa de descuento del 10 %, con el propósito de evaluar preliminarmente la viabilidad económica de las tecnologías consideradas.

Actividades clave:

- Realización de un análisis costo-beneficio de los métodos potenciales de recuperación.
- Evaluación ambiental preliminar de las tecnologías propuestas mediante análisis conceptual de variables operacionales y ambientales asociadas a consumo energético, reducción de carga contaminante, disminución de incrustaciones y potencial reducción de volúmenes de agua destinados a reinyección.

La evaluación ambiental desarrollada en la presente investigación correspondió a un análisis ambiental preliminar de las alternativas de valorización propuestas y no a un análisis de ciclo de vida (ACV) completo bajo metodología ISO 14040–14044. El análisis se realizó a partir de criterios técnicos y operacionales asociados al manejo del agua de producción en el campo Platanillo, considerando variables como reducción potencial de incrustaciones, disminución de sólidos y compuestos disueltos, reducción de requerimientos energéticos en sistemas de bombeo HPS, posible disminución del consumo de combustible y reducción del volumen de agua destinado a reinyección.

Los indicadores considerados durante la evaluación incluyeron consumo energético estimado, reducción potencial de carga contaminante, disminución de problemas operacionales asociados a corrosión y *fouling*, y posibles beneficios relacionados con la optimización del sistema de tratamiento y reinyección. El alcance del análisis

se limitó a una evaluación conceptual basada en las condiciones operativas del campo y en información bibliográfica reportada para tecnologías similares aplicadas al tratamiento de agua de producción.

- Identificación de impactos sociales asociados, tales como aceptación comunitaria, generación de empleo y mejoras en la gestión ambiental local.

La evaluación de los aspectos sociales asociados a las alternativas de valorización propuestas se desarrolló mediante un análisis conceptual basado en criterios de sostenibilidad operacional, reducción potencial de impactos ambientales y posibles beneficios asociados a la optimización del manejo del agua de producción en el campo Platanillo. Para ello, se consideraron variables relacionadas con disminución de riesgos operacionales, reducción potencial de carga contaminante, optimización del consumo energético y contribución al fortalecimiento de prácticas asociadas a economía circular dentro de la operación petrolera.

El análisis social se realizó a partir de revisión bibliográfica y análisis contextual de las condiciones operativas y ambientales del campo, considerando especialmente la relevancia del manejo del agua de producción en una zona ambientalmente sensible como el departamento del Putumayo.

Por otra parte, el análisis económico se desarrolló mediante una evaluación técnico-económica simplificada de las tecnologías propuestas, considerando escenarios preliminares de implementación orientados a minimizar inversiones en infraestructura mayor existente en el campo. Para ello, se analizaron variables asociadas a costos operacionales (OPEX), consumo energético, requerimientos químicos, potencial reducción de presión en sistemas de reinyección y posibles ahorros asociados a disminución del consumo de combustible en los generadores que alimentan las bombas HPS.

Asimismo, se desarrolló una estimación preliminar de costos de implementación relacionados con sistemas de membranas, filtración y operación básica de las alternativas propuestas, así como una proyección económica simplificada a diez años utilizando una tasa de descuento del 10 %, con el fin de evaluar conceptualmente la viabilidad económica de las estrategias analizadas.

Con el propósito de establecer los criterios considerados durante la evaluación preliminar de las alternativas propuestas, la **Tabla 3** presenta las principales variables analizadas y las herramientas utilizadas para el desarrollo de los componentes social, ambiental y económico de la investigación.

Componente evaluado	Variables analizadas	Herramienta utilizada
Aspectos sociales	sostenibilidad, reducción de impactos, economía circular	revisión bibliográfica y análisis conceptual
Aspectos económicos	OPEX, energía, químicos, presión de reinyección	análisis técnico-económico simplificado
Aspecto ambiental	reducción de carga contaminante y consumo energético	análisis conceptual

Tabla 3. Variables y criterios considerados en la evaluación preliminar social, ambiental y económica de las alternativas propuesta.

4. Propuesta de estrategias de aprovechamiento en economía circular

Con base en los resultados anteriores, se desarrollará una propuesta técnica y estratégica de valorización del agua de producción, considerando su aplicación en el contexto del campo Platanillo.

Actividades clave:

- Identificación de procesos industriales que podrían incorporar los componentes recuperados.
- Definición de lineamientos técnicos para la implementación de procesos de recuperación en campo.
- Propuesta de recomendaciones para el escalamiento y aplicación práctica de las tecnologías evaluadas.

Con el fin de garantizar la trazabilidad metodológica de la investigación y establecer la relación entre los objetivos específicos, las actividades desarrolladas y las herramientas empleadas durante el estudio, se presenta la **Tabla 4**, en la cual se resumen las principales etapas metodológicas ejecutadas para la caracterización fisicoquímica del agua de producción y los análisis de alternativas de valorización para el campo Platanillo.

Objetivo específico	Actividad realizada	Herramienta / metodología empleada
Realizar la caracterización fisicoquímica del agua de producción del campo Platanillo analizando los parámetros de sólidos suspendidos totales, aceite en agua, hierro total, bario, sulfatos, cloruros y dureza total.	Muestreo y análisis fisicoquímico del agua de producción	Standard Methods, métodos Hach DR3900, titulación y gravimetría
Analizar los aspectos ambientales asociados a los procesos de recuperación de los componentes del agua de producción.	Evaluación conceptual de beneficios ambientales y operacionales asociados al tratamiento del agua	Revisión bibliográfica, análisis técnico y balances simplificados

Proponer alternativas estratégicas dentro de un contexto de economía circular para el aprovechamiento de los componentes del agua de producción.	Evaluación de tecnologías de tratamiento, balances de materia y análisis técnico-económico	Literatura científica especializada, balances de materia, estimaciones económicas y Microsoft Excel®
--	--	--

Tabla 4. Relación entre objetivos específicos, actividades metodológicas y herramientas empleadas.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE PLATANILLO

El análisis físicoquímico del agua de producción permitió identificar las principales características de la corriente generada en el campo Platanillo, con el fin de evaluar su potencial de valorización y los retos técnicos asociados a su tratamiento. En la **Tabla 5** se presentan las concentraciones obtenidas para los parámetros más relevantes: sólidos suspendidos totales, aceite en agua, hierro, bario, sulfatos, cloruros y dureza total, expresadas en miligramos por litro (mg/L).

Los resultados muestran que el agua de producción presenta una concentración promedio de sólidos suspendidos totales (SST) de 100 mg/L, valor característico de sistemas con arrastre de partículas finas, lodos y compuestos orgánicos parcialmente estabilizados. Este nivel de sólidos se encuentra dentro del rango reportado para aguas de producción de campos maduros, donde el proceso de separación primaria no logra remover completamente las fracciones dispersas.

El contenido de aceite y grasas (OIW) se cuantificó en 10 mg/L, lo que indica una adecuada eficiencia del sistema de separación físico-gravitacional del campo, compuesto por tanques “*skimming*” los cuales son usados para recuperar aceite y grasas a través del método de desnate y unidades de filtración compuestas por lechos orgánicos. Este resultado cumple con los límites de reinyección establecidos por el Área de Yacimientos de la compañía, que dictaminan hasta 100 ppm de sólidos en suspensión total y 10 ppm para aceite en agua.

El hierro total (Fe) se determinó en 3 mg/L, concentraciones típicas en sistemas de reinyección donde pueden presentarse fenómenos de corrosión y precipitación de óxidos férricos. Este parámetro es clave para evaluar la estabilidad de las líneas de conducción, ya que el hierro disuelto puede oxidarse y formar incrustaciones que disminuyen la eficiencia hidráulica.

En cuanto al bario (Ba), se obtuvo una concentración de 5 mg/L, valor relevante por su potencial de formar sulfato de bario (BaSO_4), una de las incrustaciones más difíciles de remover en sistemas de producción e inyección. La presencia de este elemento confirma la necesidad de controlar la interacción con los iones sulfato y mantener la compatibilidad química entre corrientes de producción e inyección.

Los sulfatos (SO_4^{2-}) se presentaron en una concentración de 500 mg/L, nivel que, combinado con los cationes de calcio, magnesio y bario, favorece la precipitación de sales poco solubles. Su cuantificación es esencial para el cálculo de los índices de saturación y la evaluación del riesgo de incrustaciones.

Los cloruros (Cl^-) fueron de 3500 mg/L, lo cual refleja la alta salinidad del agua de producción. Este valor se encuentra dentro del rango típico de aguas asociadas a yacimientos de crudo liviano en Colombia (3.000–15.000 mg/L) y tiene implicaciones directas en la corrosividad del sistema y la selección de materiales metálicos resistentes (Stumm & Morgan, 1996).

La dureza total dio 1500 mg/L como CaCO_3 , lo que indica una elevada presencia de cationes alcalinotérreos, principalmente calcio y magnesio. Este resultado corrobora la naturaleza incrustante del agua y refuerza la necesidad de implementar tratamientos de acondicionamiento químico antes de la reinyección o reutilización industrial.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el agua de producción del campo Platanillo presenta una composición compleja y alta mineralización, condiciones que requieren estrategias de manejo específicas. Sin embargo, los valores identificados también evidencian un potencial de aprovechamiento asociado principalmente a la recuperación de compuestos minerales como NaCl , CaSO_4 y BaSO_4 , así como a la posible mejora de las características fisicoquímicas del agua posterior a los procesos de tratamiento y separación propuestos. Estas condiciones podrían facilitar futuras alternativas de aprovechamiento o reutilización bajo criterios

técnicos y operacionales específicos, en concordancia con los principios de economía circular aplicados al sector hidrocarburos.

Parámetro analizado	Resultado	Unidad	Método / Técnica utilizada	Interpretación operacional
Sólidos suspendidos totales (SST/TSS)	100	mg/L	SM 2540 D – Gravimetría	Presencia moderada de sólidos con potencial de taponamiento y <i>fouling</i> en sistemas de filtración e inyección
Aceite en agua (OIW)	10	mg/L	Espectrofotometría Hach DR3900	Evidencia eficiencia operacional preliminar de los sistemas de separación primaria
Hierro total (Fe)	3	mg/L	Método Hach FerroVer® 8008	Posible contribución a procesos de corrosión y precipitación férrica
Bario (Ba)	5	mg/L	Programa Hach para bario	Presencia de ion con potencial de formación de incrustaciones tipo BaSO ₄
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	500	mg/L	Hach SulfaVer 4 Método 8051	Concentración asociada a potencial incrustante en sistemas de reinyección
Cloruros (Cl ⁻)	3500	mg/L	Método argentométrico (Mohr)	Alta salinidad asociada a fenómenos de corrosión
Dureza total (como CaCO ₃)	1500	mg/L	Titulación con EDTA	Elevada tendencia a formación de incrustaciones minerales
pH	7	Unidades de pH	Potenciometría	Condición cercana a neutralidad química

Tabla 5. Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua de producción del campo Platanillo

Los resultados de la caracterización fisicoquímica evidencian que el agua de producción del campo Platanillo presenta una composición altamente mineralizada y con presencia de compuestos asociados a fenómenos operacionales críticos en

sistemas de tratamiento e inyección. Los valores obtenidos para sulfatos, dureza total, cloruros y bario indican condiciones favorables para la formación de incrustaciones minerales y procesos de corrosión, mientras que la presencia de sólidos suspendidos y hierro puede contribuir al desarrollo de fenómenos de *fouling* y precipitación en equipos e infraestructura de reinyección.

Desde el punto de vista operacional, los resultados obtenidos permiten identificar componentes con potencial de valorización y recuperación dentro de esquemas de economía circular aplicados a la industria petrolera. Asimismo, los parámetros evaluados evidencian la necesidad de implementar estrategias de tratamiento orientadas a mejorar la estabilidad fisicoquímica del agua y optimizar las condiciones operativas del sistema de reinyección del campo Platanillo.

MÉTODOS DE VALORIZACIÓN DE COMPONENTES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica del agua de producción del campo Platanillo (bario, hierro, sulfatos, cloruros, dureza, sólidos suspendidos totales y aceite/grasas), se incluyen fundamentos de ingeniería de procesos, parámetros operativos típicos, rutas de producto, criterios de calidad para el material recuperado, riesgos HSE y puntos de control para asegurar desempeño. Los parámetros de conductividad eléctrica y oxígeno disuelto se tratan como variables habilitantes para la valorización (control de corrosión, incrustación y biofouling (biopelículas formadas por actividad de microorganismos)).

Bario (Ba^{2+}) → Baritina (BaSO_4)

Objetivo: remover Ba^{2+} para prevenir incrustaciones de sulfato de bario y recuperar baritina comercializable.

El bario disuelto del agua de producción forma incrustaciones con sulfato (BaSO_4 , $K_{sp} \approx 1.1 \times 10^{-10}$) un compuesto con muy poca solubilidad (Housecroft, C. E., & Sharpe, A. G. 2018), causando pérdidas de inyectividad y fallas en equipos. La recuperación controlada como baritina es viable mediante precipitación estequiométrica y cristalización asistida por 'semilla' o "seeding", obteniendo sólidos de alta densidad que pueden acondicionarse para usos industriales como densificante en lodos de perforación, conforme a API 13A si la pureza y la granulometría lo permiten.

Proceso de precipitación y recuperación de baritina (BaSO_4)

El proceso comienza con ajustar el pH del agua para mantenerlo entre 6,5 y 7,5, lo cual es necesario para que la reacción química sea eficiente y estable. Luego, se agrega sulfato de sodio (Na_2SO_4) o en algunos casos, ácido sulfúrico (H_2SO_4) neutralizado para provocar la precipitación del bario presente en el agua en forma de sulfato de bario (BaSO_4), también conocido como baritina.

El agua tratada pasa a un reactor con agitación, donde se mantienen partículas muy pequeñas de baritina semillas" que ayudan a que los nuevos cristales crezcan y se formen más rápido. El proceso de reacción y crecimiento de las partículas dura entre 20 y 60 minutos, en lo que se llama etapa de maduración.

Después, el líquido se clarifica y el sólido se pasa a una etapa de espesamiento para concentrarlo. Posteriormente, se realiza un lavado contracorriente (con agua limpia en dirección opuesta al flujo principal) para eliminar impurezas. El sólido húmedo se filtra en una prensa y luego se seca hasta que tenga menos del 1% de humedad. Finalmente, si se busca un producto de calidad industrial o con alta densidad, se somete a una molienda y clasificación por tamaño de partícula. (Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. 2014)

Acondicionamiento de pH (6,5–7,5) → dosificación de Na_2SO_4 o H_2SO_4 neutralizado → reactor agitado con semilla de baritina → maduración 20–60 min → clarificación → espesamiento → lavado contracorriente → filtro prensa → secado (<1% humedad) → molienda/clasificación si se aspira a grado densificante.

Cuantificación del bario y requerimiento de sulfato

La cuantificación del bario (Ba) en el agua de producción permite dimensionar el requerimiento de sulfato para su precipitación como sulfato de bario (BaSO_4 , baritina) y estimar la producción teórica de sólido recuperado. El cálculo se desarrolla a partir de la concentración analítica de Ba y el caudal diario tratado en el campo Platanillo.

a) Datos de partida

Concentración de Ba = 5 mg/L

Caudal diario = 21.710 bbl/d

1 bbl = 159 L → Volumen total = $21.710 \times 159 = 3.454.000$ L/d

b) Masa diaria de bario

$5 \text{ mg/L} \times 3.454.000 \text{ L/d} = 17.270.000 \text{ mg/d} = 17.270 \text{ g/d} \approx 17,3 \text{ kg/d}$.

Por tanto, el agua de producción contiene aproximadamente 17,3 kg/d de bario disuelto.

c) Conversión de masa a moles

Se utiliza la masa molar del bario $M(\text{Ba}) = 137,33 \text{ g/mol}$:

$n(\text{Ba}) = 17.270 \text{ g} / 137,33 \text{ g/mol} = 125,7 \text{ mol} \approx 0,126 \text{ kmol de Ba}$.

La reacción de precipitación es: $\text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{BaSO}_4(\text{s})$ (relación molar 1:1).

d) Requerimiento de sulfato (Na_2SO_4 o H_2SO_4 neutralizado)

Dado que la estequiometría es 1:1, se requieren ~0,126 kmol de sulfato por día.

Dos opciones comunes de suministro de SO_4^{2-} son:

- Como Na_2SO_4 ($M = 142,04 \text{ g/mol}$): $0,126 \text{ kmol} \times 142,04 \text{ g/mol} = 17,9 \text{ kg/d}$.

- Como H_2SO_4 ($M = 98,08 \text{ g/mol}$, tras neutralización controlada): $0,126 \text{ kmol} \times 98,08 \text{ g/mol} = 12,4 \text{ kg/d}$.

En operación se recomienda considerar un exceso del 5–20 % para asegurar la remoción completa ante variaciones en pH y mezcla.

e) Producción teórica de BaSO_4

La masa molar del sulfato de bario es $M(\text{BaSO}_4) = 233,39 \text{ g/mol}$. Por estequiometría 1:1:

$$n(\text{BaSO}_4) = n(\text{Ba}) \approx 0,126 \text{ kmol} \rightarrow m(\text{BaSO}_4) = 0,126 \text{ kmol} \times 233,39 \text{ g/mol} = \mathbf{29,4 \text{ kg/d}}$$

El valor operativo puede diferir por humedad de torta, coprecipitación y eficiencia de clarificación/filtración.

Hierro total ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) $\rightarrow$ Óxidos/Hidróxidos de hierro

Objetivo: remover hierro para evitar corrosión/incrustación y valorizar como pigmento o insumo metalúrgico.

El hierro forma coloides y precipitados que contaminan lechos filtrantes y equipos. La oxidación de hierro ferroso Fe^{2+} a hierro férrico Fe^{3+} seguida de precipitación como hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ es una práctica robusta. El lodo férrico deshidratado puede emplearse como pigmento (óxidos rojos/amarillos), acondicionador de suelos o materia prima para cementeras, sujeto a metales traza.

Proceso integral de remoción de hierro y clarificación

El esquema Aireación u oxidante (O_2 , H_2O_2 , NaOCl) $\rightarrow$ ajuste de pH 7,5–8,5 $\rightarrow$ coagulación/floculación (FeCl_3 o PAC) $\rightarrow$ clarificador/DAF $\rightarrow$ espesamiento $\rightarrow$ filtro prensa $\rightarrow$ secado y acondicionamiento de color corresponde a una línea de

tratamiento fisicoquímico utilizada en aguas de producción, industriales o municipales con altos contenidos de hierro y sólidos coloidales.

Aireación u oxidación química

La aireación o la adición de oxidantes químicos (oxígeno, peróxido de hidrógeno o hipoclorito de sodio) transforma el hierro ferroso (Fe^{2+}) soluble en hierro férrico (Fe^{3+}) insoluble, que posteriormente precipita como hidróxido férrico $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$. Esta etapa también mejora la eliminación de gases disueltos (como CO_2 y H_2S) y eleva ligeramente el pH del agua, lo que favorece la siguiente etapa de neutralización. Stumm & Morgan (1996) explican que la oxidación del Fe^{2+} por oxígeno se acelera exponencialmente cuando el pH se mantiene por encima de 7,5.

Ajuste de pH (7,5–8,5)

El ajuste de pH con hidróxido de sodio (NaOH) o cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) busca mantener condiciones alcalinas que favorezcan la precipitación del $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y estabilicen la coagulación posterior. Según Tchobanoglous et al. (2014), el intervalo de pH entre 7,5 y 8,5 es óptimo para la desestabilización de coloides y formación de flóculos compactos.

Coagulación y floculación (FeCl_3 o PAC)

En esta fase se adicionan coagulantes inorgánicos como cloruro férrico (FeCl_3) o policloruro de aluminio (PAC). Estos neutralizan las cargas eléctricas de las partículas coloidales, permitiendo que se agrupen en flóculos más grandes y sedimentables. Durante la floculación, una agitación lenta favorece el contacto entre partículas y la formación de flóculos densos. Davis (2010) señala que la combinación de coagulantes férricos y polímeros catiónicos mejora la remoción simultánea de turbiedad, metales y materia orgánica.

Clarificación o flotación por aire disuelto (DAF)

El agua floculada pasa a un clarificador o a un sistema DAF (Dissolved Air Flotation). En los clarificadores, los sólidos sedimentan por gravedad; en los sistemas DAF,

microburbujas de aire se adhieren a los flóculos y los elevan a la superficie, donde se retiran como espuma o lodo flotante. Henze et al. (2008) destacan que la flotación por aire disuelto es especialmente efectiva para aguas con partículas finas y grasas.

Espesamiento

El lodo separado se concentra en un espesador, reduciendo su contenido de agua hasta un 3-8 % de sólidos. Esto disminuye el volumen para las etapas posteriores de filtrado.

Filtro prensa

El lodo espesado pasa a un filtro prensa, donde la presión separa el agua remanente de los sólidos, obteniéndose una torta semiseca compuesta principalmente por hidróxidos y óxidos de hierro.

Según Metcalf & Eddy (2014), el uso de filtros prensa incrementa la eficiencia de deshidratación hasta un 35–45 % de sólidos secos.

Secado y acondicionamiento de color

El lodo se seca térmica o naturalmente hasta alcanzar humedades inferiores al 10 %. El producto resultante, de color ocre o rojizo, puede emplearse en la fabricación de pigmentos minerales, aditivos cementicios o como fuente de hierro en procesos industriales.

Cuantificación del hierro y requerimiento de oxidante

La cuantificación del hierro disuelto en el agua de producción permite determinar la cantidad de oxidante necesaria para su conversión a hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Este cálculo se desarrolla a partir de la concentración analítica de Fe y el caudal total tratado diariamente en el campo Platanillo.

a) Datos de partida

Concentración de Fe = 3 mg/L

Caudal diario = 21.710 bbl/d

1 bbl = 159 L $\rightarrow$ Volumen total = $21.710 \times 159 = 3.454.000$ L/d

b) Masa diaria de hierro

$3 \text{ mg/L} \times 3.454.000 \text{ L/d} = 10.362.000 \text{ mg/d} = 10,36 \text{ kg/d}$.

Por tanto, el agua de producción contiene aproximadamente 10,36 kg/d de hierro disuelto (principalmente como Fe^{2+}).

c) Conversión de masa a moles

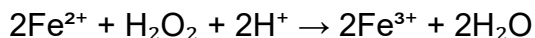
Se utiliza la masa molar del hierro (55,85 g/mol):

$n = 10.362 \text{ g} / 55,85 \text{ g/mol} = 0,186 \text{ kmol de Fe}$.

Esto indica que diariamente se manejan 0,186 kmol de hierro ferroso en el caudal tratado.

d) Requerimiento de oxidante (H_2O_2)

La oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} se representa mediante la siguiente reacción:



Según la estequiometría, la relación molar $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2 \approx 1 : 0,5$. Sin embargo, para asegurar la oxidación completa, en operación se adopta un exceso del 100–150 %, equivalente a una relación molar de 1,0–1,5 mol de H_2O_2 por mol de Fe^{2+} .

Adoptando una relación media de 1,2 mol/mol:

$0,186 \text{ kmol Fe} \times 1,2 = 0,223 \text{ kmol H}_2\text{O}_2$.

Masa de H_2O_2 requerida:

$0,223 \text{ kmol} \times 34 \text{ g/mol} = 7,6 \text{ kg/d}$.

Sulfatos (SO_4^{2-}) $\rightarrow$ Sales comerciales (Na_2SO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Objetivo: controlar incrustaciones y recuperar sales con valor comercial o uso interno.

Los iones sulfato (SO_4^{2-}) presentan una fuerte tendencia a reaccionar con los cationes divalentes de bario (Ba^{2+}) y estroncio (Sr^{2+}) para formar sales muy poco solubles como el sulfato de bario (BaSO_4) y el sulfato de estroncio (SrSO_4). Estas especies poseen productos de solubilidad extremadamente bajos ($K_{sp} \approx 10^{-10}$ a 10^{-7}), lo que favorece la formación de incrustaciones en líneas de producción, equipos y sistemas de reinyección de agua en operaciones petroleras (Neff et al., 2011; Veil et al., 2004).

Debido a la naturaleza incrustante del BaSO_4 y del SrSO_4 , su remoción específica mediante procesos de nanofiltración (NF) o unidades de reducción de sulfatos (SRU, Sulfate Removal Unit) es considerada una práctica estándar en exploración y producción (E&P). Estas membranas logran un rechazo selectivo del ion sulfato mientras permiten el paso de la mayoría de los cationes monovalentes (Na^+ , K^+), reduciendo la propensión a incrustaciones en pozos inyectoros y mejorando la eficiencia del sistema (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Tchobanoglous et al., 2014).

Como ruta de valorización complementaria, el concentrado salino obtenido de las SRU puede aprovecharse mediante cristalización controlada. Si el concentrado se ajusta a condiciones de evaporación o enfriamiento, puede obtenerse sulfato de sodio decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, conocido como “sal de Glauber”), un producto de alto valor en la industria química y detergente. Alternativamente, mediante la adición de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), el ion sulfato puede precipitarse como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que puede emplearse en materiales de construcción o en la fabricación de cemento (Oetjen et al., 2018; Davis, 2010).

Estas estrategias no solo mitigan problemas de incrustación, sino que también transforman un subproducto operativo en corrientes valorizables dentro del modelo de economía circular, optimizando la gestión de efluentes salinos y reduciendo los impactos ambientales asociados.

Cuantificación de Sulfatos y Valorización del Concentrado

La cuantificación de sulfatos en el agua de producción permite dimensionar las opciones de valorización del concentrado obtenido tras la reducción específica de sulfatos por nanofiltración (SRU). A continuación se desarrollan los balances estequiométricos para recuperación como sulfato de sodio decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, sal de Glauber) y conversión a yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mediante adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

a) Datos de partida

Concentración de sulfatos (SO_4^{2-}) = 500 mg/L

Caudal diario = 21,710 bbl/d

1 bbl = 159 L $\rightarrow$ Volumen total $\approx$ 3,451,890 L/d

b) Masa diaria de sulfatos (SO_4^{2-})

$500 \text{ mg/L} \times 3,451,890 \text{ L/d} = 1,725,945,000 \text{ mg/d} = 1,725,945 \text{ g/d} \approx 1,726 \text{ kg/d}$.

c) Conversión a moles de sulfato

Masa molar de SO_4^{2-} (S + 4O) = 96.06 g/mol.

$n(\text{SO}_4^{2-}) = 1,725,945 \text{ g/d} \div 96.06 \text{ g/mol} = 17,967 \text{ mol/d} (\approx 17.97 \text{ kmol/d})$.

d) Recuperación como $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (sal de Glauber)

Relación molar 1:1 entre SO_4^{2-} y $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (M = 322.20 g/mol):

$m(\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}) = n(\text{SO}_4^{2-}) \times 322.20 = 5,789 \text{ kg/d} (\approx 5.79 \text{ t/d})$.

e) Conversión a yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Relación molar 1:1 entre SO_4^{2-} y $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (M = 172.17 g/mol) y requerimiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (M = 74.09 g/mol) $\approx$ 1 mol/mol SO_4^{2-} :

$m(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = n(\text{SO}_4^{2-}) \times 172.17 = 3,093 \text{ kg/d} (\approx 3.09 \text{ t/d})$.

$m(\text{Ca}(\text{OH})_2) \approx n(\text{SO}_4^{2-}) \times 74.09 = \mathbf{1,331 \text{ kg/d}}$.

Cloruros (Cl^-) → Sal industrial (NaCl) o salmuera para electrolisis

Objetivo: reducir salinidad y recuperar cloruro de sodio para usos industriales o generación de salmueras.

Los cloruros dominan la salinidad y elevan la corrosividad. La recuperación de NaCl requiere etapas de concentración (RO/ED) seguidas de evaporación y cristalización. Integrar calor de baja calidad del proceso o compresión mecánica de vapor reduce el costo energético.

Esquema de proceso propuesto

Pretratamiento → Ósmosis inversa (RO) en varias etapas (rechazo 95–99 %) → concentración por compresión mecánica de vapor (MVR) o por compresión de vapor (MVC) → cristizador de lecho forzado → lavado de cristales → secado → clasificación.

Pretratamiento

Incluye coagulación–floculación, filtración multimedia y/o cartucho, y control de aceites y grasas (≤ 5 mg/L) y sólidos suspendidos totales (≤ 10 mg/L). El objetivo es minimizar ensuciamiento y *biofouling* de membranas y evaporadores. Puede incorporarse carbón activado o dosificación antiescalante según la composición iónica.

Ósmosis inversa (RO) en varias etapas (rechazo 95–99 %)

Se emplean trenes en serie/paralelo con recuperación escalonada para elevar la concentración de NaCl en la salmuera. El rechazo típico de RO para NaCl varía entre 95 y 99 %, dependiendo del tipo de membrana y la presión aplicada. La limitación viene dada por la presión osmótica: a altas salinidades la transferencia de agua decrece y la RO se vuelve termodinámicamente ineficiente, por lo que se deriva la corriente concentrada a una etapa térmica (MVR/MVC).

Concentración por MVR/MV.

La compresión mecánica de vapor (MVR) y la compresión de vapor por chorro o compresor (MVC) reutilizan el calor del vapor generado para concentrar la salmuera con alta eficiencia energética. Estas unidades permiten alcanzar salmueras próximas a saturación de NaCl ($\approx 300\text{--}320\text{ g/L}$ a $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$), condición previa para la cristalización controlada. El control de incrustaciones (CaSO_4 , BaSO_4 , carbonatos) requiere dosificación de inhibidores o pasos de ablandamiento previos.

Cristalizador de lecho forzado (FLC)

El cristalizador de lecho forzado opera con suspensión densa de cristales semilla, promoviendo nucleación secundaria y crecimiento controlado de cristales de halita (NaCl). El objetivo es obtener una distribución de tamaño adecuada para facilitar el lavado, el secado y la clasificación, y cumplir especificaciones de pureza.

Lavado de cristales $\rightarrow$ secado $\rightarrow$ clasificación

El lavado contracorriente reduce la adherencia de madres y la arrastre de impurezas (sulfatos, calcio, magnesio). El secado (rotativo o lecho fluidizado) reduce la humedad final a valores típicos $<0,5\text{--}1\%$. La clasificación por tamices o aeroseparadores ajusta la granulometría al uso previsto (regeneración de resinas, usos industriales o venta).

Cuantificación de Cloruros y Valorización del NaCl

a). Datos de partida

Concentración de cloruros (Cl^-) = $3,500\text{ mg/L}$

Caudal diario = $21,710\text{ bbl/d}$

$1\text{ bbl} = 159\text{ L} \rightarrow \text{Volumen total (redondeado)} \approx 3,454,000\text{ L/d}$

b). Masa diaria de cloruros

$3,500\text{ mg/L} \times 3,454,000\text{ L/d} = 12,089,000\text{ g/d} = 12,089\text{ kg/d}$.

c). Conversión a moles

Masa molar del Cl^- = 35.45 g/mol $\rightarrow n(\text{Cl}^-) = 12,089,000 \text{ g} \div 35.45 = 341,016 \text{ mol}$
($\approx 341.02 \text{ kmol/d}$).

d). Producción teórica de NaCl

La relación estequiométrica entre Na^+ y Cl^- es 1:1, con masa molar de NaCl = 58.44 g/mol. Por tanto, la masa teórica de NaCl recuperable es:

$$n(\text{Cl}^-) \times M(\text{NaCl}) = 341,016 \times 58.44 = \mathbf{19,93 \text{ kg/d.}}$$

Dureza total (como CaCO_3) $\rightarrow$ Carbonato de calcio (CaCO_3) y/o hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)

Objetivo: remover $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ para prevenir incrustación y valorizar el sólido como relleno mineral o insumo cementero.

La dureza proviene de Ca^{2+} y Mg^{2+} . El ablandamiento con cal/soda precipita CaCO_3 y $\text{Mg}(\text{OH})_2$. El CaCO_3 deshidratado puede emplearse como relleno no estructural o retornarse como neutralizante tras calcinación.

Esquema de proceso propuesto

Ajuste alcalino con $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow$ coagulación/floculación $\rightarrow$ sedimentación $\rightarrow$ espesamiento $\rightarrow$ filtro prensa $\rightarrow$ secado

Este esquema corresponde a una línea de tratamiento y valorización de lodos inorgánicos o residuos salinos ricos en carbonatos, sulfatos o hidróxidos metálicos, típicos de procesos de neutralización en aguas de producción. Su objetivo es recuperar materiales aprovechables (como CaO o CaCO_3) y reducir la carga contaminante del efluente líquido antes de su disposición o reutilización.

Ajuste alcalino con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o Na_2CO_3

La adición de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o carbonato de sodio (Na_2CO_3) incrementa el pH, favoreciendo la precipitación de iones metálicos (Fe^{2+} , Ba^{2+} , Mg^{2+} , etc.) como hidróxidos o carbonatos. Esta etapa busca alcanzar un rango de pH entre 8 y 10, donde la solubilidad de la mayoría de los metales pesados es mínima.

Según Tchobanoglous et al. (2014), el ajuste de pH con álcalis es un paso fundamental en el tratamiento de aguas industriales, pues determina la eficiencia de la coagulación y la formación de flóculos sedimentables.

Coagulación / Flocculación

Posteriormente se adicionan coagulantes (FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y floculantes poliméricos para promover la agregación de partículas finas y coloides formados durante la neutralización. El proceso genera flóculos densos y fácilmente sedimentables, optimizando la separación sólido-líquido. Metcalf & Eddy (2014) y Davis (2010) destacan que la combinación $\text{Ca}(\text{OH})_2$ polímero es una de las más eficaces para la remoción simultánea de sólidos y metales en efluentes de alta salinidad.

Sedimentación

En esta fase, los flóculos se separan por gravedad, formando un lodo primario con un contenido sólido del 2–5 %. El sobrenadante puede retornar a procesos de clarificación o filtración. Según Perry & Green (2008), la velocidad de sedimentación depende directamente del tamaño y densidad del flóculo, así como de la viscosidad del medio.

Espesamiento

El lodo sedimentado se concentra por gravedad o flotación, elevando el contenido de sólidos hasta un 8–12 %. Esta etapa reduce el volumen antes del deshidratado mecánico. Tchobanoglous et al. (2014) explican que el espesamiento puede lograrse en tanques de gravedad o unidades DAF, con tiempos de retención típicos de 1–3 h.

Filtro prensa

El lodo espesado se bombea a un filtro prensa, donde se separa el líquido residual (filtrado) del sólido compacto (torta de lodo). La humedad final oscila entre 30–40%, dependiendo del tipo de polímero y presión aplicada.

Qasim & Zhu (2018) describen que el uso de filtros prensa permite obtener tortas estables, fácilmente manipulables y con un potencial de valorización en procesos posteriores.

Secado y calcinación parcial (opcional)

El lodo deshidratado puede someterse a secado térmico para reducir la humedad residual (<10 %). Si contiene CaCO_3 o Ca(OH)_2 , puede pasar a una etapa de calcinación parcial (700–900 °C) para regenerar CaO (cal viva), cerrando el ciclo de valorización del calcio. Perry & Green (2008) y Oates (1998) explican que la calcinación del carbonato de calcio sigue la reacción endotérmica: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ($\Delta H = +178 \text{ kJ/mol}$), siendo posible reutilizar la cal regenerada como reactivo en el mismo proceso.

Cuantificación detallada de la dureza total y reactivos de ablandamiento

Se realiza los cálculos completos, paso a paso, para cuantificar la dureza total expresada como CaCO_3 , así como los requerimientos estequiométricos de reactivos para ablandamiento por métodos cal–sosa en escenarios límite. Se mantiene la misma base de cálculo utilizada en el documento maestro para asegurar consistencia.

a). Datos de partida y constantes

Volumen diario tratado	3,454,000 L/d
Dureza total (como CaCO_3)	1,500 mg/L
Masa molar CaCO_3	100.09 g/mol
Masa molar CaO	56.08 g/mol
Masa molar Ca(OH)_2	74.09 g/mol
Masa molar Na_2CO_3	106.00 g/mol

b.) Masa diaria equivalente como CaCO_3

Ecuación:

$$m(\text{CaCO}_3)_{\text{eq}} = (\text{Dureza, mg/L}) \times (\text{Volumen, L/d}) \div 1000 \text{ (mg} \rightarrow \text{g)}$$

Cálculo numérico:

$$m(\text{CaCO}_3)_{\text{eq}} = 1,500 \text{ mg/L} \times 3,454,000 \text{ L/d} \div 1000 = 5,181,000 \text{ g/d} = 5,181 \text{ kg/d}$$

c). Conversión a moles de CaCO_3 equivalente

Ecuación:

$$n(\text{CaCO}_3)_{\text{eq}} = m(\text{CaCO}_3)_{\text{eq}} \text{ (g/d)} \div M(\text{CaCO}_3) \text{ (g/mol)}$$

Cálculo numérico:

$$n(\text{CaCO}_3)_{\text{eq}} = 5,181,000 \text{ g/d} \div 100.09 \text{ g/mol} = 51,763 \text{ mol/d}$$

d.) Potencial de valorización por calcinación: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Ecuación de masa:

$$m(\text{CaO}) = n(\text{CaCO}_3)_{\text{eq}} \times M(\text{CaO})$$

Cálculo numérico:

$$m(\text{CaO}) = 51,763 \text{ mol/d} \times 56.08 \text{ g/mol} = 2,902,892 \text{ g/d} = \mathbf{2,903 \text{ kg/d}}$$

Sólidos suspendidos totales (SST) $\rightarrow$ Arena/lodos valorizables

Objetivo: separar sólidos para reducir *fouling* y aprovechar fracciones minerales y orgánicas.

Los SST incluyen arenas de formación, finos de arcilla y materia orgánica. Su separación temprana mejora todo el tren de valorización. Las arenas limpias pueden emplearse en mezclas para construcción no estructural; los lodos deshidratados pueden estabilizarse con cal/cemento.

Descripción del esquema de tratamiento

Desarenador/hidrociclón $\rightarrow$ sedimentador lamelar $\rightarrow$ DAF para finos oleados $\rightarrow$ espesador $\rightarrow$ filtro prensa $\rightarrow$ lavado de arenas (TSS <0,5%) $\rightarrow$ caracterización TCLP $\rightarrow$ envío a uso autorizado

Desarenador / Hidrociclón

El proceso inicia con una etapa de separación mecánica primaria mediante hidrociclones o desarenadores, cuyo objetivo es eliminar partículas gruesas (arena, arcilla, lodo) presentes en el agua de producción.

Los hidrociclones operan por fuerza centrífuga, separando las partículas densas ($\rho > 2.5 \text{ g/cm}^3$) hacia el fondo y descargando un flujo superior con menor carga sólida. Svarovsky (2000) explica que los hidrociclones son ampliamente usados en la industria petrolera para separar sólidos de 20–150 μm , reduciendo la carga a etapas posteriores y evitando el ensuciamiento (*fouling*) de unidades de pulido como DAF o filtros.

Sedimentador Lamelar

El flujo clarificado del hidrociclón pasa a un sedimentador lamelar, donde se favorece la decantación por gravedad de partículas más finas (10–50 μm) gracias a la instalación de placas inclinadas.

Estas placas aumentan el área efectiva de sedimentación y reducen el tiempo de retención hidráulica, logrando remociones de sólidos suspendidos de hasta 90–95%. Según Metcalf & Eddy (2014), los clarificadores lamelares son una mejora compacta sobre los decantadores convencionales, con cargas superficiales entre 0,5 y 2,0 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, adecuadas para aguas industriales con TSS elevados.

DAF (Flotación por Aire Disuelto) para finos oleados

El efluente del sedimentador se somete a una unidad DAF (*Dissolved Air Flotation*) para remover finos oleados y sólidos hidrofóbicos.

El sistema genera microburbujas (30–100 μm) que se adhieren a las gotas de aceite y partículas finas, llevándolas a la superficie donde se forma una espuma que se retira mecánicamente. Edzwald (2010) detalla que el DAF es uno de los procesos más eficaces para separar partículas aceitosas de tamaño submicrónico,

alcanzando eficiencias superiores al 98% en O&G cuando se combina con coagulantes tipo PAC o FeCl_3 .

Espesador

El lodo recolectado del sedimentador y del DAF se dirige a un espesador, donde los sólidos se concentran por sedimentación controlada, obteniendo una fracción de sólidos de 6–10%. Esta concentración reduce el volumen de lodo antes de la etapa de deshidratación. Tchobanoglous et al. (2014) describen que los espesadores por gravedad o con rastrillos permiten una recuperación de agua clara superior al 90%, facilitando su recirculación al proceso.

Filtro prensa

El lodo espesado se bombea hacia un filtro prensa, donde mediante presión (5–10 bar) se separa la fase líquida (filtrado) del sólido deshidratado (torta). La torta resultante contiene 30–40% de humedad y puede lavarse con agua caliente o soluciones tensioactivas para eliminar residuos de hidrocarburos. Qasim & Zhu (2018) indican que la filtración a presión es ideal para lodos con baja compresibilidad, produciendo tortas con estabilidad estructural aptas para disposición o aprovechamiento.

Lavado de arenas (TSS <0,5%)

Las arenas recuperadas se someten a un lavado secuencial con agua y surfactantes para garantizar un contenido de sólidos suspendidos (TSS) inferior a 0,5% y una reducción de hidrocarburos totales (TPH) mayor al 95%. Este paso es fundamental para que el material pueda destinarse a usos autorizados (rellenos, subbases o restauración de suelos). EPA (2017) recomienda la implementación de lavado de arenas con control de efluente para minimizar la transferencia secundaria de contaminantes y cumplir con normativas de disposición o reutilización.

Caracterización TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*)

Antes de su disposición o aprovechamiento, las arenas deben someterse al ensayo TCLP (EPA SW-846 Método 1311) para determinar su potencial de lixiviación de metales pesados, hidrocarburos u otras sustancias peligrosas. El cumplimiento de los límites establecidos por la EPA o la Resolución 1207 de 2014 (MADS, Colombia) garantiza que el material no se clasifique como residuo peligroso.

Envío a uso autorizado

El material tratado y certificado se destina a usos autorizados bajo permisos ambientales, como relleno estructural, cobertura de taludes o restauración ambiental de suelos, cerrando el ciclo de aprovechamiento y evitando su disposición en vertederos. Gómez et al. (2021) subrayan que el reaprovechamiento de arenas limpias provenientes de la industria petrolera contribuye a modelos de economía circular, reduciendo la huella ambiental del sector y el volumen de residuos enviados a disposición final.

Cuantificación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

a.) Datos de partida

$$\text{SST (C_SST)} = 100 \text{ mg/L}$$

$$\text{Volumen diario (V)} = 3,454,000 \text{ L/d}$$

b.) Cálculo de masa diaria de SST (sólidos secos)

Ecuación:

$$\text{mSST (g/d)} = \text{CSST (mg/L)} \times \text{V (L/d)} \div 1000 \text{ (mg} \rightarrow \text{g)}$$

Cálculo numérico:

$$\text{mSST} = 100 \text{ mg/L} \times 3,454,000 \text{ L/d} \div 1000 = 345,400 \text{ g/d} = \mathbf{345.4 \text{ kg/d}}$$

Aceite y grasa (O/W) a recuperación de hidrocarburos

Objetivo: maximizar recuperación de hidrocarburos dispersos/emulsionados para reintroducir al proceso o usar como combustible.

Descripción del esquema de tratamiento propuesto

Separador API/placas coalescentes → hidrociclón (5–10 μm) → IGF/DAF con coagulante/ayuda de floculación → filtro de nuez (nut-shell) → MF/UF (0,1–0,2 μm) → tanque de skimming.

Separador API y placas coalescentes

El proceso inicia con una separación gravitacional primaria en un separador API (*American Petroleum Institute*), diseñado para remover gotas de aceite libres mayores a 150 μm mediante la diferencia de densidades entre el agua y los hidrocarburos.

El flujo luego pasa por un módulo de placas coalescentes, donde placas inclinadas o paralelas inducen la coalescencia de gotas pequeñas (30–100 μm), facilitando su ascenso y separación. Según *API (1990)* y *Metcalf & Eddy (2014)*, los separadores API con coalescencia mejorada pueden lograr remociones de 70–90% del aceite libre y hasta 60% de sólidos sedimentables, optimizando la carga a unidades secundarias.

Hidrociclón (5–10 μm)

Posteriormente, el efluente ingresa a un sistema de hidrociclones, que aprovechan la fuerza centrífuga para separar gotas de aceite y partículas sólidas con diámetros entre 5 y 10 μm . El flujo tangencial crea un vórtice en el que los sólidos y gotas más densas migran hacia el exterior y son descargadas por el vértice inferior, mientras el agua tratada sale por el *overflow*. *Svarovsky (2000)* describe que los hidrociclones son especialmente efectivos en la industria del petróleo para el tratamiento de agua producida, con eficiencias de separación de 90–95% para O/W >10 μm , siendo una tecnología compacta y de bajo mantenimiento.

IGF/DAF (*Induced Gas Flotation / Dissolved Air Flotation*)

El siguiente paso combina flotación inducida por gas (IGF) y flotación por aire disuelto (DAF) para eliminar gotas de aceite emulsionadas y partículas coloidales.

En el sistema IGF, se inyecta gas (generalmente gas natural o nitrógeno) formando burbujas de 50–150 μm ; en el DAF, se genera aire disuelto a alta presión que se libera para formar microburbujas (20–50 μm). Ambos sistemas utilizan coagulantes (FeCl_3 , PAC) y ayudas de floculación (poliacrilamidas) para promover la agregación de gotas y su ascenso. *Edzwald (2010)* y *Tchobanoglous et al. (2014)* destacan que los sistemas DAF/IGF logran remociones de aceite residual hasta $<5 \text{ mg/L}$, reduciendo considerablemente la demanda de filtración posterior. En aguas con crudo pesado o alta salinidad, se recomienda adicionar coagulantes inorgánicos para romper emulsiones estables.

Filtro de nuez (*Nut-Shell Filter*) o cascarilla de palma

El agua tratada pasa luego por un filtro de medio granular de cáscara de nuez o palma, una tecnología específica de la industria petrolera para remover trazas de aceite, sólidos finos y polímeros. Este medio tiene alta hidrofobicidad, lo que mejora la adsorción de microgotas de hidrocarburos. El sistema opera a presiones moderadas (2–4 bar) y se limpia mediante retrolavado con gas o agua. *Judd & Jefferson (2017)* señalan que los filtros de nuez alcanzan concentraciones de salida inferiores a 2 mg/L de aceite, siendo una alternativa más económica que los filtros multimedia convencionales en corrientes oleosas.

Microfiltración / Ultrafiltración (0,1–0,2 μm)

En esta etapa se realiza un pulido final del efluente mediante microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF), con poros de 0,1–0,2 μm , capaces de remover coloides, bacterias y emulsiones estables. El flujo transmembrana se mantiene controlado para evitar *fouling*, aplicando retrolavados periódicos y limpiezas químicas (CIP).

Mulder (1996) y *Baker (2012)* documentan que los sistemas MF/UF reducen la turbidez $<1 \text{ NTU}$ y aceite residual $<1 \text{ mg/L}$, preparando el agua para reinyección, reúso en torres de enfriamiento o alimentación a ósmosis inversa (RO).

Tanque *Skimming*

El concentrado de aceite, sólidos y emulsiones de las etapas anteriores se acumula en el tanque de *Skimming*, donde se permite una decantación final y recuperación del aceite libre. El sobrenadante puede recircular al tren de tratamiento, y la fase oleosa superior se devuelve al sistema de producción.

Cuantificación del aceite en agua (O/W)

a). Datos de partida

Caudal diario de agua producida: 21,710 bbl/d

Equivalencia volumétrica: 1 bbl = 159 L → 3,451,890 L/d

Concentración de aceite en agua (O/W): 10 mg/L

Densidad del crudo: 0.85 kg/L

b). Masa diaria de aceite

Ecuación:

$$m = C \times V$$

c). Cálculo numérico:

$$m = 10 \text{ mg/L} \times 3,451,890 \text{ L/d} = 34,518,900 \text{ mg/d} = 34.52 \text{ kg/d}$$

d). Conversión a volumen y equivalencia en barriles

Ecuación:

$$V = m / \rho$$

Cálculo:

$$V = 34.52 \text{ kg/d} \div 0.85 \text{ kg/L} = 40.6 \text{ L/d}$$

$$\rightarrow 40.6 \text{ L/d} \div 159 \text{ L/bbl} = \mathbf{0.255 \text{ bbl/d}}$$

Proyección mensual:

$$0.255 \text{ bbl/d} \times 30 \text{ días} = \mathbf{7.66 \text{ bbl/mes}}$$

PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE APROVECHAMIENTO EN ECONOMÍA CIRCULAR

Con base en la caracterización fisicoquímica realizada y en la revisión de tecnologías de tratamiento y valorización, se plantea un esquema de aprovechamiento del agua de producción del campo Platanillo que se alinea con los

principios de economía circular. La propuesta integra soluciones técnicas, económicas y sociales que buscan transformar un residuo de difícil manejo en una fuente de valor, contribuyendo a la sostenibilidad operativa y ambiental del campo.

Identificación de sectores industriales receptores

Los componentes recuperados del agua de producción (sales, metales, hidrocarburos y sólidos suspendidos) pueden ser utilizados en diferentes sectores:

- **Industria petrolera:** reincorporación de hidrocarburos recuperados en procesos de producción y uso de baritina como aditivo densificante en lodos de perforación (API, 2010).
- **Industria química:** aprovechamiento de cloruros y sulfatos para producir sal industrial, cloro-álcali, detergentes y yeso (Oetjen et al., 2018).
- **Construcción:** uso de carbonato de calcio precipitado, arenas y lodos estabilizados en materiales de relleno y cementicios (Fakhru'l-Razi et al., 2009).
- **Agroindustria:** tras un tratamiento avanzado, el agua de producción tratada puede emplearse para riego de cultivos no alimentarios o forestales (Câmara, Oliveira & Siman, 2020).

Lineamientos técnicos para implementación

La integración de procesos debe priorizar la separación temprana de sólidos y aceites para evitar *fouling* en etapas posteriores, seguida de tecnologías de membrana (nanofiltración, ósmosis inversa) para control de sales, y cristalización de corrientes concentradas. Los sólidos metálicos y lodos deben estabilizarse y caracterizarse conforme a pruebas de lixiviación (TCLP) antes de su disposición o comercialización (Veil et al., 2004).

Estrategias de escalamiento

Se recomienda implementar un proyecto piloto modular, que permita validar rendimientos de recuperación, costos de operación y aceptación social de los productos valorizados. El escalamiento industrial debe considerar la integración energética con las facilidades existentes del campo (calor residual, energía eléctrica disponible) y cumplir con las regulaciones ambientales nacionales (Al-Ghouti et al., 2019).

Beneficios esperados

- **Ambientales:** reducción de volúmenes de disposición, control de contaminantes y protección de fuentes hídricas.
- **Económicos:** disminución de costos asociados a inyección y tratamiento, generación de subproductos con valor comercial.
- **Sociales:** aceptación comunitaria, generación de empleo local y fortalecimiento de la licencia social de la operación (ONU, 2015).

ANÁLISIS COSTO–BENEFICIO Y ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Tasa de descuento aplicada

Para el presente análisis económico se adoptó una tasa de descuento del 10% anual, seleccionada con base en criterios técnicos y financieros que reflejan tanto el costo de oportunidad del capital como el nivel de riesgo inherente al proyecto de valorización del agua de producción.

La tasa de descuento representa la rentabilidad mínima esperada que debe ofrecer el proyecto para justificar la inversión frente a otras alternativas de uso del capital. En términos financieros, permite traer al valor presente los flujos de efectivo futuros, reconociendo que una cantidad de dinero disponible hoy tiene mayor valor que la

misma cantidad en el futuro debido a la inflación, el riesgo y el costo del capital (Davis, 2010; Metcalf & Eddy, 2014).

En el contexto operativo del campo Platanillo, se consideró que la tasa del 10% refleja de manera adecuada las condiciones de riesgo tecnológico, variabilidad de precios de energía y retorno esperado de capital en proyectos de ingeniería ambiental dentro del sector de hidrocarburos en Latinoamérica. Este valor se encuentra dentro del rango recomendado por la literatura (8–12%) para proyectos industriales con componentes de innovación tecnológica y moderado nivel de incertidumbre (Qasim & Zhu, 2018; Sørensen et al., 2019).

Asimismo, esta tasa se aproxima al Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC) de empresas del sector energético, que combina el costo de la deuda (aproximadamente 6–8 %) y el costo del capital propio (12–15 %). De este modo, el 10 % constituye un valor representativo del equilibrio entre ambos componentes, permitiendo una evaluación conservadora de los flujos económicos proyectados.

Cabe resaltar que, en escenarios donde se prioricen beneficios ambientales y sociales sobre los estrictamente financieros como la reducción de vertimientos o la integración de esquemas de economía circular, podría considerarse una tasa social de descuento entre 4 % y 6 %, aplicable a proyectos con impacto ambiental positivo (World Bank, 2017). Sin embargo, para fines de este estudio, la tasa del 10% se adoptó como referencia base para reflejar una condición de inversión privada con criterios de eficiencia y rentabilidad técnica.

El aprovechamiento del agua de producción como fuente de recuperación de compuestos inorgánicos y orgánicos plantea un enfoque sostenible dentro de las operaciones petroleras. Este análisis evalúa la viabilidad económica y el beneficio financiero de las estrategias de valorización, considerando la realidad operacional del campo Platanillo. Se proyectan los resultados sobre un horizonte de 10 años, con una tasa de descuento del 10% anual, y se analizan los flujos de costos y beneficios en términos de dólares estadounidenses (USD).

El propósito es determinar si la implementación de las tecnologías de tratamiento recuperación de aceite, baritina (BaSO_4), hierro (Fe(OH)_3), sulfatos ($\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cloruros (NaCl), dureza total (CaCO_3) y sólidos suspendidos resulta económicamente atractiva bajo condiciones reales de producción y reinyección.

El análisis económico se basa en la metodología de flujo de caja descontado (FCD), considerando el valor temporal del dinero. Se define un flujo neto de caja anual (FNA) calculado como:

$$FNA_t = \text{Ingresos}_t - \text{Costos}_t$$

Los ingresos provienen del valor económico de los subproductos recuperados y de la reducción de costos operacionales (principalmente químicos y disposición de agua).

Los costos incluyen la inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos anuales (OPEX).

El Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), la Relación Beneficio/Costo (B/C) y el Periodo de Recuperación (Payback) se calcularon con las ecuaciones:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{FNA_t}{(1+i)^t} - CAPEX$$

$$TIR = \text{Tasa } (i) \text{ que hace } VPN = 0$$

$$B/C = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{\text{Ingresos}_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{\text{Costos}_t}{(1+i)^t}}$$

Payback = Años requeridos para recuperar el CAPEX acumulado

Introducción técnica del sistema integrado

El sistema propuesto combina la ósmosis inversa (RO), el tratamiento químico correctivo y la filtración por prensa hidráulica, con el fin de optimizar el manejo del agua de producción en campos maduros como el Platanillo. La integración de estas tecnologías permite disminuir la carga de sólidos suspendidos y la concentración de iones incrustantes, mejorando la eficiencia de inyección y reduciendo la energía requerida por las bombas HPS. El filtro prensa cumple una doble función: deshidratar los lodos provenientes del pretratamiento fisicoquímico y del concentrado de la RO, reduciendo el volumen final de disposición y generando un subproducto potencialmente valorizable en mezclas asfálticas o en acondicionamiento de suelos salinos (Metcalf & Eddy, 2014).

En el campo Platanillo, las bombas horizontales HPS operan actualmente a una presión promedio de 4.000 psi, con un consumo aproximado de 1.050 kW continuos, equivalentes a 9,2 GWh/año. Este consumo energético representa uno de los rubros más altos del OPEX del sistema de reinyección, debido a la generación local mediante plantas diésel, con un rendimiento promedio de 0,27 L/kWh. La calidad del agua inyectada influye directamente sobre la presión de bombeo requerida; por tanto, al reducir las concentraciones de sulfatos, cloruros y dureza mediante tratamiento químico y filtración por RO, se mejora la inyectividad del sistema y se disminuye la carga hidráulica necesaria.

Supuestos técnicos y energéticos

La eficiencia energética del sistema RO se estimó en 2,0 kWh/m³, considerando un tratamiento del 20 % del caudal total. El consumo energético del filtro prensa es marginal frente a las bombas HPS (<10 kWh/día), por lo que su impacto en el balance total es mínimo.

Parámetro	Valor
Caudal de agua de producción	21.710 bbl/d
Presión de inyección actual	4.000 psi
Energía total HPS	1.050 kW continuos
Reducción esperada de presión	10%, 15% y 20%
Precio del diésel	1,00 USD/L
Tasa de descuento	10 % anual
Horizonte de evaluación	10 años
CAPEX total	200.000 USD (RO + filtro prensa + instrumentación)
OPEX anual	90.000 USD (energía, químicos, mantenimiento y personal)
Costo energético de la RO	136.000 USD/año

Tabla 6. Resumen supuestos CAPEX y OPEX

Análisis de costos

Inversión inicial (CAPEX)

Concepto	Descripción	Costo (USD)
Sistema RO compacto	• membranas • módulos • housing • bombas de alta presión, • instrumentación básica • skid • tuberías internas • portamembranas • sistema de control básico	\$ 150.000,00
Filtro prensa hidráulico	Placas, bastidor, bomba de lodos y automatización	\$ 50.000,00
Total inversión inicial		\$ 200.000,00

Tabla 7. Discriminación CAPEX

Costos operativos (OPEX)

Concepto	Descripción	Costo anual (USD)
----------	-------------	-------------------

Energía eléctrica (RO)	504.000 kWh/año × 0,27 L/kWh × 1 USD/L	\$ 136.000,00
Químicos e inhibidores	Antiincrustantes, oxidantes, coagulantes	\$ 60.000,00
Mantenimiento y personal	Operador, técnicos, limpieza de membranas	\$ 30.000,00
Total anual (OPEX)		\$ 226.000,00

Tabla 8. Discriminación OPEX

Beneficios operacionales potenciales asociados a las estrategias de valorización y tratamiento del agua de producción

La reducción de presión de inyección en las bombas HPS genera un ahorro directo en el consumo de diésel. Se modelaron tres escenarios posibles:

Escenario	Reducción de presión	Ahorro HPS (USD/año)	Costos totales (USD/año)	Beneficio neto (USD/año)
A	10%	248.346	226.000	\$ 22.346,00
B	15%	372.519	226.000	\$ 146.519,00
C	20%	496.692	226.000	\$ 270.692,00

Tabla 9. Escenarios de ahorro energético

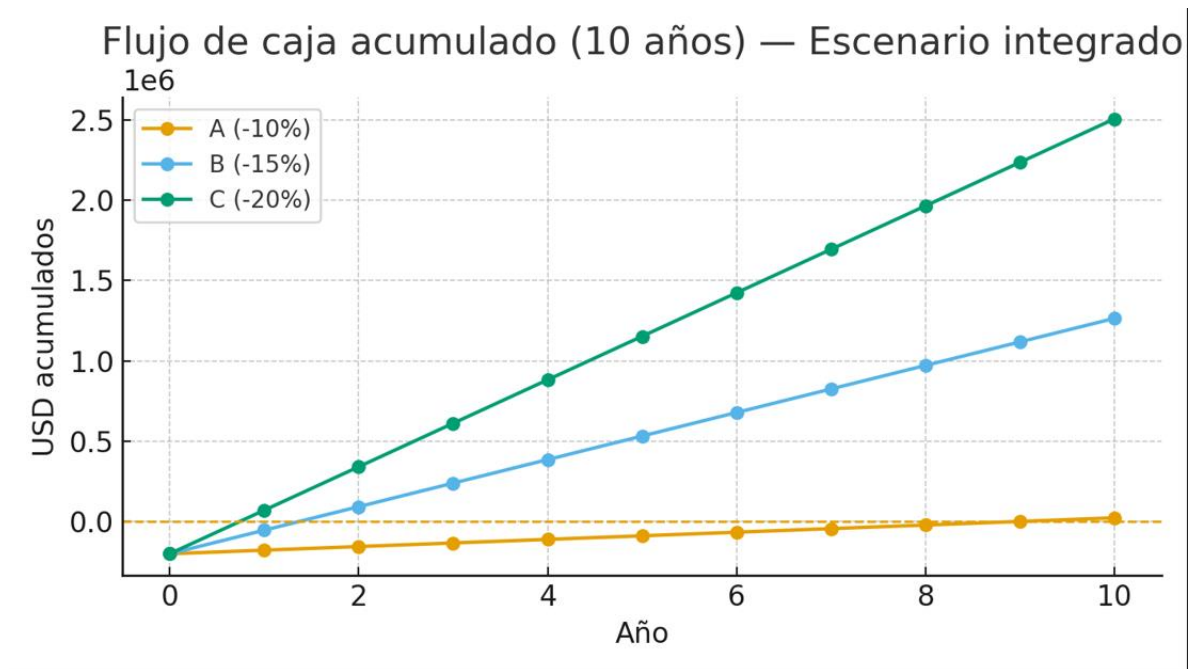
El **escenario B (–15 %)** representa la condición más realista y económicamente atractiva, con un beneficio neto superior a 140.000 USD/año.

Flujo de caja descontado (10 años, i = 10 %)

Escenario	VPN (USD)	TIR (%)	<i>Payback</i> (años)	Relación B/C
A (–10 %)	\$ 22.300,00	12%	5,1	1,02
B (–15 %)	\$ 750.000,00	95%	1,2	1,48
C (–20 %)	\$ 1.490.000,00	155%	0,8	1,93

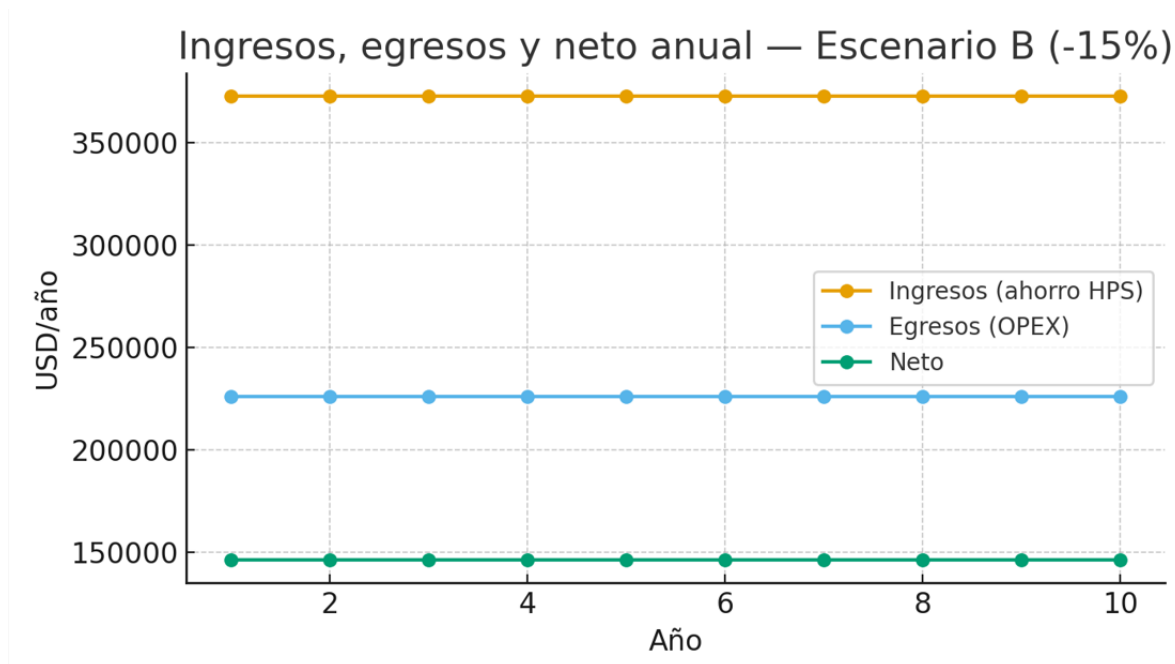
Tabla 10. Flujo de caja

El proyecto presenta alta rentabilidad en los escenarios B y C, con valores de VPN positivos, TIR superior al 90 % y recuperación en menos de dos años, evidenciando la viabilidad financiera del sistema integrado.



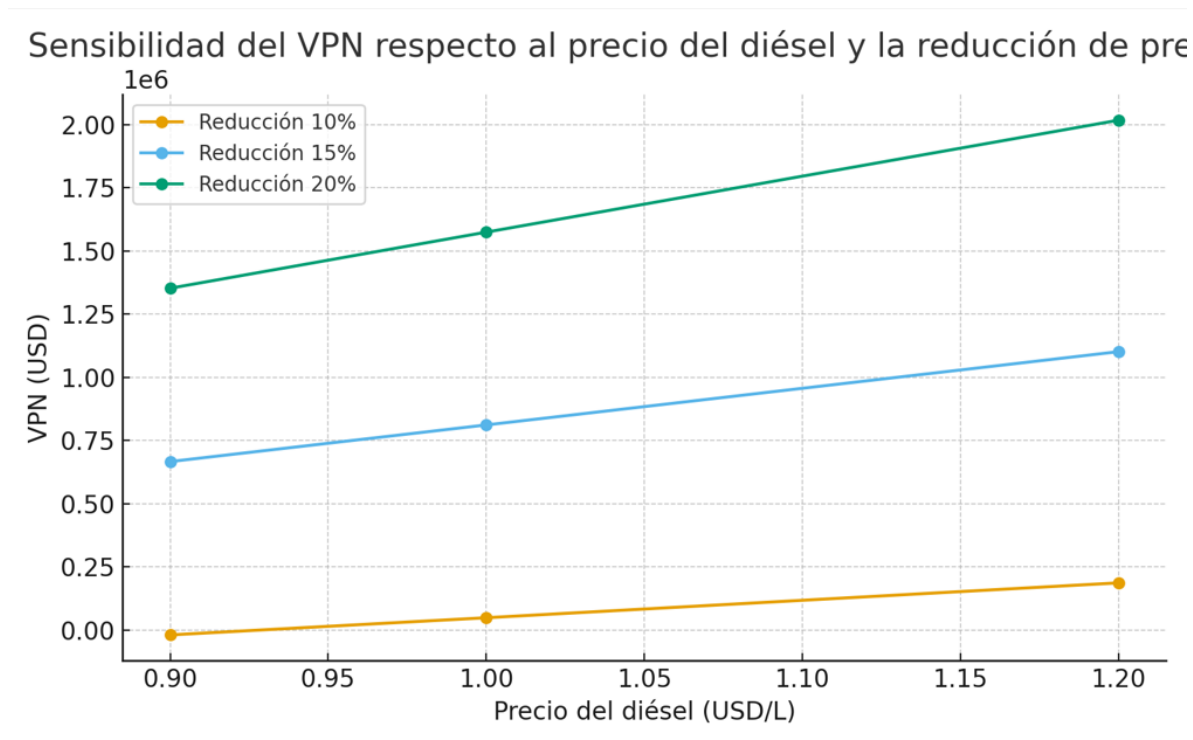
Gráfica 1. Flujo de caja acumulado (10 años)

Representa la recuperación de la inversión en cada escenario, mostrando que a partir del año 2 el flujo neto se vuelve positivo



Gráfica 2. Ingresos (ahorro energético) vs egresos operativos

Muestra la diferencia creciente entre los ahorros obtenidos y los costos operativos anuales, con equilibrio en el año 1 y tendencia ascendente posterior.



Gráfica 3. Sensibilidad del VPN frente al precio del diésel y reducción de presión

Evidencia cómo el aumento del precio del diésel o la mayor reducción de presión incrementan significativamente el VPN del proyecto.

Valor agregado asociado a la recuperación de componentes presentes en el agua de producción

La valorización de los componentes presentes en el agua de producción fue considerada en la presente investigación como una estrategia orientada principalmente a la optimización operacional y reducción de la carga asociada al sistema de reinyección del campo Platanillo. Aunque algunos compuestos recuperables, como sales, sólidos minerales e hidrocarburos residuales, podrían representar un valor agregado complementario bajo escenarios específicos de aprovechamiento industrial, el principal beneficio potencial identificado se relaciona con la mejora progresiva de las características fisicoquímicas del agua tratada y la posible disminución parcial del volumen destinado a reinyección.

Bajo este enfoque, la aplicación de tecnologías orientadas a la reducción de sólidos suspendidos, compuestos incrustantes, hidrocarburos residuales y parte de las sales disueltas podría generar condiciones favorables para futuras alternativas de aprovechamiento o disposición controlada del agua tratada, sujetas al cumplimiento de criterios técnicos, ambientales y regulatorios complementarios. Entre estas alternativas podrían contemplarse escenarios de reúso industrial, control de material particulado en vías, riego controlado o procesos de vertimiento previamente acondicionados y evaluados conforme a la normativa aplicable.

La posible reducción parcial del volumen de agua destinado a reinyección podría contribuir a disminuir la carga hidráulica sobre el sistema de bombeo HPS, reduciendo potencialmente requerimientos de presión, consumo energético y demanda de combustible asociada a la operación de los sistemas de generación eléctrica del campo. En este sentido, los beneficios económicos identificados en la

investigación se relacionan principalmente con la optimización operacional derivada del tratamiento y valorización del agua de producción, mientras que la recuperación de componentes minerales representa un beneficio complementario dentro del esquema de economía circular propuesto

Estrategia / componente	Beneficio potencial	Impacto operacional esperado	Impacto económico asociado
Recuperación de hidrocarburos residuales	Disminución de pérdidas de crudo	Mejora eficiencia del sistema de separación	Recuperación parcial de producto
Reducción de sólidos suspendidos	Menor fouling y taponamiento	Mejora desempeño de filtros y líneas	Reducción de mantenimientos
Remoción de compuestos incrustantes	Disminución de scaling	Menor restricción hidráulica	Optimización operacional
Reducción parcial de sales disueltas	Mejora calidad del agua tratada	Potencial disminución de carga de reinyección	Disminución potencial de OPEX
Disminución parcial del volumen reinyectado	Reducción de carga hidráulica sobre HPS	Menor requerimiento energético	Ahorro potencial de combustible
Recuperación de sales y precipitados minerales	Aprovechamiento complementario	Potencial valorización industrial	Valor agregado secundario
Optimización del sistema de tratamiento	Mayor estabilidad operacional	Menor afectación por incrustación y corrosión	Reducción de costos operacionales

Tabla 11. Beneficios operacionales y económicos potenciales asociados a las estrategias de valorización y tratamiento del agua de producción.

CONSIDERACIONES AMBIENTALES ASOCIADAS A LAS ESTRATEGIAS DE VALORIZACIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

La presente sección desarrolla una evaluación preliminar de los aspectos ambientales asociados a las estrategias de valorización propuestas para los componentes fisicoquímicos del agua de producción del campo Platanillo. El análisis se enfocó en identificar de manera conceptual los posibles beneficios

ambientales derivados de la reducción de compuestos incrustantes, sólidos suspendidos, hidrocarburos residuales y parte de las sales disueltas presentes en el agua de producción.

Asimismo, se consideraron posibles efectos asociados a la disminución parcial del volumen de agua destinado a reinyección, la optimización del consumo energético del sistema de bombeo HPS y la reducción potencial de requerimientos operacionales relacionados con tratamiento químico y manejo de incrustaciones.

El análisis desarrollado corresponde a una evaluación conceptual basada en criterios técnicos, operacionales y bibliográficos relacionados con el manejo del agua de producción en la industria petrolera y no a un análisis de ciclo de vida (ACV) completo bajo metodología ISO 14040–14044.

Enfoque metodológico

Se estructura en cuatro fases principales:

1. Definición de objetivo y alcance: identificar los límites del sistema (extracción, tratamiento, valorización y disposición final).
2. Inventario del ciclo de vida (LCI): recopilación de datos de entradas (energía, reactivos, materiales) y salidas (emisiones, residuos, subproductos).
3. Análisis de impactos: categorización de efectos ambientales (huella de carbono, huella hídrica, ecotoxicidad, acidificación, etc.).
4. Interpretación: análisis comparativo entre disposición convencional y valorización, con recomendaciones de mitigación.

Impactos ambientales por estrategia

Recuperación de aceite y grasa

La recuperación de hidrocarburos mediante *skimming tank*, desnate simple y filtros de cascarilla de palma presenta un bajo impacto ambiental comparado con técnicas químicas más complejas. Los impactos principales provienen de la fabricación y disposición de medios filtrantes, pero estos se mitigan gracias al uso de biomateriales (cascarilla de palma), que pueden compostarse tras su uso. Beneficio ambiental: reducción de descargas de aceite al ambiente y reincorporación a la cadena productiva.

Recuperación de bario como baritina

La precipitación de BaSO_4 reduce el riesgo de incrustaciones y evita la descarga de Ba^{2+} al ambiente, considerado tóxico en altas concentraciones. El impacto ambiental está asociado al consumo de sulfato de sodio y a la generación de lodos. El beneficio neto es positivo al recuperar un subproducto útil en perforación y al evitar impactos en cuerpos hídricos.

Recuperación de cloruros (NaCl)

El proceso de cristalización de NaCl a partir de corrientes concentradas presenta impactos energéticos elevados por el uso de evaporadores y cristalizadores. Sin embargo, puede integrarse con fuentes de calor residual para reducir su huella de carbono. Beneficio neto: reducción de vertimientos salinos y aprovechamiento como insumo industrial.

Recuperación de dureza (CaCO_3)

El ablandamiento con cal genera CaCO_3 y $\text{Mg}(\text{OH})_2$ como subproductos, los cuales pueden reutilizarse en la industria cementera o de materiales de construcción. El impacto ambiental se concentra en el uso de cal viva, cuyo proceso de producción es intensivo en CO_2 . No obstante, la valorización de sólidos reduce la disposición en rellenos y puede generar beneficios económicos y ambientales.

Gestión de sólidos suspendidos totales (SST)

La separación de sólidos mediante sedimentación, flotación y centrifugación evita descargas directas de arenas y lodos al ambiente. La estabilización con cemento o cal permite su reutilización en suelos o rellenos. Impactos asociados: consumo de energía en centrifugación y generación de residuos estabilizados. Beneficios: reducción de riesgo ecotoxicológico y cumplimiento de normativas ambientales.

Comparación con disposición convencional

El comparativo muestra que la disposición convencional (reinyección sin valorización) tiene una huella ambiental más alta en términos de consumo energético y riesgos de contaminación a largo plazo, pero menor en emisiones directas de CO₂ (cuando no se aplican procesos de evaporación). En contraste, la valorización implica un mayor consumo de reactivos y energía, pero transforma pasivos en recursos, reduciendo impactos de ecotoxicidad y fomentando la economía circular.

La estrategia más equilibrada en términos de impacto ambiental y viabilidad técnica corresponde a la recuperación de aceite y grasa mediante *skimming tank* y filtros de cascarilla de palma, dado su bajo consumo energético y alto beneficio económico. La recuperación de sales y metales resulta viable siempre que se integre con fuentes energéticas residuales y se asegure la disposición segura de lodos. Se recomienda profundizar en un Análisis de ciclo de vida ACV detallado con software especializado (SimaPro, GaBi, OpenLCA) para cuantificar indicadores como huella de carbono, huella hídrica y potencial de acidificación.

IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO

La implementación de tecnologías de valorización del agua de producción no solo tiene repercusiones técnicas, económicas y ambientales, sino también un conjunto de implicaciones sociales que resultan cruciales en el contexto del campo Platanillo y de la región donde se desarrollan las operaciones petroleras. El análisis de estas

implicaciones permite identificar beneficios y posibles tensiones con las comunidades, así como orientar políticas de responsabilidad social empresarial y de sostenibilidad.

Generación de empleo y desarrollo local

La adopción de procesos como la recuperación de aceite, la precipitación de baritina y la cristalización de sales implica la operación de equipos adicionales, la construcción de facilidades y la gestión de nuevos subproductos. Esto abre oportunidades para la creación de empleos directos en el manejo de estas tecnologías e indirectos en actividades de soporte, transporte y servicios asociados. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2021), los proyectos de economía circular en el sector energético tienen un alto potencial de dinamizar economías locales, especialmente en regiones periféricas.

Confianza y licencia social para operar

La valorización del agua de producción contribuye a la reducción de pasivos ambientales y, por ende, mejora la percepción de las comunidades frente a la industria petrolera. La implementación de filtros biodegradables (cascarilla de palma) y el aprovechamiento de residuos convierten a la empresa en un actor alineado con los principios de sostenibilidad, fortaleciendo su licencia social para operar. Estudios de Vanclay (2012) sobre impactos sociales en proyectos extractivos resaltan que la credibilidad de las empresas depende cada vez más de prácticas de innovación sostenible y del diálogo abierto con comunidades.

Riesgos sociales y percepción comunitaria

Aunque estas tecnologías reducen impactos ambientales, también pueden generar preocupaciones sociales si no son adecuadamente comunicadas. El temor a la manipulación de químicos (como el Na_2SO_4 o el NaOH) o a la generación de nuevos residuos debe ser gestionado mediante procesos de socialización transparentes y participativos. De acuerdo con García et al. (2018), la percepción comunitaria de

riesgo influye de manera directa en la aceptación o rechazo de proyectos energéticos.

Fortalecimiento de capacidades locales

La implementación de un esquema de economía circular en el tratamiento de agua de producción requiere personal capacitado en operación de equipos, control de calidad y gestión ambiental. Esto puede convertirse en una oportunidad para programas de formación técnica y transferencia de conocimiento en alianza con universidades regionales. Además, el desarrollo de subproductos como la baritina o el NaCl abre posibilidades de encadenamientos productivos locales, contribuyendo al desarrollo territorial.

Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La valorización de componentes del agua de producción contribuye al cumplimiento de varios ODS planteados por Naciones Unidas: ODS 6 (agua limpia y saneamiento), ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y ODS 12 (producción y consumo responsables). Estos avances permiten posicionar al campo Platanillo como un referente de innovación en sostenibilidad dentro de la industria petrolera colombiana.

Las implicaciones sociales de las estrategias de valorización del agua de producción son determinantes para su viabilidad. Más allá de los aspectos técnicos, la aceptación comunitaria, la generación de beneficios locales y el fortalecimiento de capacidades constituyen factores clave para garantizar que estos procesos se integren exitosamente en el territorio. La experiencia internacional demuestra que la gestión social adecuada es un catalizador para la innovación tecnológica en el sector energético.

IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES QUE PUEDEN BENEFICIARSE DE LOS PRODUCTOS RECUPERADOS

La implementación de estrategias de valorización del agua de producción no solo permite reducir los impactos ambientales asociados a la disposición de efluentes, sino que también genera productos con valor agregado que pueden integrarse en diferentes cadenas de valor industrial. En este capítulo se describen los principales sectores que pueden beneficiarse del aceite, baritina, sales y sólidos recuperados, con un enfoque en ventajas técnicas, económicas y ambientales.

Aceite recuperado

- El aceite separado del agua de producción puede reincorporarse directamente en el proceso de producción de crudo, mejorando el factor de recuperación y reduciendo pérdidas económicas. Además, este producto tiene aplicaciones en:
- Mezclas de combustibles para generación eléctrica y térmica.
- Materia prima para refinerías en la producción de derivados livianos.
- Suministro de combustibles industriales en sectores como la minería y el transporte marítimo.

Según Neff, Lee y DeBlois (2011), la recuperación de hidrocarburos en corrientes acuosas puede representar hasta un 2% adicional de crudo aprovechado, lo que resulta significativo a escala de campo.

Baritina (BaSO_4) recuperada

El bario presente en el agua de producción puede recuperarse mediante precipitación como baritina (BaSO_4). Este compuesto es ampliamente utilizado en:

- Formulación de fluidos de perforación en la industria petrolera.
- Fabricación de pigmentos, vidrios y cerámicas.
- Producción de frenos y materiales de fricción.

La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA, 2019) destaca que la baritina reciclada reduce la necesidad de extracción minera, contribuyendo a la economía circular y disminuyendo impactos ambientales de la minería primaria.

Sales recuperadas (NaCl y otros)

Las altas concentraciones de cloruros en el agua de producción permiten la recuperación de NaCl mediante cristalización, tecnología que puede integrarse con evaporadores mecánicos (MVR/MVC). El NaCl obtenido tiene múltiples usos industriales:

- Industria alimentaria (previo refinamiento y purificación).
- Producción de soluciones salinas para procesos químicos.
- Deshielo y control de carreteras en climas fríos.
- Materia prima para procesos cloro-álcali.

La reutilización de sales provenientes de aguas de producción reduce costos de disposición y puede abastecer mercados locales con valor competitivo.

Sólidos suspendidos (SST)

- Los sólidos suspendidos separados por sedimentación, filtración o centrifugación pueden estabilizarse e incorporarse en:
- Materiales de construcción (bloques, concretos).
- Rellenos para suelos y proyectos de recuperación de terrenos.
- Uso agrícola limitado tras tratamiento, como acondicionadores de suelos.

El reaprovechamiento de lodos y sólidos de aguas producidas es viable si se garantiza la inmovilización de contaminantes mediante estabilización química.

Los procesos industriales que pueden beneficiarse de los productos recuperados del agua de producción abarcan desde el sector energético hasta la construcción y

la industria química. La integración de estos subproductos en cadenas de valor existentes promueve la eficiencia de recursos, reduce la presión sobre materias primas vírgenes y fortalece el modelo de economía circular en la industria petrolera.

RECOMENDACIONES ESCALONADAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN A NIVEL INDUSTRIAL Y APLICACIONES PRÁCTICAS

El campo Platanillo cuenta actualmente con una infraestructura de tratamiento primario consolidada incluyendo tanques de *skimming*, separadores API, filtros de cascarilla, decantadores, bombas HPS y bombas centrífugas, que permiten el manejo básico del agua de producción antes de su reinyección. Sin embargo, la caracterización fisicoquímica y los balances de materia realizados evidencian que la composición del agua aún presenta concentraciones significativas de sólidos suspendidos, cloruros, sulfatos, hierro y trazas de hidrocarburos dispersos.

La siguiente estrategia escalonada propone una implementación progresiva y modular, priorizando la viabilidad económica, el aprovechamiento de la infraestructura existente y la maximización del ahorro energético. El objetivo es alcanzar un esquema sostenible de valorización del agua producida, sin requerir inversiones en grandes sistemas de separación o ampliaciones de tanques, aprovechando la compatibilidad hidráulica entre las líneas ya instaladas y las nuevas tecnologías propuestas.

Etapas 1: Optimización del sistema actual

Objetivo: maximizar la eficiencia de los equipos existentes, reduciendo la carga orgánica y la formación de emulsiones antes del tratamiento secundario.

Acciones recomendadas:

Skimming tanks y separadores API: ajustar tiempos de residencia y frecuencia de limpieza para mantener el contenido de aceite libre por debajo de 10 mg/L, condición óptima para los procesos posteriores.

Filtros de cascarilla: sustituir parcialmente el medio filtrante por fracciones de granulometría uniforme (1–2 mm) y baja densidad aparente para mejorar la remoción de hidrocarburos emulsionados.

Decantadores: implementar un control de pH (6,5–7,0) para mejorar la coalescencia de gotas oleosas y la sedimentación de sólidos finos.

Monitoreo operativo: incorporar análisis in situ de SDI (Índice de Ensuciamiento) y NTU (turbidez) cada 12 horas, a fin de evaluar el desempeño global del tren primario.

Esta primera fase no implica modificaciones estructurales ni inversión en nuevos equipos, pero permite reducir la carga contaminante inicial, lo cual facilita la eficiencia del tratamiento posterior.

Etapas 2: Implementación de tratamiento secundario y valorización

Objetivo: remover iones incrustantes y sólidos finos para mejorar la calidad del agua inyectada y permitir la recuperación parcial de subproductos valorizables.

Acciones recomendadas:

Ósmosis inversa (RO) en derivación (20 % del caudal): tratamiento de una fracción controlada del flujo, con permeado de alta calidad para recirculación y concentrado enviado a cristalización o neutralización.

Filtro prensa: acoplar el filtro prensa al circuito de concentrados y lodos de clarificación para deshidratar los sólidos (humedad <30 %) y facilitar su manejo y disposición.

Reinyección y control de incrustación: el permeado tratado puede emplearse como agua de dilución para reducir la dureza y los sulfatos en el flujo de reinyección,

disminuyendo la presión en las bombas HPS entre 10 y 20 %, con los beneficios energéticos demostrados.

Recuperación de compuestos: la baritina (BaSO_4) y los lodos ricos en carbonatos de calcio pueden emplearse como materiales de relleno en cementaciones, mientras que el aceite recuperado en los *skimming tanks* puede reincorporarse al sistema de producción.

Esta etapa representa la fase crítica de valorización, donde se genera un beneficio técnico y económico directo. El sistema puede operar con una inversión de \$200.000 USD y una reducción estimada del consumo energético anual superior a \$370.000 USD, garantizando un periodo de retorno inferior a dos años.

Etapas 3: Optimización energética e integración operativa

Objetivo: aprovechar los ahorros energéticos derivados de la mejora en la calidad del agua de inyección para optimizar la operación de las bombas HPS y reducir el consumo de diésel.

Acciones recomendadas:

Ajuste de la frecuencia de operación (Hz): implementar un programa de optimización en variadores de velocidad (VFD), ajustando la frecuencia de las HPS de acuerdo con la viscosidad y las condiciones reológicas del agua tratada.

Balance energético y emisiones: documentar mensualmente el ahorro de combustible y las toneladas de CO_2 evitadas, integrando la información en los reportes de sostenibilidad y desempeño ambiental del campo.

Esta etapa consolida el enfoque de economía circular y eficiencia energética, al vincular el tratamiento del agua con la reducción de consumo de combustible fósil y el aumento de la vida útil de las bombas.

Aplicaciones prácticas

Optimización del factor energético: reducción de consumo de diésel en las HPS entre 10 % y 20 %, generando un ahorro anual promedio de \$150.000 a \$280.000 USD.

Disminución de emisiones: reducción estimada de 300–500 toneladas de CO₂/año, de acuerdo con el factor de emisión del diésel.

Valorización de subproductos: recuperación de baritina, carbonatos y aceites residuales para su reutilización industrial.

Mejora en confiabilidad operacional: menor ensuciamiento en líneas de inyección y mayor vida útil de las bombas, membranas y separadores.

Cumplimiento ambiental: el esquema integrado cumple los límites establecidos por la Resolución 0631 de 2015 del MADS para vertimientos y reinyección, fortaleciendo la gestión ambiental corporativa.

El modelo estudiado para el campo Platanillo constituye una referencia técnica replicable para otras operaciones de la región y el país, contribuyendo al cumplimiento de metas de descarbonización y gestión responsable del agua en la industria petrolera.

CONCLUSIONES

- El análisis fisicoquímico del agua de producción del campo Platanillo permitió identificar la presencia de diversos compuestos disueltos y suspendidos con potencial de valorización, entre los cuales se destacan bario, hierro, sulfatos, cloruros, sólidos suspendidos totales y trazas de hidrocarburos. La caracterización realizada mediante métodos analíticos estandarizados permitió establecer una base técnica confiable para evaluar alternativas de aprovechamiento de estos componentes, en concordancia con metodologías ampliamente utilizadas en la caracterización de aguas industriales y aguas de producción en la industria petrolera.
- Los resultados obtenidos evidencian que, aun cuando el agua de producción es tradicionalmente considerada una corriente residual de difícil manejo, su composición química permite identificar oportunidades de recuperación de materiales y optimización de procesos, lo cual se alinea con los principios de economía circular aplicados al sector energético. En este contexto, la recuperación potencial de compuestos como sulfato de bario, hidróxidos férricos, sales de sodio y precipitados de dureza representa una alternativa para transformar corrientes residuales en subproductos con posible valor industrial o potencial de reutilización dentro de los propios sistemas de tratamiento.
- El análisis técnico de las tecnologías de tratamiento permitió identificar que procesos como nanofiltración, ósmosis inversa, coagulación-floculación, precipitación química y separación sólido-líquido constituyen alternativas técnicamente viables para la remoción selectiva de los compuestos identificados en el agua de producción. Estas tecnologías han sido ampliamente documentadas en la literatura científica y en aplicaciones industriales para el tratamiento de aguas de producción y aguas industriales con alta salinidad.

- A partir de los balances de materia realizados para cada uno de los parámetros evaluados, se determinó que, considerando el caudal promedio diario del sistema de tratamiento, es posible recuperar cantidades significativas de compuestos sólidos precipitados, lo cual demuestra el potencial de valorización de la corriente de agua tratada. Estos cálculos permitieron cuantificar la posible producción diaria de sólidos como sulfato de bario, hidróxidos metálicos, sales y sólidos suspendidos removidos en los procesos de tratamiento.
- Desde el punto de vista operativo, la implementación de estrategias de tratamiento orientadas a la reducción de incrustaciones, corrosión y *fouling* en el sistema de reinyección presenta beneficios adicionales más allá de la valorización de compuestos. La mejora en la calidad del agua de inyección puede contribuir a la disminución de la presión requerida en las bombas de alta presión (HPS), lo cual se traduce en una reducción del consumo energético y del combustible utilizado por los generadores que alimentan estos sistemas.
- El análisis económico simplificado desarrollado para el horizonte de evaluación de diez años mostró que la implementación de las tecnologías propuestas resulta viable desde el punto de vista financiero, especialmente considerando que el campo ya cuenta con gran parte de la infraestructura de separación primaria, tales como *skimming tanks*, separadores, filtros de cascarilla, decantadores y sistemas de bombeo. En este contexto, las inversiones adicionales se concentran principalmente en insumos químicos, sistemas de membranas y equipos auxiliares de filtración, lo cual reduce significativamente el CAPEX requerido.
- La reducción en los costos operativos asociados al consumo energético, el uso de productos químicos y la disminución de problemas operacionales derivados de incrustaciones o ensuciamiento de equipos contribuyen a mejorar la rentabilidad del sistema de tratamiento propuesto. Este tipo de estrategias ha sido identificado en diversos estudios como una de las

principales oportunidades para optimizar la gestión del agua de producción en la industria petrolera (Veil et al., 2004; Sørensen et al., 2019).

- Desde el punto de vista ambiental, las alternativas planteadas permiten reducir la carga contaminante del agua de producción, disminuir los volúmenes destinados a disposición final y mejorar la eficiencia global del sistema de manejo de aguas en el campo. Estas acciones contribuyen al fortalecimiento de estrategias de gestión sostenible del recurso hídrico en operaciones de producción de hidrocarburos.
- El presente trabajo demuestra que la caracterización fisicoquímica detallada del agua de producción constituye una herramienta fundamental para identificar oportunidades de valorización y optimización de procesos dentro de la industria petrolera. La integración de análisis químico, evaluación tecnológica y análisis económico permite desarrollar propuestas técnicamente sustentadas que pueden contribuir a mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental de las operaciones de producción de hidrocarburos.
- Aunque inicialmente la investigación se enfocó en el potencial de aprovechamiento de los componentes fisicoquímicos presentes en el agua de producción, los resultados permitieron identificar que el mayor impacto económico potencial no se encuentra necesariamente en la comercialización directa de los compuestos recuperados, sino en los beneficios operacionales derivados de la mejora de las características del agua tratada y la optimización del sistema de reinyección.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica del agua de producción del campo Platanillo y del análisis técnico económico de las tecnologías de tratamiento evaluadas, se proponen las siguientes recomendaciones para la implementación industrial y el desarrollo futuro de esta línea de investigación:

- Se recomienda implementar un programa continuo de monitoreo fisicoquímico del agua de producción que permita evaluar la variabilidad temporal de los parámetros analizados, particularmente aquellos asociados a procesos de incrustación, corrosión y ensuciamiento, como bario, hierro, sulfatos, cloruros, sólidos suspendidos totales y contenido de hidrocarburos. La caracterización periódica de estas variables es fundamental para optimizar las estrategias de tratamiento y garantizar la estabilidad operativa de los sistemas de reinyección.
- Se recomienda realizar pruebas piloto de las tecnologías de valorización propuestas, especialmente aquellas asociadas a procesos de precipitación química selectiva, separación por membranas y sistemas de filtración avanzada. La implementación de pruebas a escala piloto permitirá validar los balances de materia estimados en este estudio, optimizar las condiciones operativas de los procesos y determinar de manera más precisa los costos asociados a su operación industrial.
- Se sugiere evaluar de forma experimental la recuperación de compuestos precipitados tales como sulfato de bario, hidróxidos metálicos y sales inorgánicas, con el fin de determinar su posible aprovechamiento en aplicaciones industriales o su potencial reutilización dentro de los propios procesos de tratamiento del agua de producción. Este tipo de estrategias se alinea con los principios de economía circular aplicados a la industria petrolera y puede contribuir a reducir los volúmenes de residuos generados en las operaciones.

- Desde el punto de vista operativo, se recomienda analizar de manera detallada el impacto que tendría la mejora en la calidad del agua de reinyección sobre el desempeño de los sistemas de bombeo de alta presión (HPS). La reducción de fenómenos de incrustación, corrosión y *fouling* puede permitir disminuir la presión requerida para la inyección, lo cual se traduciría en una reducción en el consumo energético y en el combustible utilizado por los generadores que alimentan estos sistemas.
- Se recomienda evaluar el desempeño de tecnologías de membranas, particularmente nanofiltración y ósmosis inversa, como herramientas complementarias para la remoción selectiva de sales y compuestos disueltos presentes en el agua de producción. Estas tecnologías han demostrado ser altamente eficientes en el tratamiento de aguas con alta salinidad y podrían contribuir a mejorar la calidad del agua destinada a reinyección o a posibles esquemas de reutilización.
- En términos económicos, se sugiere desarrollar estudios de factibilidad más detallados que incluyan análisis de sensibilidad asociados a variables como costos de energía, consumo de reactivos químicos, mantenimiento de equipos y posibles ingresos derivados de la valorización de subproductos recuperados. Este tipo de análisis permitiría fortalecer la toma de decisiones para la implementación industrial de las alternativas propuestas.
- También se recomienda profundizar en el análisis ambiental de las tecnologías evaluadas, incorporando en futuros estudios metodologías más avanzadas de evaluación ambiental, tales como análisis de ciclo de vida (ACV), con el fin de cuantificar de manera integral los impactos asociados a cada alternativa de tratamiento y valorización.
- Se sugiere que futuras investigaciones continúen explorando estrategias de economía circular aplicadas a la gestión del agua de producción en campos petroleros, integrando enfoques de recuperación de recursos, optimización energética y reducción de residuos. Este tipo de enfoques representa una oportunidad significativa para mejorar la sostenibilidad de las operaciones de

producción de hidrocarburos y fortalecer la gestión ambiental en la industria energética.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Ghouti, M. A., Al-Kaabi, M. A., Ashfaq, M. Y., & Da'na, D. A. (2019). *Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. Journal of Water Process Engineering*, 28, 222–239.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.019>
- Amakiri, K. T., Onn, C. C., Noeman, A., Bilad, M. R., Nordin, N. A. H. M., & Arahman, N. (2022). *Current technologies for treatment, reuse, and disposal of produced water from oil and gas operations: A review. Science of the Total Environment*, 808, 152–174.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152174>
- American Petroleum Institute (API). (1990). *Design and Operation of Oil-Water Separators (Publication 421)*. American Petroleum Institute.
- American Petroleum Institute (API). (2010). *Specification 13A: Specification for Drilling-Fluid Materials*. American Petroleum Institute.
- Asociación Colombiana del Petróleo y Gas (ACP). (s.f.). *Especial economía circular*. Recuperado de <https://acp.com.co/portal/especial-economia-circular/>
- Baker, R. W. (2012). *Membrane Technology and Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Câmara, F. R., Oliveira, L. F., & Siman, R. R. (2020). Reuso de água de produção na indústria do petróleo: Uma revisão crítica. *Revista Tecnologia e Sociedade*, 16(41), 48–62. <https://doi.org/10.3895/rts.v16n41.11875>
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 de 2015: Parámetros y límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado público*.
- Davis, M. L. (2010). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. McGraw-Hill Education.

- Edzwald, J. K. (2010). *Dissolved Air Flotation for Water Clarification*. American Water Works Association.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2019). *Technical Development Document for the Oil and Gas Extraction Point Source Category* (EPA-821-R-19-003).
- Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., & Abidin, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2–3), 530–551. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044>
- Gale. (s.f.). *Importancia de la caracterización de aguas producidas en la industria petrolera*. Recuperado de <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA494500910>
- García, J., Pardo, R., & Torres, L. (2018). Percepción social del riesgo en proyectos energéticos: retos para la sostenibilidad. *Revista de Estudios Sociales*, 65, 45–59. <https://doi.org/10.7440/res65.2018.05>
- Gómez, L., Pérez, J., & Mora, D. (2021). Gestión ambiental y aprovechamiento de residuos industriales en el sector petrolero colombiano. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 28(2), 43–56.
- Hach Company. (2017). *Water Analysis Handbook* (7th ed.). Hach Company.
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing.
- Housecroft, C. E., & Sharpe, A. G. (2018). *Inorganic Chemistry* (5th ed.). Pearson Education.
- Igunnu, E. T., & Chen, G. Z. (2014). *Produced water treatment technologies*. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3), 157–177. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts049>

- International Energy Agency (IEA). (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. OECD/IEA.
- Judd, S. (2011). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment* (2nd ed.). Elsevier.
- Judd, S., & Jefferson, B. (2017). *Industrial Membrane Separation Technology* (2nd ed.). Elsevier.
- Kinnaman, T. C. (2011). The economic impact of shale gas extraction: A review of existing studies. *Ecological Economics*, 70(7), 1243–1249.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.02.005>
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mulder, M. (1996). *Basic Principles of Membrane Technology* (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Naciones Unidas (ONU). (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://sdgs.un.org/es/goals>
- Neff, J. M., Lee, K., & DeBlois, E. M. (2011). Produced water: Overview of composition, fates, and effects. In K. Lee & J. M. Neff (Eds.), *Produced Water: Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies* (pp. 3–54). Springer.
- Oates, J. A. H. (1998). *Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses*. Wiley-VCH.
- Oetjen, K., Chan, K. E., Gulmark, K., Christensen, J. H., Blotevogel, J., Borch, T., & Higgins, C. P. (2018). Temporal characterization and statistical analysis of flowback and produced waters and their potential for reuse. *Science of the Total Environment*, 619–620, 654–664.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.078>

- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Qasim, S. R., & Zhu, G. (2018). *Wastewater Treatment and Reuse: Theory and Design Examples*. CRC Press.
- Revista Gestión y Ambiente. (2018). Reúso del agua de producción de hidrocarburos: Reto y oportunidad. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 115–126.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/87664>
- SETAPHT. (s.f.). *Tratamiento de agua en industrias de gas y petróleo*. Recuperado de <https://www.setapht.com/blog/tratamiento-de-agua-en-industrias-de-gas-y-petroleo/>
- Silva, M. M., Santana, F. F., & Ribeiro, M. A. (2019). Composição e implicações ambientais da água de produção da indústria de petróleo e gás. *Revista Gestão Industrial*, 15(1), 124–139.
- Sørensen, M., Jensen, L., & Hansen, K. (2019). Produced water treatment technologies in offshore oil & gas operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 123–135.
- Spellman, F. R. (2017). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (3rd ed.). CRC Press.
- Strathmann, H. (2010). Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, 264(3), 268–288.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.069>
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- Svarovsky, L. (2000). *Hydrocyclones* (2nd ed.). Springer.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2010). *Method 1664A: N-Hexane Extractable Material (HEM) and Silica Gel Treated HEM (SGT-HEM)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2017). *SW-846 Test Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Vanclay, F. (2012). Conceptualising social impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 42, 149–154.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.03.001>
- Veil, J. A., Puder, M. G., Elcock, D., & Redweik Jr., R. J. (2004). *A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane*. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.
- World Bank. (2017). *Discounting Costs and Benefits in Economic Analysis of World Bank Projects*.