



## PROYECTO DE INTEGRACIÓN

### Título del proyecto:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUA COPRODUCIDA  
EN CAMPOS PETROLEROS PARA RIEGO DE VÍAS RURALES Y CULTIVOS AGRÍCOLAS,  
BAJO UN ENFOQUE DE SOSTENIBILIDAD, ECONOMÍA CIRCULAR Y TRANSFORMACIÓN  
DIGITAL

### Integrantes

**WILMER ANDRES SALAZAR GOMEZ**

**CRISTIAN ALBERTO ARIZA GARCIA**

### Docente

**ELIZABETH LEON VELASQUEZ**

**BOGOTÁ D.C.**

**09 de noviembre de 2025**

**UNIVERSIDAD EAN**



## Resumen ejecutivo

La producción de petróleo en campos maduros genera volúmenes considerables de agua coproducida. Este efluente contiene sales, hidrocarburos, metales pesados y microorganismos que dificultan su disposición (USGS, 2020). En muchas operaciones esta agua se desecha por reinyección o vertimiento, desperdiciando un recurso que podría valorizarse para riego de cultivos, uso en vías o aplicaciones industriales. La normativa colombiana promulgó la Resolución 1256 de 2021, que estableció dos modalidades de uso del agua residual—reúso y recirculación—y derogó la Resolución 1207 de 2014 (PGP Abogados, 2021). El reúso requiere concesión de agua residual y cumplimiento de criterios de calidad, especialmente para agricultura, mientras que la recirculación se autoriza para operaciones internas sin contacto con el suelo (PGP Abogados, 2021). Sin embargo, los operadores carecen de herramientas accesibles que integren variables técnicas, normativas y socioeconómicas para seleccionar sistemas de tratamiento y evaluar su viabilidad.

El proyecto propone diseñar una herramienta digital (dashboard o aplicación web) que integre un árbol de decisiones con un módulo de evaluación de resultados para apoyar la selección de sistemas de reúso del agua coproducida en campos petroleros. La herramienta incorporará variables de calidad del agua, requisitos normativos de la Resolución 1256 de 2021, criterios técnicos (microfiltración, filtración con cáscara de nuez, entre otros) y aspectos económicos y sociales. Además, se diseñará un sistema piloto de tratamiento basado en filtración con cáscara de nuez, complementado con microfiltración, cumpliendo los límites permisibles para reúso en riego y otros usos. Finalmente, se realizará la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua coproducida como insumo para la base de datos y validación del modelo. La entrega se organiza según las guías de la asignatura, incluyendo introducción, planteamiento del problema, preguntas de investigación, objetivos, justificación, marco de referencia, metodología y conclusiones.



## Tabla de Contenido

Resumen ejecutivo .....	2
Introducción.....	5
1. Planteamiento del problema.....	6
Preguntas de investigación.....	6
2. Objetivos .....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
3. Justificación.....	8
4. Análisis de Requerimientos .....	9
4.1 Intención del producto .....	9
4.2 Este sistema incluye dos componentes articulados: .....	9
4.3 Verificación de parámetros de diseño.....	10
4.4 Obtención de resultados mediante pruebas .....	11
5. Marco de referencia .....	12
5.1 Composición y problemática del agua coproducida .....	12
5.2 Normativa sobre reúso del agua en Colombia.....	12
5.3 Tecnologías de tratamiento y selección.....	13
5.4 Árbol de decisiones y herramientas digitales.....	14
6. Análisis de restricciones .....	16
6.1 Alcance del análisis .....	16
6.2 Restricciones por alternativa tecnológica.....	17
6.3 Tabla 3. Matriz de riesgos (HSE y operación) .....	19
6.4 Restricciones normativas específicas (Colombia) .....	20
6.5 Restricciones específicas del componente digital: .....	20
6.6 Matriz DOFA .....	21
7. Marco Teórico .....	22
7.1 Propósito, alcance y estructura conceptual .....	22
7.2 El agua coproducida en la industria petrolera: definición, magnitud e impactos ..	22
7.3 Naturaleza y composición del agua de producción: retos de manejo .....	23
7.4 Tecnologías y procesos de tratamiento .....	25
7.5 Pretratamiento y remoción de hidrocarburos.....	25
7.6 Clarificación/precipitación y control de ensuciamiento .....	26
7.7 Membranas (UF/NF/RO) y ZLD .....	26



7.8	Reúso agrícola y en control de polvo de vías: evidencia y riesgos.....	27
7.9	Normativa y lineamientos de calidad para reúso .....	28
7.10	Restricciones, riesgos y sostenibilidad (síntesis aplicada) .....	28
7.11	Digitalización como herramienta de apoyo (dashboard + MCDA) .....	29
7.12	Convergencia con economía circular y casos nacionales .....	30
8.	Metodología .....	34
8.1	Enfoque metodológico .....	34
8.2	Diseño metodológico .....	36
8.2	Revisión documental y normativa .....	36
8.3	Población y muestra .....	38
8.4	Técnicas e instrumentos.....	38
8.5	Caso de estudio – Tratamiento del agua coproducida en CPF Casanare.....	38
	• Descripción del proceso de tratamiento de agua coproducida.....	41
	• Filtros cascara de nuez.....	43
	• Tecnología complementaria – Ultrafiltración (UF) .....	44
	• Calidad visual del agua de producción para riego antes y después.....	45
8.6	Diagrama metodológico (flujo de fases).....	46
9.	Análisis costos beneficio del proyecto.....	48
9.1.	Costos directos .....	48
9.2.	Costos fijos .....	48
9.3.	Gastos generales ( <i>overhead</i> ).....	49
9.1.	Inversión y capital de trabajo.....	49
9.4.	Análisis de beneficios esperados .....	51
9.5.	Balance costo–beneficio.....	52
9.6	Resultados – Dashboard Digital.....	53
9.7	Discusión.....	59
9.8	Interpretación de hallazgos .....	59
10.	Conclusiones.....	61
11.	Referencias.....	63



## Introducción

La disponibilidad de agua dulce es un desafío global, agravado por el crecimiento poblacional, el cambio climático y la competencia entre sectores productivos. El reúso de aguas tratadas se ha convertido en una estrategia para aumentar la oferta hídrica. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) define el reúso del agua como el proceso de recuperar agua de diversas fuentes y tratarla para emplearla en agricultura, abastecimiento potable, recarga de acuíferos y procesos industriales (EPA, 2024). Las fuentes potenciales incluyen aguas residuales municipales, aguas de procesos industriales, escorrentía agrícola y agua coproducida de la extracción de hidrocarburos (EPA, 2024). Para usos agrícolas, las normas exigen cumplir especificaciones de calidad adecuadas que garanticen la seguridad de cultivos, suelos y trabajadores (EPA, 2024).

En los campos petroleros, el agua coproducida es la mayor corriente de desecho; por cada barril de petróleo extraído se generan alrededor de diez barriles de agua (USGS, 2020). Esta agua presenta concentraciones elevadas de sales (entre 1 000 y 250 000 mg/L), hidrocarburos, químicos tóxicos, metales pesados y material radioactivo natural (USGS, 2020). El manejo inadecuado puede causar impactos ambientales y aumentar los costos operativos. Actualmente más de 95 % de esta agua se reinyecta, y en muchos casos se descarta sin tratamiento, desaprovechando su potencial de reúso (USGS, 2020). La situación es particularmente crítica en regiones rurales con escasez hídrica, donde el agua tratada podría destinarse al riego agrícola o control de polvo en vías.



## 1. Planteamiento del problema

Durante la extracción de petróleo en algunos campos maduros colombianos se genera una gran cantidad de agua coproducida altamente contaminada que actualmente se desecha sin valorización (Mesa et al., 2018). Este desperdicio de un recurso con potencial de reúso se produce a pesar de que la legislación nacional permite utilizar aguas residuales tratadas en agricultura e industria (PGP Abogados, 2021). La disposición sin tratamiento conlleva impactos ambientales (contaminación de suelos y cuerpos de agua) y pérdidas económicas para las comunidades y empresas. Además, la escasez de herramientas digitales que permitan simular y evaluar alternativas de tratamiento impide tomar decisiones informadas que incorporen criterios técnicos, normativos, sociales y económicos. La falta de información sistematizada sobre la calidad del agua coproducida y los costos de tratamiento limita la implementación de tecnologías de reúso en los campos petroleros.

### Preguntas de investigación

1. ¿Cómo integrar variables técnicas, normativas, sociales y económicas en una herramienta digital que permita seleccionar la mejor alternativa de tratamiento y reúso del agua coproducida?
2. ¿Qué tecnologías de tratamiento, particularmente la filtración con cáscara de nuez y procesos de membrana, son más efectivas para cumplir con la Resolución 1256 de 2021?
3. ¿Qué parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua coproducida deben caracterizarse para garantizar un modelo de tratamiento confiable?
4. ¿Cómo validar la herramienta digital y el modelo de tratamiento en escenarios reales de pruebas piloto y de aceptación social?



## 2. Objetivos

### Objetivo general

Diseñar un sistema de tratamiento y reúso del agua coproducida en campos petroleros para su aplicación en riego agrícola y vial, en cumplimiento de la Resolución 1256 de 2021 y bajo un enfoque de sostenibilidad y economía circular, complementado con una herramienta digital de apoyo a la toma de decisiones.

### Objetivos específicos

1. Caracterizar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua coproducida en el campo de estudio.
2. Diseña un sistema modular de tratamiento de agua coproducida, basado en filtración con cáscara de nuez y microfiltración, que cumpla con los parámetros de la Resolución 1256 de 2021.
3. Evaluar la viabilidad técnica, social y económica del modelo de tratamiento mediante pruebas piloto y encuestas de percepción.
4. Incorporar una herramienta digital que integre variables técnicas y normativas para apoyar la selección de alternativas de tratamiento y reúso.



### 3. Justificación

La presión sobre los recursos hídricos en Colombia exige adoptar estrategias de gestión sostenible como el reúso de aguas tratadas. La Resolución 1256 de 2021 promueve la bioeconomía y el uso eficiente del agua al habilitar el reúso en actividades agrícolas e industriales y la recirculación en procesos internos (PGP Abogados, 2021). Sin embargo, los procedimientos para obtener la concesión de aguas residuales pueden desincentivar su aplicación (PGP Abogados, 2021). Diseñar una herramienta digital que simplifique la evaluación de alternativas de tratamiento y reúso contribuirá a superar barreras administrativas y técnicas. La incorporación de criterios sociales—como la aceptación de las comunidades y el impacto en el empleo local—fortalece la viabilidad del proyecto y la transición hacia una economía circular.

La selección adecuada de tecnologías de tratamiento requiere comprender las características del agua coproducida. Dado que presenta altas concentraciones de sales, hidrocarburos y químicos tóxicos (USGS, 2020), su tratamiento debe incluir procesos de remoción de partículas y aceite, como la filtración con cáscara de nuez, y procesos de membrana para eliminar sales disueltas. La microfiltración utiliza membranas con poros de 0,1–10 micras que retienen bacterias y sólidos, pero no remueven iones o sales (Crystal Quest, 2025). Por su parte, la ósmosis inversa emplea membranas semipermeables que, mediante presión, eliminan especies químicas disueltas y bacterias (Wikipedia, 2025). Integrar estas tecnologías en un tren de tratamiento proporciona agua de calidad adecuada para riego u otros usos y responde a los principios de sostenibilidad.

El proyecto también aporta valor social al ofrecer una alternativa de abastecimiento hídrico para comunidades rurales y al reducir el impacto ambiental de la industria petrolera. La caracterización permitirá futuras investigaciones y facilitará la replicabilidad en otros campos.



## 4. Análisis de Requerimientos

### 4.1 Intención del producto

El proyecto busca desarrollar un sistema integral de tratamiento y reúso de agua coproducida en campos petroleros para su aplicación en riego agrícola y control de polvo en vías rurales, en cumplimiento de la Resolución 1256 de 2021.

### 4.2 Este sistema incluye dos componentes articulados:

**Componente técnico principal:** diseño y validación de un sistema de tratamiento basado en filtración con cáscara de nuez y procesos complementarios (microfiltración y/o nanofiltración), capaz de remover hidrocarburos, sólidos suspendidos, sales y contaminantes críticos.

**Componente digital:** desarrollo de una herramienta digital (dashboard o aplicación web) que integre un árbol de decisiones y un módulo de evaluación comparativa de parámetros, generando reportes técnicos y visuales que faciliten la toma de decisiones para ingenieros, operadores y actores sociales.

De esta manera, el producto esperado no es solo un prototipo de tratamiento, sino un modelo replicable que combina ingeniería de procesos y digitalización para optimizar la gestión del recurso hídrico.



### 4.3 Verificación de parámetros de diseño

Los parámetros críticos definidos para el sistema, de acuerdo con la Resolución 1256 de 2021 y la literatura técnica, son los siguientes:

Parámetro	Valor normativo (Resol. 1256/2021)	Método de verificación	Responsable
Turbidez	$\leq 5$ NTU	Ensayos de turbidez en laboratorio (NTU, método nefelométrico)	Equipo de laboratorio ambiental
Aceites y grasas	$\leq 10$ mg/L	Extracción con solventes y gravimetría (EPA 1664A)	Laboratorio de aguas
TPH (hidrocarburos totales)	$\leq 5$ mg/L	Cromatografía de gases (GC-FID)	Laboratorio especializado
TDS (sólidos disueltos totales)	$\leq 1500$ mg/L	Conductividad eléctrica y gravimetría	Laboratorio ambiental
pH	6.5 – 8.5	Medición con potenciómetro	Operador de planta
Coliformes totales y fecales	0 NMP/100 mL	Ensayo microbiológico (método Colilert/filtración de membrana)	Laboratorio microbiológico
Hierro (Fe)	$\leq 0.3$ mg/L (criterio complementario)	Absorción atómica / ICP	Laboratorio químico
Bario y Sulfatos	$\leq 1$ mg/L y $\leq 250$ mg/L (criterios críticos para incrustación)	ICP-OES / titulación	Laboratorio especializado



#### 4.4 Obtención de resultados mediante pruebas

La validación del cumplimiento de los requerimientos se realizará en tres fases:

##### **Pruebas de laboratorio:**

- Análisis fisicoquímicos y microbiológicos (turbidez, TDS, TPH, aceites, pH, metales, coliformes).
- Protocolos basados en Resolución 1256 de 2021 y normas EPA/ASTM.

##### **Pruebas piloto en campo:**

- Implementación de unidades de filtración con cáscara de nuez en la Estación Carrizales (Orocué, Casanare).
- Registro de variables de operación (caudal, presión, eficiencia de remoción).

##### **Comparación normativa:**

- Confrontación de los resultados experimentales frente a los valores límite exigidos por la normativa colombiana para riego agrícola y control de polvo en vías.

##### **Validación digital:**

- Integración de resultados experimentales en la herramienta digital.
- Generación de reportes técnicos (tablas comparativas, gráficas de evolución y alertas de incumplimiento).



## 5. Marco de referencia

### 5.1 Composición y problemática del agua coproducida

La literatura indica que el agua coproducida constituye la corriente de desecho más voluminosa de la industria del petróleo; se generan entre 10 y 30 barriles de agua por cada barril de crudo (USGS, 2020). Los altos niveles de salinidad (1 000–250 000 mg/L), aceite y grasa, químicos tóxicos, metales pesados y materiales radioactivos naturales limitan su disposición o reúso (USGS, 2020). La remediación y manejo representan costos significativos; históricamente la mayor parte de estas aguas se reinyecta, aunque aún existen descargas superficiales que causan contaminación (USGS, 2020). Proyectos recientes han evaluado la posibilidad de tratar el agua coproducida mediante trenes de membranas (coagulación, microfiltración, nanofiltración/ósmosis inversa) para su uso en riego agrícola, analizando la toxicidad antes y después del tratamiento y el impacto en suelos y cultivos (Colorado State University, 2021).

### 5.2 Normativa sobre reúso del agua en Colombia

La Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible reglamenta el uso de las aguas residuales en el país. La norma define dos usos principales: (i) el reúso en actividades agrícolas e industriales y (ii) la recirculación en operaciones internas que no tengan contacto con el suelo (PGP Abogados, 2021). Para el reúso, los usuarios deben obtener una concesión de agua residual de acuerdo con el Decreto 2811 de 1974 y cumplir criterios de calidad establecidos en la resolución (PGP Abogados, 2021). En el caso de recirculación, se permite el uso de las aguas residuales en procesos unitarios dentro de una misma actividad económica sin requerir permiso ambiental (PGP Abogados, 2021). La resolución busca promover la bioeconomía y la eficiencia hídrica; sin embargo, se ha señalado que los trámites podrían retrasar proyectos (PGP Abogados, 2021). La herramienta digital



propuesta incorporará los parámetros de calidad y los trámites requeridos para evaluar la viabilidad normativa de cada alternativa de tratamiento.

### 5.3 Tecnologías de tratamiento y selección

**Filtración con cáscara de nuez.** Los filtros de cáscara de nuez son dispositivos profundos utilizados desde la década de 1970 para separar el petróleo del agua producida. Utilizan medios de nuez o pecana debido a su dureza y afinidad equivalente por agua y aceite, lo que permite adsorber aceite y liberar el medio durante el retrolavado. Estos filtros se diseñan para cargas inferiores a 100 mg/L de aceite y 100 mg/L de sólidos suspendidos y alcanzan eficiencias de remoción del 90–95 % (Kremesti, 2023). Su principal uso es el tratamiento terciario posterior a separadores primarios y secundarios, tanto en instalaciones onshore como offshore, para permitir la reinyección o reúso del efluente (Kremesti, 2023). La operación requiere retrolavados periódicos controlados por diferencial de presión o temporizadores (Kremesti, 2023).

**Microfiltración.** La microfiltración utiliza membranas con poros de 0,1–10  $\mu\text{m}$  para eliminar partículas, bacterias y otros contaminantes. Es eficaz para clarificar el agua sin remover sales disueltas, y suele emplearse como pretratamiento para procesos de nanofiltración u ósmosis inversa (Crystal Quest, 2025). Las membranas de fibra hueca ofrecen alta superficie, modularidad y durabilidad, permitiendo configuraciones de flujo de adentro hacia afuera o viceversa (Crystal Quest, 2025). Ventajas de la microfiltración incluyen alta precisión de filtración, menor consumo de energía en comparación con la ósmosis inversa y posibilidad de escalamiento (Crystal Quest, 2025).

**Ósmosis inversa.** La ósmosis inversa es un proceso de hiperfiltración que aplica presión para vencer la presión osmótica y forzar el paso del solvente (agua) a través de una membrana semipermeable, reteniendo solutos y bacterias. Es utilizada para desalación de



agua de mar y purificación de agua potable (Wikipedia, 2025). En comparación con la microfiltración, las membranas de ósmosis inversa permiten remover sales disueltas y contaminantes de tamaño nanométrico (Wikipedia, 2025). La combinación de microfiltración como pretratamiento y ósmosis inversa como etapa final es una estrategia eficaz para reducir el ensuciamiento y maximizar la vida útil de las membranas (Colorado State University, 2021).

#### 5.4 Árbol de decisiones y herramientas digitales.

La selección de tecnologías de tratamiento requiere analizar múltiples variables: composición del agua, límites normativos, eficiencia de cada proceso, costos de inversión y operación, y criterios sociales. Un árbol de decisiones es un esquema lógico que permite evaluar alternativas en función de variables discretas y probabilidades. La herramienta digital propuesta se construirá en Python usando marcos como Streamlit / Flask para ofrecer una interfaz web que integre la base de datos de caracterización del agua, un motor de reglas basado en la normativa y modelos de costos. El usuario podrá ingresar parámetros de su campo y obtener recomendaciones de tratamiento junto con análisis de sensibilidad y gráficos comparativos. La digitalización facilitará actualizar los criterios cuando la normativa cambie y permitirá extender la herramienta a otras industrias que generan aguas residuales.

##### Resumen de tecnologías de tratamiento

Tecnología	Contaminantes/removidos	Ventajas
Microfiltración	Partículas y bacterias; no remueve sales	Alta precisión; bajo consumo de energía; modularidad
Filtro de cáscara de nuez	Aceite y sólidos (<100 mg/L)	Remoción de 90–95 %; adecuado para tratamiento terciario
Ósmosis inversa	Sales disueltas y contaminantes nanométricos	Produce agua de alta pureza; adecuada para desalación

##### Resumen de usos normativos del agua residual (Resolución 1256 de 2021)

Uso	Descripción	Requisitos
-----	-------------	------------



Uso	Descripción	Requisitos
Reúso	Empleo de agua residual tratada en agricultura e industria	Concesión de agua residual y cumplimiento de límites de calidad
Recirculación	Reutilización interna en procesos sin contacto con el suelo	No requiere permiso ambiental

La incorporación de una herramienta digital de apoyo a la decisión (DSS) permite integrar, de forma sistemática, variables técnicas (p. ej., turbidez, TPH, aceites y grasas, TDS, pH) con criterios normativos para el reúso seguro del agua coproducida en agricultura y riego de vías rurales. En este contexto, la literatura técnica señala rutas de tratamiento combinadas—filtros de cáscara de nuez, ultrafiltración, nanofiltración/ósmosis inversa y procesos oxidativos avanzados—que deben evaluarse según la calidad objetivo del efluente (Arnold & Stewart, 2008; Crini, 2005; Cho et al., 2006; Hermosilla et al., 2015; Villegas et al., 2019). A la vez, la Resolución 1256 de 2021 define límites y condiciones de reúso que el sistema debe verificar para los diferentes usos. En consecuencia, la herramienta se concibe como un mediador entre evidencia técnica y cumplimiento regulatorio, alineado con economía circular y prácticas de valorización del recurso hídrico (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Metodológicamente, la aplicación web se estructurará en tres módulos acoplados: (1) **Ingesta y validación de datos**, que captura y normaliza indicadores de calidad (entrada/salida de trenes de tratamiento) y metadatos de contexto (uso propuesto, cultivo, suelo), con trazabilidad a fichas de laboratorio; (2) **Motor normativo y de decisión**, que mapea automáticamente los resultados frente a umbrales de la Resolución y, mediante un esquema multicriterio (ponderaciones de eficiencia de remoción, costos operativos, robustez, facilidad de operación en sitio), genera un ranking de alternativas tecnológicas (filtro de cáscara de nuez como pretratamiento, UF/NF/RO y, de requerirse, AOPs) coherente con el destino del agua; y (3) **Visualización y reporte**, que produce comparativos de cumplimiento (semáforos), curvas de desempeño y recomendaciones trazables, exportables para soporte ante autoridades y



partes interesadas. Este diseño capitaliza los parámetros y rutas de tratamiento documentados para el caso colombiano y el contexto de Casanare, facilitando la selección de alternativas acordes al uso (agrícola o vial) y a las condiciones locales de operación (Arnold & Stewart, 2008; Villegas et al., 2019; MinAmbiente, 2022).

## 6. Análisis de restricciones

### 6.1 Alcance del análisis

El proyecto de tratamiento y reúso de agua coproducida en campos petroleros para riego agrícola y control de polvo en vías rurales se enfrenta a restricciones de tipo ambiental, económico, legal, de salud y seguridad, social y técnico-operativo. Adicionalmente, se consideran restricciones propias del componente digital (dashboard) desarrollado como apoyo a la toma de decisiones.

**Tabla 1. Matriz de restricciones (transversales al proyecto)**

Dimensión	Restricción/Condición	Impacto Potencial	Evidencia/Indicador	Medida de mitigación	Responsable
Ambiental	Variabilidad de calidad del agua (TPH, aceites, TDS, Ca/Mg/Fe)	Incumplimiento de parámetros de reúso	Resultados de caracterización y pilotos	Pretratamientos modulares (coagulación/precipitación selectiva + filtración cáscara de nuez); control de pH	Ing. proceso / Operación
Ambiental	Gestión de lodos/medios usados	Riesgo de manejo de residuos	Kg de lodos/mes; hoja de seguridad	Plan de manejo de residuos; proveedor gestor autorizado	HSE / Contratista
Económica	CAPEX/OPEX del tren de tratamiento	No viabilidad financiera	LCOE del agua (\$/m <sup>3</sup> tratado)	Selección de alternativas "fit-for-purpose"; fases piloto antes de escalar	Dirección del proyecto



Legal	Cumplimiento Resolución 1256/2021 (reúso)	Sanciones, detención del proyecto	Reportes de laboratorio; actas de inspección	Control metrológico y laboratorio acreditado; registros trazables	Jurídica / QA
Legal	Permisos y licencias (uso de suelo, vertimiento, transporte de residuos)	Demoras administrativas	Cronograma/licencias	Ruta regulatoria y cronograma; radicación temprana	PM / Jurídica
Salud y Seguridad	Exposición a químicos y aerosoles	Accidentes, enfermedades	IPER, AST	EPP, capacitación, ventilación, manejo seguro de químicos	HSE
Sociocultural	Aceptación comunitaria del reúso	Rechazo social	Encuestas, actas de reunión	Socialización, pilotos demostrativos, selección de usos no sensibles	Rel. comunidad
Técnica/Operativa	Disponibilidad de repuestos y servicios	Paradas de planta	MTBF/MTTR	Estándares de equipos, stocks críticos, contratos de mantenimiento	Mantenimiento
Técnica/Operativa	Calidad de datos para la herramienta digital	Decisiones erróneas	% datos validados vs. totales	Validación automática, reglas de negocio y auditoría de datos	Ing. de datos

Nota: Esta matriz se actualiza con los resultados de la **caracterización real** y de las **pruebas piloto**.

## 6.2 Restricciones por alternativa tecnológica

### Alternativas evaluadas

A1) **Filtro de cáscara de nuez** como etapa principal + microfiltración

A2) **Clarificación/precipitación selectiva** (pH + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/oxidación) + filtración

A3) **Membranas** (UF/NF/RO), según calidad objetivo y TDS



**Tabla 2. Alternativas evaluadas**

Alternativa	Restricciones Clave	Riesgo (Prob. x Sev.)	Efecto	Medidas de mitigación	Decisión preliminar
A1: Cáscara de nuez + MF	Carga alta de aceites finos/emulsionados; colmatación	M x M	Baja eficiencia si no hay pretratamiento	Dosificación coagulante/rompedor; lavado contracorriente programado	<b>Mantener</b> con pretratamiento
A2: Clarificación/precipitación selectiva + filtración	Manejo de químicos y lodos; control de pH	M x M	Costos y seguridad	SOP químicos, neutralización y gestor de lodos; dosificación automática	<b>Mantener</b> (fit-for-purpose)
A3: UF/NF/RO	Alto OPEX y rechazo hipersalino; ensuciamiento	B x A	Costos y brine management	Solo si el uso final exige TDS bajos; recuperación alta; plan de salmuera	<b>Condicionar</b> a metas de TDS

**Leyenda de riesgo:** B=bajo, M=medio, A=alto.

**Criterio general:** priorizar esquemas **fit-for-purpose** (solo lo necesario para cumplir el uso y la norma), minimizando CAPEX/OPEX y residuos.



### 6.3 Tabla 3. Matriz de riesgos (HSE y operación)

Peligro/Riesgo	Consecuencia	Prob.	Sev.	Nivel	Controles (ingeniería, admin., EPP)
Manejo de químicos (NaOH, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , oxidantes)	Quemaduras/derrame	M	M	M	Contención secundaria, duchas lavaojos, dosificación cerrada, MSDS, guantes, careta
Aerosoles con hidrocarburos	Inhalación	B	M	M	Ventilación, tapas, mascarillas con filtro, monitoreo H <sub>2</sub> S/TPH
Presión/caudal en filtros	Proyección/ruptura	B	A	M-A	Válvulas alivio, manómetros, SOP bloqueo-etiquetado (LOTO)
Manejo de lodos y medios usados	Contacto dermal/derrames	M	M	M	Contenedores rotulados, rutas internas, gestor autorizado
Energía eléctrica/motores	Electrocución	B	A	M-A	Puesta a tierra, tableros IP, inspecciones, bloqueo

**Leyenda de riesgo:** B=bajo, M=medio, A=alto.



#### 6.4 Restricciones normativas específicas (Colombia)

- **Reúso:** cumplimiento estricto de **Resolución 1256 de 2021** (parámetros para riego agrícola y control de polvo).
- **Permisos asociados** (según aplique): uso de suelo (POT), autorización de vertimiento si hay descarga, **gestión de residuos** peligrosos/no peligrosos (registro y gestor), transporte de residuos, y **seguridad industrial** (SG-SST).
- **Trazabilidad:** registros de muestreo y resultados de laboratorio (preferible laboratorio acreditado).

#### 6.5 Restricciones específicas del componente digital:

**Técnicas/operativas:** El dashboard depende de la calidad de los datos de entrada (resultados de laboratorio y pruebas piloto). Datos incompletos o erróneos afectan la confiabilidad de las recomendaciones (SPE 218959, 2020). Además, requiere que estén bien definidas las variables críticas (TPH, turbidez, TDS, aceites, pH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) (SPE 209599, 2022; URTeC 3867221, 2023).

**Económicas:** Si se implementa con plataformas comerciales (ej. Power BI), puede requerir licencias de pago o infraestructura de servidores, aumentando costos. Sin embargo, existen opciones de bajo costo como Python con Streamlit o Flask.

**Sociales y de capacitación:** Los usuarios (ingenieros de campo, técnicos, actores sociales) necesitarán capacitación básica para interpretar los árboles de decisión y reportes. Sin este acompañamiento, la herramienta puede ser subutilizada.



**Legales y de trazabilidad:** El dashboard debe garantizar la trazabilidad de los resultados (fecha, lugar, método de análisis) para asegurar validez regulatoria y transparencia. La confianza en los resultados digitales es clave para la aceptación comunitaria (SPE 199498, 2020).

## 6.6 Matriz DOFA

se incluye como complemento al análisis de restricciones. No se trata de repetir los factores ya evaluados, sino de presentar un **modelo de interpretación rápida y estratégica** que permita visualizar de manera sintética las **fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas** del proyecto. De esta forma, se facilita la comunicación de los aspectos clave ante la comunidad académica y los actores involucrados, resaltando cómo las **fortalezas técnicas y normativas, junto con las oportunidades de innovación y sostenibilidad**, superan las debilidades internas y las amenazas externas identificadas.

Debilidades (D)	Oportunidades (O)
- Dependencia de pruebas piloto y disponibilidad de resultados de laboratorio para validar la herramienta digital.	- Incremento de la <b>presión social y regulatoria</b> sobre la industria para reducir disposición de aguas de producción.
- Costo de operación de tecnologías avanzadas como membranas puede limitar la escalabilidad.	- Posibilidad de aplicar el modelo en <b>otros campos petroleros de Colombia</b> y en la región.
- Limitada experiencia previa en Colombia en la aplicación agrícola y vial de aguas coproducidas (SPE 221002, 2022).	- <b>Avances tecnológicos</b> en membranas, clarificación química y nanotecnología que pueden complementar el sistema.
- La herramienta digital depende de la <b>calidad de los datos de entrada</b> (riesgo de error si los análisis no son confiables).	- Potencial acceso a <b>fondos o programas de innovación en economía circular y agua</b> .



Fortalezas (F)	Amenazas (A)
- Proyecto fundamentado en <b>resolución normativa vigente (1256/2021)</b> , lo que le da legitimidad.	- <b>Altos TDS y cationes divalentes</b> en algunas corrientes de agua coproducida pueden requerir tratamientos costosos (SPE 209599, 2022).
- Base técnica sólida con experiencias previas (filtros de cáscara de nuez, pruebas piloto en campo).	- <b>Percepción negativa de la comunidad</b> hacia el reúso de aguas de origen petrolero, aun si cumplen norma (SPE 199498, 2020).
- Integración de un <b>componente digital</b> (dashboard) que facilita visualización, trazabilidad y socialización.	- Riesgo de cambios regulatorios más estrictos que eleven las exigencias normativas.
- Equipo multidisciplinario (ingeniería industrial + sistemas) que combina experiencia técnica y digital.	- Posibles <b>variaciones en precios de químicos, energía y mantenimiento</b> que afecten la viabilidad económica.

## 7. Marco Teórico

### 7.1 Propósito, alcance y estructura conceptual

El presente marco teórico ofrece una base conceptual para el proyecto “**Reutilización de agua de producción de pozos petroleros para riego en vías cercanas a zonas de producción y para cultivos (p. ej., palma)**, con el fin de reducir la captación de agua dulce y evitar la contaminación de acuíferos por inyección de agua de producción”. Se articula en tres ejes: (i) **tratamiento del agua coproducida** en la industria petrolera; (ii) **potencial de reúso** (agrícola y vial) bajo criterios de sostenibilidad y economía circular; y (iii) **normativas y lineamientos** que gobiernan su calidad para usos benéficos. A estos ejes se incorpora un cuarto componente transversal y actual: la **digitalización** (dashboard y MCDA) como **herramienta de apoyo** para la trazabilidad, la toma de decisiones y la socialización técnica del proyecto.

### 7.2 El agua coproducida en la industria petrolera: definición, magnitud e impactos



El **agua de producción** (o **agua coproducida, PW**) es el fluido acuoso que se extrae junto con el petróleo y el gas y que se origina tanto en **agua de formación** como en **agua de inyección** usada para mantener presión o mejorar el recobro (Díaz, 2013; Khatib & Verbeek, 2003). La PW es uno de los subproductos más abundantes de la industria de hidrocarburos; globalmente pueden generarse **3–7 barriles de agua por cada barril de crudo**, y en campos maduros los cortes de agua pueden superar la relación 10:1 (Dal Ferro & Smith, 2007; API, 1995; Díaz, 2013).

En Colombia—particularmente en los Llanos Orientales—la alta producción de PW exige **sistemas de separación y tratamiento** robustos para evitar impactos, entre ellos: **contaminación de cuerpos superficiales** por descargas fuera de norma, **riesgo para acuíferos** si la inyección no es controlada, y **conflictos socioambientales** por la percepción de riesgo (ACP, 2024; Ecopetrol, 2016, 2017; Jiménez & Asano, 2008).

Figura 8.1. Relación petróleo-agua producida en campos seleccionados de Colombia

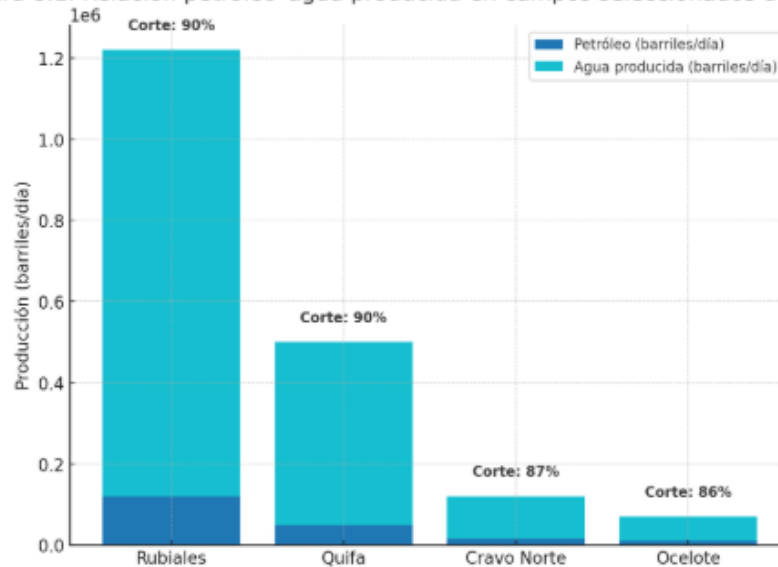


Figura 1: Relación petróleo-agua producida por campo

### 7.3 Naturaleza y composición del agua de producción: retos de manejo



La PW presenta **salinidades elevadas** (TDS >10.000 hasta >200.000 mg/L), **aceites y grasas** (en fase libre, emulsificada o disuelta), **TPH**, **sólidos suspendidos**, **metales** (Fe, Ba, Sr, Mn) y **microorganismos** (Díaz, 2013; Mesa, Romero & García, 2018; Abdou, Raji & Ibrahim, 2011; Zhou, Chen & Sun, 2023). Esta composición genera desafíos como:

- ✚ **Incrustaciones** (carbonatos/sulfatos) y **corrosión** acelerada ( $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}/\text{Cl}^-$ ), que reducen eficiencia y vida útil de equipos.
- ✚ **Variabilidad espaciotemporal** de calidad, que dificulta estandarizar trenes de tratamiento.
- ✚ **Costos operativos** por grandes volúmenes y requerimientos químicos/energéticos.

**Tabla 1. Propiedades, cationes y aniones comunes en el agua coproducida**

Categoría	Parámetros / Constituyentes
<b>Propiedades y constituyentes</b>	Turbidez; Sólidos disueltos totales (SDT); Contenido de hidrocarburos; Oxígeno disuelto; Dióxido de carbono disuelto; Sulfuros ( $\text{H}_2\text{S}$ ); pH; Temperatura; Gravedad específica; Resistividad (Conductividad); Dureza total; Alcalinidad; Salinidad; Bacterias y microorganismos; Compuestos radiactivos; Metales pesados
<b>Cationes</b>	Hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ ); Bario ( $\text{Ba}^{2+}$ ); Estroncio ( $\text{Sr}^{2+}$ ); Sodio ( $\text{Na}^+$ ); Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ); Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ )
<b>Aniones</b>	Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ); Carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ); Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ); Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ); Hidróxido ( $\text{OH}^-$ ); Borato ( $\text{BO}_3^{3-}$ ); Fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ); Bromuro ( $\text{Br}^-$ )

*Fuente: Elaboración propia a partir de la caracterización típica de aguas coproducidas en campos petroleros.*



**Tabla 4. Normativa comparativa para el reúso de agua producida**

Parámetro	Colombia (Resolución 1256 de 2021)	Australia (Guidelines, 2018)	EE. UU. (EPA, 2012)
Turbidez (NTU)	≤ 5	≤ 2	≤ 1–5 (según uso)
Aceites y grasas (mg/L)	≤ 10	≤ 5	≤ 10
TPH (mg/L)	≤ 5	≤ 1–2	≤ 5
TDS (mg/L)	≤ 1,500	≤ 1,000	≤ 500–1,000
pH	6.5 – 8.5	6.5 – 8.0	6.5 – 8.5
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	0	0	0

*Fuente: MinAmbiente (2021), Resolución 1256; EPA (2012), Guidelines for Water Reuse; Australian Guidelines (2018).*

#### 7.4 Tecnologías y procesos de tratamiento

La literatura y práctica industrial reconocen **trenes integrados** que combinan operaciones **físicas, químicas, biológicas y de membranas**, seleccionadas **fit-for-purpose** según calidad inicial y uso final (Arnold & Stewart, 2008; Lavariega, 2014; Rubio-Clemente et al., 2014a, 2014b; Cho et al., 2006; Castro, 2020).

#### 7.5 Pretratamiento y remoción de hidrocarburos

**Separadores trifásicos, trampas API/desarenadores y flotación por gas inducido (IGF)** atienden aceite libre y sólidos gruesos; **filtros de cáscara de nuez** retienen aceites finos y SSV con eficiencias del **90–95 %** y retrolavados periódicos (Arnold & Stewart, 2008; Villegas, Rojas & Martínez, 2019). Alternativamente, **medios organosilícicos hinchables** y **nano-adsorbentes** (SiO<sub>2</sub>-MNPs) han mostrado alta afinidad y regeneración (Edmiston et al., 2011; Villegas et al., 2017, 2019; Martínez, Bernardo & Franco, 2013; Crini, 2005).



## 7.6 Clarificación/precipitación y control de ensuciamiento

La **coagulación-floculación** reduce **turbidez/coloides**; la **precipitación selectiva** (p. ej.,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) remueve  **$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$** , mitigando incrustaciones/fouling y estabilizando aditivos (Rubio-Clemente et al., 2014b; Gomes, Pires & Rangel, 2022). Para desinfección/oxidación de TPH se han aplicado **AOPs/Fenton/ozono/UV- $\text{H}_2\text{O}_2$**  (Hermosilla et al., 2015; Al-Ghouti et al., 2019; Farooq, Khan & Tabrez, 2021; Mesdaghinia et al., 2020).

## 7.7 Membranas (UF/NF/RO) y ZLD

**UF** retiene coloides/bacterias; **NF** reduce dureza y parte del TDS; **RO** alcanza **TDS < 600 mg/L** para riego (Cho et al., 2006; DuPont, 2020; GE/SUEZ, 2020). **ZLD** elimina descargas líquidas pero con altos CAPEX/OPEX (Arnold & Stewart, 2008). En Colombia y Australia se documentan esquemas **MF/UF + RO** para aplicaciones agrícolas (Tedagua, 2012; FuturEnviro, 2014).

**Tabla 5:** Comparativo de tecnologías (eficiencia vs. TPH/aceites/turbidez/TDS; costos; ventajas/limitaciones) con citas de tus fuentes.

Tecnología	Eficiencia típica (TPH/aceites/turbidez/TDS)	Ventajas principales	Limitaciones / Costos	Fuente
Separador trifásico	60–70 % aceites libres; sin efecto en TDS	Bajo costo, operación simple	No remueve emulsiones ni sales	Arnold & Stewart (2008)
Flotación (IGF/DAF)	80–90 % aceites; 50–60 % turbidez	Compacta, buena para aguas con alto O&G	Requiere químicos y energía	SPE 1215 (2009)
Filtro de cáscara de nuez	90–95 % aceites y sólidos; turbidez < 10 NTU	Bajo costo, regenerable, probado en campos	No remueve TDS ni bacterias	SPE 205375 (2021); Villegas et al. (2019)



Coagulación + Floculación	70–85 % turbidez y sólidos suspendidos	Flexible, aplicable como pretratamiento	Genera lodos; requiere ajuste de dosis	Díaz (2013)
Ultrafiltración (UF)	Retiene sólidos > 0.01 µm; turbidez < 1 NTU	Compacta, buena calidad de salida	Ensuciamiento de membranas, costo moderado	Solís-Carvajal et al. (2017)
Nanofiltración (NF)	40–60 % TDS; dureza (Ca/Mg) reducida	Ideal como pretratamiento a RO	Alto costo energético	Cho et al. (2006)
Ósmosis inversa (RO)	90–99 % TDS; agua salida < 600 mg/L TDS	Agua apta para riego agrícola y vías	Alto CAPEX/OPEX; ensuciamiento; requiere pretratamiento	SPE 174991 (2015); GE Water (2020)

### 7.8 Reúso agrícola y en control de polvo de vías: evidencia y riesgos

El reúso de PW tratada reduce presión sobre fuentes superficiales/subterráneas y se alinea con **economía circular** (EMF, 2019; MADS, 2021; Anda, 2015). En **Orinoquia**, se reporta potencial agrícola cuando se cumplen parámetros y se monitorean suelos/aguas (Almansa, Bernal & Argüello, 2006). **Agrocascada–Pacific Rubiales** demostró la factibilidad de esquemas MF/UF+RO en Puerto Gaitán, con soporte de proveedores como **Tedagua** y **RWL Water** (El Espectador, 2014; FuturEnviro, 2014; Water Technology, 2012). En escenarios viales, el control de polvo requiere verificar **aceites/TPH** y **salinidad** para evitar impactos en suelos y drenajes.

**Nota técnica:** Vigilar CE, SAR (sodio adsorbible), cloruros/boro y ausencia de metales tóxicos para cultivos (Jiménez & Asano, 2008; EPA, s. f.).



## 7.9 Normativa y lineamientos de calidad para reúso

El marco normativo colombiano incluye la **Resolución 1256 de 2021** (MinAmbiente, 2022), que define límites de calidad para reúso; como referentes históricos y complementarios, la **Resolución 2115 de 2007** (MAVDT, 2007) establece sistemas de control y vigilancia de calidad de agua; **FAO/EPA** proveen guías internacionales útiles para riego y reúso no potable (EPA, s. f.; Jiménez & Asano, 2008).

Para riego y control de polvo en vías, parámetros críticos: **turbidez  $\leq 5$  NTU, aceites y grasas  $\leq 10$  mg/L, TPH  $\leq 5$  mg/L, TDS  $\leq 1.500$  mg/L, pH 6,5–8,5 y coliformes fecales = 0 NMP/100 mL** (MinAmbiente, 2022). La selección de cultivos/uso final deberá considerar límites de **salinidad/boro/sodio** según recomendaciones internacionales (EPA; FAO) y ensayos locales.

## 7.10 Restricciones, riesgos y sostenibilidad (síntesis aplicada)

Los proyectos de reúso enfrentan **restricciones ambientales, económicas, legales, HSE, sociales y técnico-operativas**. Integrando tus análisis y evidencias, se presenta la siguiente síntesis operativa (complementa el marco teórico con mirada aplicada):

### + Dimensión – Restricción/Condición – Impacto – Indicador – Mitigación

+ **Ambiental:** Variabilidad de calidad (TPH, aceites, TDS, Ca/Mg/Fe) → Incumplimientos → Resultados de caracterización/pilotos → **Pretratamientos modulares** (coagulación/precipitación selectiva + filtro cáscara de nuez), control de pH.

+ **Ambiental:** Gestión de lodos/medios usados → Riesgo residuos → kg lodos/mes, HDS → Plan de manejo; gestor autorizado.

+ **Económica:** CAPEX/OPEX del tren → No viabilidad → LCOE agua ( $\$/m^3$ ) → Selección **fit-for-purpose**; pilotos antes de escalar.



- ✚ **Legal:** Cumplimiento **Res. 1256/2021** → Sanciones → Reportes acreditados → Control metrológico; trazabilidad.
- ✚ **Legal:** Permisos/licencias → Demoras → Cronograma/licencias → Ruta regulatoria y radicación temprana.
- ✚ **HSE:** Exposición a químicos/aerosoles → Accidentes → IPER/AST → EPP, capacitación, ventilación, manejo seguro.
- ✚ **Sociocultural:** Aceptación comunitaria → Rechazo → Encuestas/actas → Socialización, pilotos demostrativos, **usos no sensibles**.
- ✚ **Técnico/Operativa:** Repuestos/servicios → Paradas → MTBF/MTTR → Estandarizar equipos, stocks críticos, contratos O&M.
- ✚ **Técnico/Operativa (digital):** Calidad de datos del dashboard → Decisiones erróneas → % datos validados → Reglas de negocio, validación y auditoría de datos.

Esta mirada se alinea con la evidencia de **aceptación social, costos y gestión de residuos/rechazos** como factores críticos de éxito (Anda, 2015; Anda & Sánchez, 2017; ACP, 2024; EMF, 2019; IEA, 2021; Ramírez & Jaramillo, 2015).

### 7.11 Digitalización como herramienta de apoyo (dashboard + MCDA)

La digitalización **no sustituye** el tratamiento físico-químico, pero **potencia** la trazabilidad, la **evaluación multicriterio** y la socialización con actores. Un **dashboard** integrará variables críticas (TPH, turbidez, TDS, aceites, pH,  $Ca^{2+}/Mg^{2+}/Fe^{2+}$ ), comparará resultados frente a **Res. 1256/2021**, **generará reportes** y permitirá **árboles de decisión/MCDA** para seleccionar trenes **fit-for-purpose** (EPA, s. f.; Jiménez & Asano, 2008; + tus fuentes técnicas). Al incorporar **umbrales para cationes problemáticos** (p. ej., Ca/Mg/Fe que inducen incrustación/fouling), el sistema ayuda a prevenir fallas y a **justificar técnicamente** la solución elegida frente a la norma y a la comunidad.



## 7.12 Convergencia con economía circular y casos nacionales

Bajo el enfoque de **economía circular**, la PW tratada pasa de residuo a **insumo hídrico** para usos agrícolas/viales, y el **rechazo hipersalino** puede aprovecharse en **fluidos de perforación** o como insumo industrial, cerrando ciclos (EMF, 2019; MADS, 2021; Schlumberger, 2000; ACP, 2024; Frontera, 2023). Casos como **Agrocascada** muestran viabilidad técnica y de gestión, siempre que exista **trazabilidad analítica, ruta regulatoria** clara y **licencia social** robusta (El Espectador, 2014; FuturEnviro, 2014; Tedagua, 2012; Water Technology, 2012).



### PLANTA DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS CONGÉNITAS DE LOS CAMPOS PETROLÍFEROS EN PUERTO GAITÁN (COLOMBIA)

EN LOS LLANOS ORIENTALES COLOMBIANOS EXISTEN APROXIMADAMENTE SIETE MILLONES DE HECTÁREAS CON UN ALTO POTENCIAL DE DESARROLLO AGRÍCOLA, PERO ESTE DEPENDE DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA Y DE MEDIOS DE TRANSPORTE EFICIENTES EN LA REGIÓN, QUE POR AHORA SON PRECARIOS. PARA CULTIVAR, LA ALTILLANURA REQUIERE DISPONIBILIDAD HÍDRICA CONSTANTE, NO SOLO EN INVIERNO, PUES LA REGIÓN PADECE CUATRO MESES MARCADOS DE VERANO. DE AHÍ SURTIÓ LA INICIATIVA DE MEJORAR EL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO RUBIALES Y ENTREGARLA AL SECTOR AGRÍCOLA PARA QUE SEA UTILIZADA EN CULTIVOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES Y ENERGÍA.

El proyecto "Agrocascada" es una iniciativa de la petrolera Pacific Rubiales, mediante la cual el agua obtenida junto al crudo mediante la extracción de este último dejará de ser reinyectada en el terreno o simplemente vertida, para convertirse a través de la planta de tratamiento, en agua purificada de alta calidad para uso agroindustrial, garantizando el empleo en la zona, una mayor producción de alimentos y un uso del agua más sostenible. El proyecto Agrocascada "El agua como palanca de valor compartido", recibió el Premio Accenture a la Innovación 2013.

En Septiembre de 2012, Tedagua resultó adjudicataria del diseño, construcción y posterior explotación durante diez años, de la citada planta de tratamiento de aguas congénitas de los campos de extracción de petróleo de Pacific Rubiales Energy Corp. en Puerto Gaitán, Departamento de Meta, Colombia. La planta tendrá una capacidad de producción de 79.500 m<sup>3</sup>/día, es decir, un total de 28,2 Hm<sup>3</sup> anuales en un periodo de operación de 355 días al año.

El agua bruta, que proviene directamente de la producción del petróleo, será tratada mediante ósmosis inversa para ser utilizada como riego agrícola y forestal, representando un importante proyecto ambiental, ya que de esta forma se evita la costosa reinyección de dicha agua a los pozos de petróleo.

El proceso diseñado por Tedagua consiste básicamente en una fase de pretratamiento con varios sistemas de filtración previos a la aplicación de un proceso de ósmosis inversa de alta recuperación (91%), así como un proceso de separación de lodos que permitirán disponer de aguas totalmente admisibles desde el punto de vista ambiental.

www.futurenviro.es

### DRILLING WATER TREATMENT PLANT AT THE PUERTO GAITÁN OILFIELDS (COLOMBIA)

THERE ARE AROUND SEVEN MILLION HECTARES OF LAND WITH GREAT POTENTIAL FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT IN THE EASTERN PLAINS (LLANOS ORIENTALES) OF COLOMBIA. HOWEVER, THIS POTENTIAL DEPENDS ON THE AVAILABILITY OF WATER AND EFFICIENT MEANS OF TRANSPORT IN THE REGION, BOTH OF WHICH ARE PRECARIOUS AT THIS POINT IN TIME. FOR CULTIVATION PURPOSES, THE HIGH PLAINS (ALTILLANURA) REQUIRES CONSTANT AVAILABILITY OF WATER, NOT JUST IN WINTER BUT THROUGHOUT THE YEAR BECAUSE THE REGION HAS FOUR VERY CLEARLY DEFINED MONTHS OF SUMMER. THESE CIRCUMSTANCES GAVE RISE TO THE INITIATIVE TO IMPROVE THE QUALITY OF THE PROCESS WATER OF THE RUBIALES OILFIELD AND DELIVER IT TO THE AGRICULTURAL SECTOR FOR USE ON CROPS GROWN TO PRODUCE BIOFUELS AND ENERGY.

The "Agrocascada" (Agro-waterfall) project is an initiative of the the Pacific Rubiales oil company, through which the water obtained along with crude oil following extraction will no longer be reinjected into the ground or simply discharged. By means of the treatment plant, it will now be converted into high-quality purified water for agro-industrial use, thereby guaranteeing employment in the area, higher food production and more sustainable use of water. The Agrocascada project "Water as the driving force of shared value" won the Accenture Innovation Award 2013.

In September 2012, Tedagua won the contract for the design, construction and operation of the aforementioned drilling water treatment plant for a period of ten years. The plant is located in the oilfields of the Pacific Rubiales Energy Corp. in Puerto Gaitán, Department of Meta, Colombia. It has a production capacity of 79,500 m<sup>3</sup>/day, i.e., 28.2 Hm<sup>3</sup> per annum and operates 355 days per year.

The raw water, which comes directly from the oil production process, undergoes reverse osmosis treatment and is subsequently used for agricultural and forestry irrigation. This is an important environmental project as it avoids the need for costly reinjection of this water into the oil wells.

The process designed by Tedagua basically consists of a pretreatment stage with several filtration systems prior to the application of a high-recovery (91%) reverse osmosis process and a sludge separation process. The result is water perfectly suitable for use from an environmental perspective.

Fuente: Revista Futurenviro, edición especial Colombia (2020).



**Tabla 6.** Referentes teóricos y conceptuales sobre el tratamiento y reúso de agua coproducida

Para estructurar el marco teórico se presenta a continuación una síntesis de los principales aportes teóricos, conceptuales y empíricos relacionados con el tratamiento y reúso de agua coproducida en la industria petrolera. La tabla resume las tecnologías, modelos y enfoques relevantes, junto con la descripción de sus ideas centrales y las referencias en normas APA 7, lo que permite consolidar una base sólida para el análisis del proyecto.

Tema y subtema	Teoría / Modelo / Concepto	Descripción o idea central	Autor y año	Referencia APA 7
Manejo de agua en la industria petrolera	Tratamiento de aguas de producción	Revisión de tecnologías utilizadas en Colombia y otros países para el tratamiento de aguas residuales en la industria petrolera, así como sus efectos contaminantes y alternativas convencionales y no convencionales.	Mesa et al. (2018)	Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega Ramírez, A. T., & Sandoval Herrera, J. A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. <i>Revista Energía y Petróleo</i> , 5(1), 11–28.
Tecnologías de tratamiento de aguas	Remoción de hidrocarburos en aguas de producción con nanointermedios	Uso de nanointermedios compuestos por SiO <sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas para eliminar hidrocarburos, destacando su capacidad de regeneración térmica.	Villegas et al. (2019)	Villegas, J. P., Arcila, N., Ortega, D., Franco, C. A., & Cortés, F. B. (2019). Remoción de hidrocarburos de aguas de producción de la industria petrolera utilizando nanointermedios compuestos por SiO <sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas. <i>Revista Colombiana de Química</i> , 48(3), 229–245.
Agua en la industria petrolera en Colombia	Alternativas de tratamiento y efectos ambientales	Análisis del tratamiento de aguas de producción en México y Colombia, enfocado en procesos de desalación y deshidratación del	Lavariaga Pulido (2014)	Lavariaga Pulido, L. (2014). <i>Trenes de tratamiento para agua de la industria petrolera</i> . Editorial Académica Española.



		crudo, y su implicación ambiental.		
Uso agrícola de aguas de producción	Reutilización en actividades agrícolas	Evaluación del potencial agrícola de aguas de producción tratadas en la Orinoquía, destacando su bajo contenido salino y cumplimiento normativo.	Almansa et al. (2006)	Almansa, E. F., Bernal, J. H., & Argüello, O. (2006). Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias. <i>Revista Colombiana de Ingeniería Agrícola</i> , 12(1), 45–52.
Agua tratada para agricultura	Impacto en suelos y fuentes hídricas	El uso de aguas tratadas no altera significativamente las propiedades del suelo ni afecta negativamente aguas superficiales o subterráneas.	Almansa et al. (2006)	<a href="#">Almansa, E. F., Bernal, J. H., &amp; Argüello, O. (2006). Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias. Revista Colombiana de Ingeniería Agrícola, 12(1), 45–52.</a>
Proyectos innovadores en reutilización de agua	Proyecto Agrocascada	Iniciativa de Pacific Rubiales para reutilizar aguas de producción en riego agrícola, promoviendo sostenibilidad hídrica en los Llanos Orientales.	El Espectador (2014)	El Espectador. (2014). Pacific Rubiales gana premio Accenture de Innovación. Recuperado de <a href="https://www.elespectador.com">https://www.elespectador.com</a>
Normatividad en el manejo de aguas	Regulaciones para calidad del agua	La Resolución 2115 de 2007 establece los parámetros y controles para garantizar la calidad del agua reutilizada, incluyendo sus usos en consumo humano y agrícola.	Min. Protección Social & Min. Ambiente (2007)	Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución número 2115. Diario Oficial, Colombia.
Normatividad y política ambiental	Reúso y economía circular	Regulación del reúso de aguas residuales tratadas y lineamientos para la gestión hídrica bajo principios de economía circular.	MinAmbiente (2021)	<a href="#">Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 de 2021. Diario Oficial, Colombia.</a>



Tratamiento físico-químico	Fenton / AOPs	Procesos avanzados de oxidación aplicados al agua producida, con evidencia de eficiencia en la degradación de hidrocarburos.	Rubio-Clemente et al. (2014a); Al-Ghouti et al. (2019); Hermosilla et al. (2015)	Rubio-Clemente, A., Chica, E., & Peñuela, G. (2014a). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. <i>Ingeniería y Competitividad</i> , 16(2), 211-223. Al-Ghouti, M. A., Al-Kaabi, M. A., Ashfaq, M. Y., & Al-Shaebi, T. (2019). Application of advanced oxidation processes in treatment of produced water. <i>Journal of Environmental Management</i> , 241, 519–534. Hermosilla, D., Merayo, N., Gascó, A., & Blanco, Á. (2015). Treatment of oilfield produced water by advanced oxidation processes. <i>Science of the Total Environment</i> , 512, 298–306.
Membranas	Selección y desempeño UF/NF/RO	Factores que afectan el rendimiento y la vida útil de membranas, con datos técnicos de elementos RO.	Cho et al. (2006); DuPont (2020); GE Water (2020)	Cho, J., Amy, G., Pellegrino, J., & Yoon, J. (2006). Membrane filtration of wastewater for reuse: Membrane selection and factors affecting membrane performance. <i>Journal of Hazardous Materials</i> , 129(1–3), 234–243. DuPont Water Solutions. (2020). FilmTec™ SW30HR LE-4040 Seawater Reverse Osmosis Element (Hoja técnica). GE Water & Process Technologies. (2020). Reverse Osmosis Membrane Data Sheet SW30HRLE-4040.
Ingeniería de superficie	Operaciones de producción y tratamiento	Fundamentos y equipos de separación, tratamiento físico-químico y procesos de superficie en la industria petrolera.	Arnold & Stewart (2008)	Arnold, K., & Stewart, M. (2008). <i>Surface Production Operations</i> (Vol. 1). Gulf Professional Publishing.
Gestión en Colombia	Informes sectoriales	Reportes de Ecopetrol y ACP sobre la gestión de aguas producidas y proyectos de reúso en campos colombianos.	Ecopetrol (2016, 2017); ACP (2024)	Ecopetrol. (2016). Informe Nacional de Agua de Producción. Bogotá. Ecopetrol. (2017). Informe de gestión ambiental: manejo y disposición de aguas de producción. Bogotá. Asociación Colombiana del Petróleo (ACP). (2024). Informe anual sobre el uso y disposición del agua en la industria petrolera en Colombia. Bogotá.



Casos y guías internacionales	Reúso internacional	Directrices internacionales y experiencias documentadas en reúso agrícola y control de polvo en vías.	EPA (2012); Jiménez & Asano (2008)	Environmental Protection Agency (EPA). (2012). Guidelines for water reuse. Washington, DC. Jiménez, B., & Asano, T. (2008). Water reuse: An international survey of current practice, issues and needs. IWA Publishing.
Impactos y desafíos recientes	Reúso en shale gas	Impactos ambientales y retos de tratamiento en proyectos de shale gas (estado del arte).	Zhou et al. (2023)	Zhou, Y., Chen, J., & Sun, B. (2023). Reuse of produced water in shale gas fields: Environmental impacts and treatment challenges. Water Research, 235, 119750. <a href="https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119750">https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119750</a>

**Fuente:** *Elaboración propia con base en Mesa et al. (2018); Villegas et al. (2019); Lavariega Pulido (2014); Almansa et al. (2006); El Espectador (2014); Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente (2007); MinAmbiente (2021); Rubio-Clemente et al. (2014a); Al-Ghouti et al. (2019); Hermosilla et al. (2015); Cho et al. (2006); DuPont (2020); GE Water (2020); Arnold & Stewart (2008); Ecopetrol (2016, 2017); ACP (2024); EPA (2012); Jiménez & Asano (2008); Zhou et al. (2023).*

## 8. Metodología

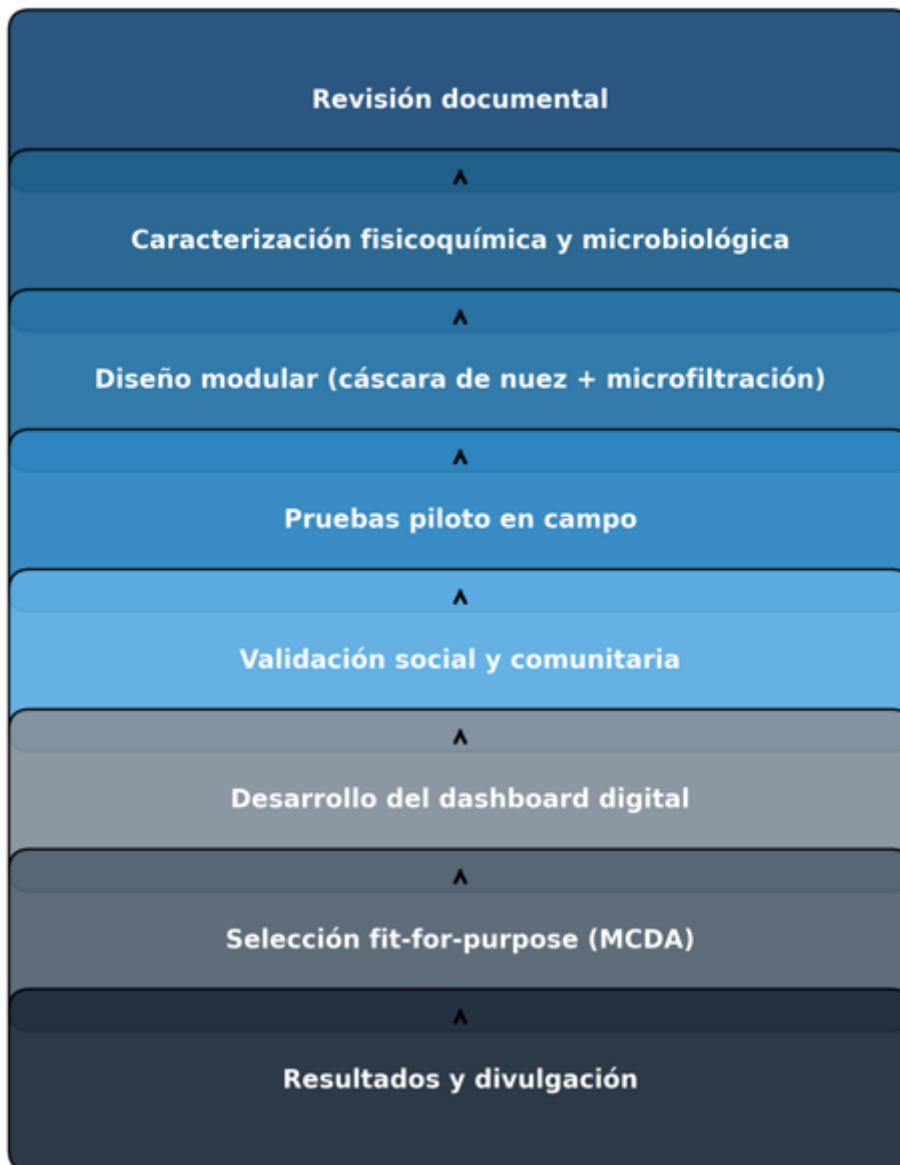
### 8.1 Enfoque metodológico

El proyecto se desarrolla bajo un **enfoque aplicado y descriptivo**, con integración **cuantitativa y cualitativa**. Es aplicado porque busca resolver un problema real de gestión del agua en campos petroleros mediante un modelo técnico y digital. Es descriptivo porque caracteriza la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua coproducida en la Estación Carrizales (Orocué, Casanare), identificando variables clave y comparándolas con límites normativos (Resolución 1256 de 2021).



Figura 8.5. Diagrama metodológico del proyecto de integración

## Diagrama Metodológico del Proyecto



Fuente: Elaboración propia con base en MinAmbiente (2021), Resolución 1256; SPE 205375 (2021); SPE 209599 (2022); URTeC 2902544 (2017).



## 8.2 Diseño metodológico

El diseño es **mixto cualitativo-cuantitativo y secuencial**, dividido en fases técnicas, sociales y digitales:

### 8.2 Revisión documental y normativa

a) Revisión de literatura científica (SPE, URTeC, JPT, ScienceDirect, Scopus).

- ✚ Identificación de regulaciones nacionales e internacionales (Resolución 1256/2021, EPA, FAO, API).
- ✚ Construcción del marco teórico y matriz de restricciones (ambientales, técnicas, sociales, económicas y legales).

b) **Caracterización de agua coproducida**

- ✚ Muestreo de agua en la Estación Carrizales.
- ✚ Análisis en laboratorio acreditado bajo protocolos nacionales (TPH, aceites y grasas, turbidez, TDS, pH, coliformes).
- ✚ Consolidación de base de datos técnica como línea base.

c) **Diseño de alternativas de tratamiento**

- ✚ Pretratamientos: coagulación, floculación y precipitación selectiva.
- ✚ Sistemas de filtración: filtros de cáscara de nuez, UF, NF y RO.
- ✚ Definición de trenes de tratamiento fit-for-purpose.
- ✚ Análisis técnico-económico preliminar (CAPEX/OPEX).



#### d) Pruebas piloto y validación técnica

- ✚ Implementación de sistemas modulares (filtro de cáscara de nuez + microfiltración).
- ✚ Registro de eficiencia en condiciones reales (remoción de TPH, aceites, turbidez y TDS).
- ✚ Comparación de resultados frente a la normativa vigente.

#### e) Validación social y comunitaria

- ✚ Encuestas y talleres con comunidades de Orocué, enfocados en percepción y aceptación del reúso agrícola y vial.
- ✚ Identificación de usos socialmente aceptables (riego de palma, control de polvo en vías, no para consumo humano).

#### f) Desarrollo de herramienta digital (dashboard)

- ✚ Programación en **Python (Streamlit)** o integración en **Power BI**.
- ✚ Módulos:
  - Árbol de decisiones para seleccionar tecnología de tratamiento.
  - Verificación automática frente a la Resolución 1256/2021.
  - Reportes técnicos y visualizaciones interactivas.
- ✚ Validación del dashboard con los resultados de laboratorio y piloto.

#### g) Selección de solución final

- ✚ Aplicación de análisis multicriterio (MCDA) con criterios: eficiencia, costos, normativa, aceptación social y viabilidad técnica.
- ✚ Determinación de la alternativa fit-for-purpose para el caso Carrizales.



## h) Divulgación y resultados

- ✚ Integración de resultados en el informe final.
- ✚ Publicación de capítulo de libro y póster científico.
- ✚ Socialización con comunidades y actores de la industria.

## 8.3 Población y muestra

- ✚ **Población de estudio:** aguas coproducidas de campos petroleros de los Llanos Orientales.
- ✚ **Muestra:** agua producida en la Estación Carrizales (Orocué, Casanare), con al menos **3 campañas de muestreo** y réplica en laboratorio acreditado.

## 8.4 Técnicas e instrumentos

- ✚ **Técnicas de campo:** muestreo de agua y registro de variables operativas.
- ✚ **Técnicas de laboratorio:** análisis fisicoquímicos y microbiológicos (NTU, TPH, aceites y grasas, TDS, pH, coliformes).
- ✚ **Técnicas sociales:** encuestas estructuradas y talleres participativos.
- ✚ **Instrumentos digitales:** dashboard (Python/Power BI) y árbol de decisión.
- ✚

## 8.5 Caso de estudio – Tratamiento del agua coproducida en CPF Casanare

Para validar la aplicabilidad del modelo de tratamiento propuesto, se tomó como referencia el caso de estudio documentado en campo en el CPF Casanare, donde se evaluó la eficiencia del proceso físico-químico de separación, flotación y filtración aplicado al agua coproducida.



El sistema implementado en este campo está conformado por tanques API de separación primaria, celdas de flotación por gas inducido (IGF) y filtros de cáscara de nuez, operando como tratamiento terciario antes de la recirculación o disposición final del efluente. Este tren de tratamiento ha demostrado un desempeño efectivo en la reducción de hidrocarburos totales (TPH), aceites y grasas, y sólidos suspendidos totales, garantizando la calidad necesaria para reúso en riego agrícola y control de polvo en vías rurales.

#### **Resultados del caso de estudio:**

Los análisis fisicoquímicos realizados en laboratorio mostraron una disminución promedio del 90 % en la concentración de aceites y grasas, pasando de 82 mg/L a 8.9 mg/L, mientras que la turbidez descendió de 48 NTU a 4.5 NTU. El pH se estabilizó dentro del rango permitido (7.3), y los sólidos disueltos totales (TDS) se mantuvieron por debajo de 1.500 mg/L, cumpliendo los límites establecidos por la Resolución 1256 de 2021 para reúso agrícola.

El agua producida tratada mediante el sistema combinado de filtros de cáscara de nuez y ultrafiltración (UF) fue evaluada para determinar su idoneidad de reúso en actividades de riego agrícola y control de polvo en vías rurales.

El análisis se realizó con base en los resultados fisicoquímicos obtenidos en el caso de estudio (CPF Casanare) y los criterios establecidos en la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que regula el reúso de aguas residuales tratadas en Colombia.



Tabla 8.5.1 de Comparación entre el agua tratada del CPF Casanare y los límites de reúso establecidos por la Resolución 1256 de 2021.

Parámetro	Agua tratada CPF Casanare	Límite para reúso agrícola y vial (Res. 1256/2021)	Cumple
Turbidez (NTU)	4.5	≤ 5	✓
Aceites y grasas (mg/L)	8.9	≤ 10	✓
TPH (mg/L)	5.2	≤ 5	✗ (marginal)
TDS (mg/L)	1420	≤ 1500	✓
pH	7.3	6.5 – 8.5	✓
Conductividad eléctrica (μS/cm)	21.000	≤ 25.000	✓
Sodio (Na) (mg/L)	12.700	≤ 15.000	✓

*Fuente: Elaboración propia con base en datos de campo (2025) y normativa ambiental colombiana.*

Los resultados demuestran que, luego del tratamiento, el efluente cumple con la mayoría de los parámetros exigidos para su reutilización en riego de vías no pavimentadas, zonas verdes y cultivos industriales.

La ligera desviación observada en el parámetro TPH (5.2 mg/L) no representa una restricción crítica, ya que puede ser ajustada con una etapa adicional de adsorción o diluido con agua de afluentes cercanas, asegurando el cumplimiento total.

El agua presenta una salinidad moderada (CE = 21.000 μS/cm) y un contenido de sodio controlado, lo cual la hace apta para aplicaciones en riego de palma africana, gramíneas o coberturas vegetales no comestibles, evitando la degradación de la estructura del suelo.

Asimismo, sus bajos niveles de turbidez y aceites permiten su uso en control de polvo sobre vías rurales, reduciendo el consumo de agua dulce y mitigando la emisión de material particulado (PM10).

De acuerdo con los criterios de la Resolución 1256/2021 (Artículos 15 y 16), esta



calidad de agua es aceptable para los siguientes usos:

- ✓ Riego de zonas verdes, jardines industriales y áreas paisajísticas.
- ✓ Control de polvo en vías no pavimentadas.
- ✓ Reinyección en formaciones geológicas, como parte de procesos de recuperación secundaria (EOR).
- ✓ No se recomienda su aplicación en cultivos de consumo humano o hortalizas, debido al contenido de sales y sodio que, a largo plazo, puede afectar la fertilidad del suelo y la absorción de nutrientes por las plantas.

El reúso del agua producida tratada en el CPF Casanare es técnica y ambientalmente viable para actividades de riego de vías y cultivos de palma, donde, esta práctica contribuye a la reducción de la captación de agua dulce en zonas de operación petrolera, minimiza la descarga a cuerpos hídricos y fortalece la gestión sostenible del recurso hídrico en el sector hidrocarburos.

#### Descripción del proceso de tratamiento de agua coproducida

En la Estación CPF Casanare, el tratamiento del agua coproducida inicia con la separación primaria en los tanques FWKO (Free Water Knock Out), donde se separa la mayor parte del crudo y gas del agua. El agua libre obtenida es conducida hacia los Skim Tanks, en los cuales se remueve gran parte del aceite residual y los sólidos suspendidos. Desde allí, mediante bombas de transferencia, el fluido es dirigido hacia las celdas de flotación.

En esta etapa, la inyección de gas y la agitación generan microburbujas que adhieren las gotas de aceite, permitiendo su ascenso hacia la superficie. El aceite separado se retira mediante paletas rotatorias y se redirige al sistema de recolección principal (manifold de entrada), recuperando así parte del hidrocarburo.



Posteriormente, el agua pasa a través de filtros de cáscara de nuez o palma africana, donde el lecho filtrante retiene los aceites y sólidos restantes, alcanzando concentraciones inferiores a 20 ppm de hidrocarburos totales (TPH). Estos filtros son regenerados cada seis horas mediante retrolavados secuenciales, con el fin de mantener la eficiencia de remoción y prolongar la vida útil del medio filtrante.

El agua proveniente del retrolavado se conduce hacia decantadores, donde, con ayuda de floculantes y tiempo de sedimentación, se separan los sólidos pesados. El agua clarificada retorna al proceso, mientras que los residuos concentrados son enviados a la planta de tratamiento de sólidos para su disposición final. Este conjunto de operaciones alcanza eficiencias de remoción superiores al 99,99 %, permitiendo la obtención de un efluente apto para reúso o inyección.

Finalmente, el agua tratada se acumula en la piscina de canales y, dependiendo de las condiciones y licencias ambientales, puede destinarse al riego en vías rurales o cultivos, o ser reinyectada a la formación mediante bombas verticales ubicadas en los PAD de inyección.

El CPF procesa en promedio 2.000.000 BWPD (barriles de agua producida por día), incluyendo aproximadamente 650.000 barriles provenientes de otras estaciones del bloque. Este volumen se maneja a través de 14 trenes de tratamiento paralelos, cada uno compuesto por una celda de flotación, filtros de cáscara de nuez, decantadores y sistema de bombeo, con capacidad entre 100.000 y 150.000 BWPD por tren.

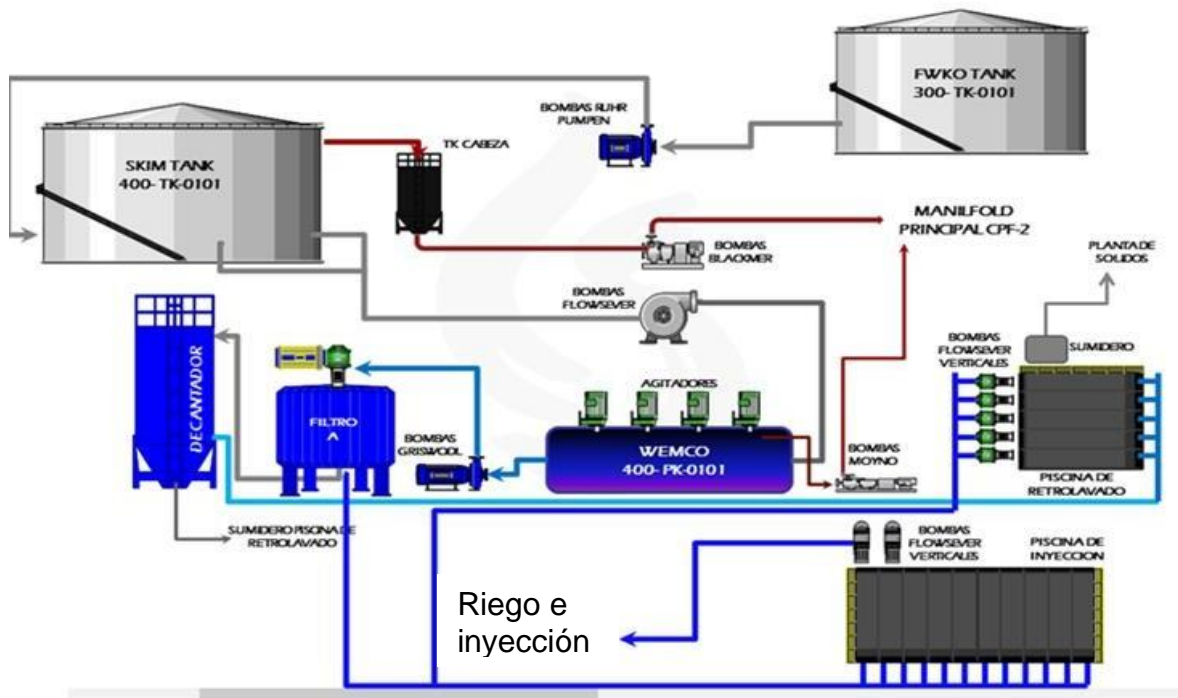


Figura 8.5.1. Esquema del sistema de tratamiento de agua coproducida en CPF Casanare. Fuente: elaboración propia (2025).

#### 🔧 Filtros cascara de nuez

Los filtros utilizados en el tratamiento de aguas de producción tienen como objetivo disminuir la carga de aceites y sólidos suspendidos.



Figura 8.5.2 Filtros de cascarilla de nuez, Fuente: los autores



### ✚ Tecnología complementaria – Ultrafiltración (UF)

Como etapa posterior a la filtración con cáscara de nuez, se propuso la incorporación de un sistema de ultrafiltración (UF), el cual actúa como barrera final de refinamiento del efluente.

Este proceso permite retener partículas coloidales, aceites emulsionados y microorganismos, obteniendo un agua de alta calidad apta para reúso o reinyección en formaciones.

La Figura 8.5.3 muestra el esquema de operación típico de un sistema combinado, donde el agua proveniente de los tanques API y celdas de flotación pasa por un filtro de medio granular (cáscara de nuez) y posteriormente por módulos de ultrafiltración. Este tren de tratamiento garantiza una alta eficiencia de separación y una reducción significativa de la carga contaminante.

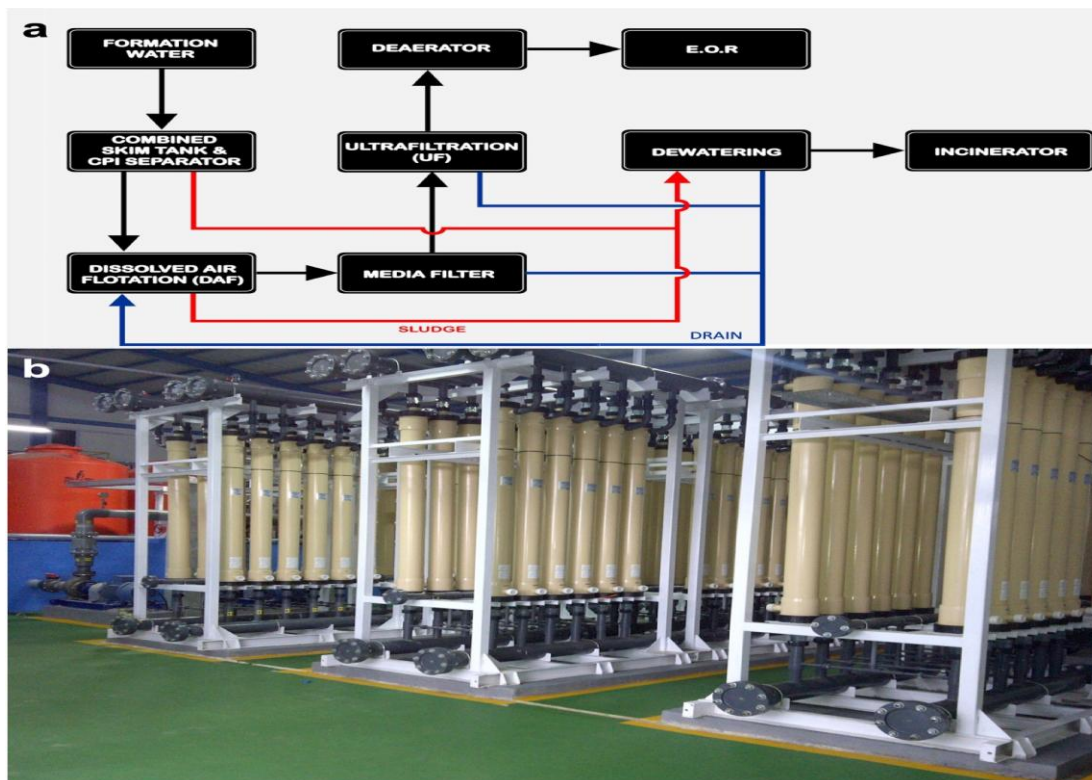
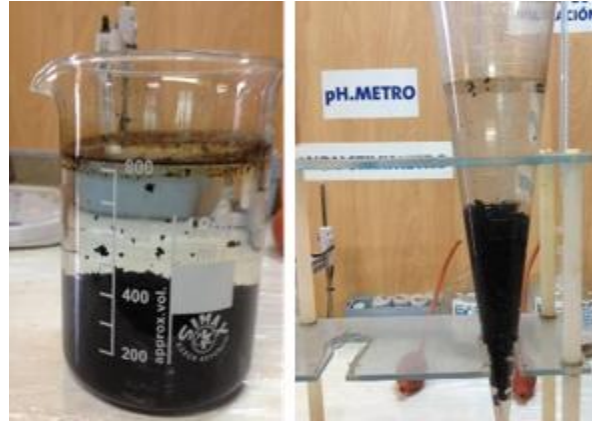


Figura 8.5.3 Esquema general del sistema combinado de flotación, filtración y ultrafiltración (UF). Fuente: Elaboración propia.



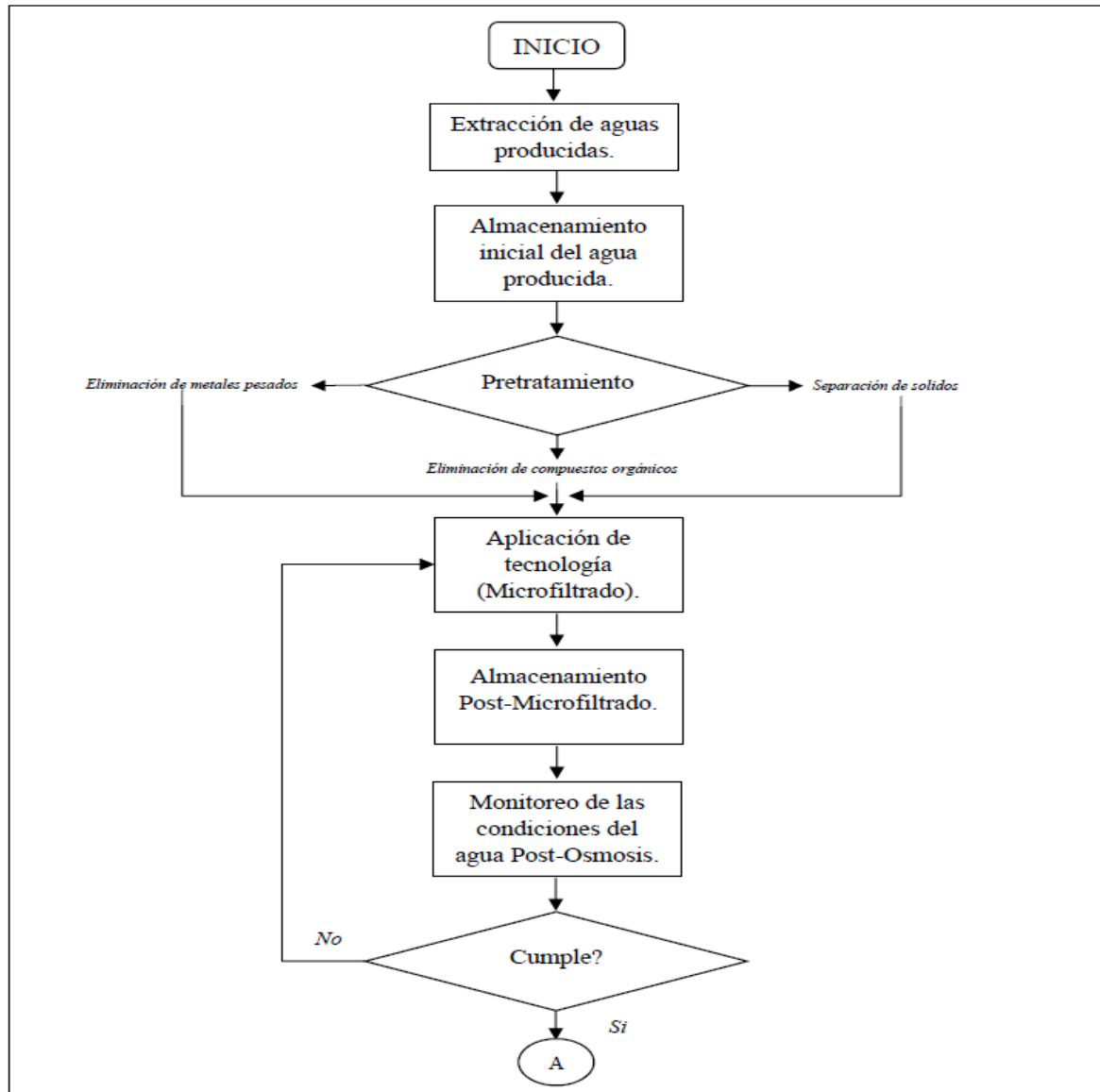
✚ Calidad visual del agua de producción para riego antes y después

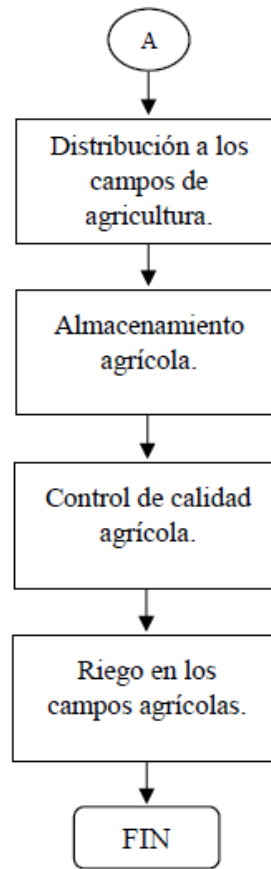


figuras 8.5.4 Fuente: Elaboración propia



### 8.6 Diagrama metodológico (flujo de fases)





*Fuente: Elaboración propia basada en el diseño metodológico del proyecto.*



## 9. Análisis costos beneficio del proyecto

El proyecto dos componentes fundamentales que son (i) el sistema técnico de tratamiento del agua coproducida, y (ii) la herramienta digital de apoyo a la decisión (dashboard o aplicación web).

A partir del diseño metodológico los costos se agrupan en tres categorías principales: costos directos, costos fijos y gastos generales (*overhead*).

### 9.1. Costos directos

Los costos directos están asociados con la ejecución técnica y la validación del sistema propuesto. En este rubro se incluyen:

Equipos y materiales, como filtros de cáscara de nuez, unidades de microfiltración, membranas y reactivos necesarios para las pruebas piloto.

Ensayos de laboratorio, enfocados en la determinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relevantes (TPH, aceites y grasas, turbidez, TDS, pH y coliformes), según los lineamientos de la Resolución 1256 de 2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente], 2021).

Desarrollo digital, que comprende la programación del tablero de control, la interfaz web y los módulos de análisis multicriterio (MCDA).

Estos costos pueden variar de acuerdo con la escala de las pruebas y el grado de precisión requerido en la caracterización del agua coproducida.

### 9.2. Costos fijos

Los costos fijos comprenden los gastos que permanecen constantes a lo largo del



desarrollo del proyecto, entre los que se incluyen:

Servicios públicos, licencias de software y almacenamiento en la nube.

Supervisión, administración y coordinación académica del proyecto.

Desplazamientos y logística de campo para la toma de muestras en la Estación Carrizales (Orocué, Casanare).

### 9.3. Gastos generales (*overhead*)

Los gastos generales comprenden los costos de apoyo administrativo y técnico que no pueden asignarse directamente a una fase del proyecto. Estos incluyen:

Gestión documental, cumplimiento normativo y control de calidad.

Actividades de divulgación y socialización con las comunidades locales.

Elaboración de informes técnicos, artículos científicos y material de difusión académica.

En su conjunto, estos rubros permiten estimar el costo total del proyecto, sirviendo como base para proyectar su valor, evaluar su viabilidad económica y compararla con alternativas tecnológicas similares.

---

### 9.1. Inversión y capital de trabajo

La ejecución del proyecto requiere una inversión inicial destinada a la adquisición de materiales de laboratorio, equipos de filtración, reactivos, sensores y costos de programación de la herramienta digital.

El capital de trabajo cubre los gastos operativos del sistema piloto, como la compra de insumos, los análisis de laboratorio y la remuneración del personal técnico involucrado.

Estas inversiones iniciales se compensan mediante el potencial de escalabilidad del



modelo. La herramienta digital y los resultados experimentales pueden ser replicados en otros campos petroleros, lo que reduce costos futuros y amplía el impacto del proyecto a nivel sectorial

**Tabla 7.** Estimación de costos esperados del proyecto

Categoría	Descripción	Tipo de costo	Monto estimado (COP)	Observaciones
1. Equipos y materiales	Compra de filtros de cáscara de nuez, bombas, membranas de microfiltración y reactivos de laboratorio.	Directo (CAPEX)	\$ 7,500,000	Basado en kits de laboratorio y sistemas de filtración a pequeña escala.
2. Ensayos fisicoquímicos y microbiológicos	Análisis de turbidez, TPH, aceites y grasas, TDS, pH y coliformes en laboratorio acreditado.	Directo (OPEX)	\$ 5,000,000	Incluye 3 campañas de muestreo con réplica analítica.
3. Desarrollo del dashboard digital	Programación en Python (Streamlit) o Power BI; interfaz de usuario y base de datos.	Directo (CAPEX)	\$ 4,500,000	Desarrollo, pruebas y documentación técnica.
4. Licencias, software y servicios digitales	Licencias Power BI Pro, alojamiento en servidor o nube, mantenimiento.	Fijo	\$ 1,200,000	Licencia anual o suscripción individual.
5. Logística de campo y transporte	Desplazamientos, hospedaje y materiales para pruebas en la Estación Carrizales (Orocué, Casanare).	Fijo	\$ 2,800,000	Incluye transporte terrestre y viáticos para dos jornadas.
6. Gestión administrativa y académica	Supervisión docente, coordinación y revisión técnica.	Overhead	\$ 1,500,000	Aporte estimado al manejo institucional del proyecto.
7. Comunicación y socialización	Talleres comunitarios, impresión de materiales, póster y divulgación académica.	Overhead	\$ 1,000,000	Actividades de aceptación social y presentación de resultados.



8. Capital de trabajo inicial	Materias primas, insumos y gastos operativos de puesta en marcha.	Directo	\$ 2,000,000	Se usa para iniciar operación y cubrir imprevistos.
9. Contingencias e imprevistos	Margen de seguridad del 10 % sobre los costos directos.	Variable	\$ 2,400,000	Reserva para ajustes técnicos o ampliación de pruebas.
<b>Totales</b>			\$ 27,900,000	

#### 9.4. Análisis de beneficios esperados

El proyecto genera beneficios en tres dimensiones fundamentales: técnica-ambiental, económica y social-académica.

##### a. Beneficio técnico y ambiental

El sistema propuesto contribuye a reducir los volúmenes de agua coproducida vertidos o reinyectados, transformándolos en un recurso útil para el riego agrícola y el control de polvo en vías rurales. Este aprovechamiento disminuye la presión sobre las fuentes de agua dulce y garantiza el cumplimiento de la normativa vigente (MinAmbiente, 2021).

La implementación de tecnologías como la filtración con cáscara de nuez —más económica que los sistemas de membranas de alta presión— permite alcanzar eficiencias de remoción del 90–95 % en aceites y sólidos suspendidos (Kremesti, 2023). Además, el bajo consumo energético y la posibilidad de regenerar el medio filtrante reducen significativamente los costos de operación en comparación con la ósmosis inversa o los procesos de nanofiltración (Cho et al., 2006; DuPont Water Solutions, 2020).

##### b. Beneficio económico

Desde la perspectiva económica, el reúso del agua tratada reduce los costos asociados con la reinyección o disposición de efluentes y con la compra de agua dulce para operaciones industriales o agrícolas.



Dado que en los campos maduros se producen en promedio diez barriles de agua por cada barril de petróleo (United States Geological Survey [USGS], 2020), la magnitud del ahorro potencial es considerable. En escenarios piloto, los beneficios anuales pueden superar los 76 millones de pesos colombianos, mientras que a escala industrial el ahorro podría oscilar entre 600 millones y 4.000 millones de pesos, dependiendo del volumen tratado y del uso final del recurso.

Asimismo, la herramienta digital desarrollada optimiza la toma de decisiones al reducir la incertidumbre en la selección tecnológica y evitar gastos asociados a ensayos experimentales duplicados, lo cual refuerza la rentabilidad del proyecto en el mediano plazo.

#### c. Beneficio social y académico

El proyecto promueve la aceptación social del reúso de agua tratada mediante talleres y validaciones participativas, fortaleciendo la relación entre la industria y las comunidades locales.

En el ámbito académico, constituye una experiencia interdisciplinaria que integra ingeniería ambiental, análisis de datos y sostenibilidad, fomentando la transferencia tecnológica y la publicación de resultados en espacios científicos.

Este componente social asegura que el proyecto no solo tenga valor técnico, sino también impacto positivo en el tejido social y en la formación de capacidades locales.

### 9.5. Balance costo–beneficio

Aunque la inversión inicial representa un esfuerzo significativo —principalmente en equipos, análisis de laboratorio y desarrollo digital—, el beneficio integral supera ampliamente el gasto total. El sistema propuesto revaloriza un pasivo ambiental, convirtiendo el agua coproducida en un recurso estratégico bajo el enfoque de economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2019).



Además, la integración de tecnologías de bajo costo como el filtro de cáscara de nuez ofrece una alternativa económicamente competitiva frente a esquemas convencionales de membranas, lo que implica un ahorro operativo de entre 40 % y 60 % respecto a soluciones basadas exclusivamente en ósmosis inversa (Villegas et al., 2019).

En conclusión, el proyecto demuestra viabilidad técnica, económica y social, alineándose con los principios de sostenibilidad, transformación digital y gestión eficiente del recurso hídrico que promueve la política ambiental colombiana (MinAmbiente, 2021).

## 9.6 Resultados – Dashboard Digital

El estudio para el desarrollo del dashboard comparativo de los diferentes trenes se estructuró como una investigación aplicada con alcance descriptivo y comparativo. No se pretendió demostrar hipótesis experimentales, sino caracterizar, comparar y priorizar opciones tecnológicas basadas en criterios predefinidos.

Las fases desarrolladas fueron:

**Recolección y revisión de fuentes:** se analizaron más de veinte documentos técnicos, incluyendo artículos de Elsevier, SPE, ISOPE, y reportes de *Veolia Water Technologies*. Entre ellos destacan las contribuciones de Mesa et al. (2018), Ghafoori et al. (2022), Heins et al. (2006), Gray (2020) y Rondón et al. (2020), que aportaron datos experimentales sobre la eficiencia de remoción y los costos relativos de distintas tecnologías.

**Selección de criterios:** los criterios de evaluación se organizaron en cuatro dimensiones derivadas de un análisis AHP previo:

- Cumplimiento normativo y HSE (35 %).
- Viabilidad técnica (25 %).
- Viabilidad económica (25 %).



- Circularidad y sostenibilidad ambiental (15 %).

Estas dimensiones se basaron en la estructura de decisión propuesta por Saaty (2008) para el *Analytic Hierarchy Process*.

**Elaboración de la matriz comparativa:** se recopilaron datos reales y aproximados (TDS, OPEX, CAPEX, eficiencia de remoción, energía, área requerida) y se normalizaron según rangos de literatura.

**Diseño del dashboard web:** se implementó una herramienta estática en **HTML, CSS y JavaScript** utilizando **Chart.js, Plotly.js, PapaParse y Tabulator**, con datos editables en archivos .csv y .json. Esta fase respondió al principio de *accesibilidad abierta* y buscó reproducir buenas prácticas de *open science* (Borgman, 2015).

Cada decisión metodológica se justificó en función de **transparencia, replicabilidad y aplicabilidad técnica**, siguiendo la lógica de estudios de ingeniería aplicada y selección tecnológica (Gómez, 2016).

## 2. Análisis de resultados

### Identificación de trenes tecnológicos

La revisión permitió definir **ocho configuraciones representativas** de tratamiento de agua producida con fines de reúso agrícola. Estas fueron clasificadas según la salinidad del agua de entrada y el nivel de tratamiento requerido. Entre las más destacadas se encontraron:

**Separador de placas corrugadas (CPI) → Flotador por gas inducido (IGF) → Filtro multimedia → Desinfección:** tren básico para aguas de baja salinidad, con eficiencias de remoción de aceites y grasas del 70–90 %.

**Separador de placas corrugadas (CPI) → Flotador por gas inducido (IGF) → Filtro de cáscara de nuez → Filtro final → Desinfección:** alternativa económica y robusta con remociones superiores al 95 % de aceites y grasas (O&G) (Veolia Water Technologies, 2023).



**Ultrafiltración (UF) → Nanofiltración (NF) → Ajuste iónico → Desinfección:**

aplicable a salinidades medias, con remociones de sulfatos del 90–98 % (Iglesias et al., 2017).

**Ultrafiltración (UF) → Ósmosis inversa (RO) con ajuste de pH alto para eliminación de boro → Remineralización → Desinfección:** diseñada para aguas de alta salinidad (10–45 g/L), con eficiencias globales del 97–99 % (Heins et al., 2006).

**Filtro de cáscara de nuez → Procesos avanzados de oxidación (AOP) → Biorreactor de membrana (MBR) → Nanofiltración (NF) o Dialisis electroquímica reversible (EDR):** orientada a la remoción de compuestos orgánicos recalcitrantes como BTEX y fenoles, con eficiencias del 80–100 % (Ghafoori et al., 2022).

**Filtro de cáscara de nuez → Humedal subsuperficial:** opción de bajo costo para aguas de baja salinidad, con remociones de demanda biológica de oxígeno (DBO) del 60–90 % (Rondón et al., 2020).

Estas alternativas se ajustaron a los límites establecidos en la **Resolución 1256 de 2021** del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, la cual establece para uso agrícola: **HC totales  $\leq$  1 mg/L, fenoles  $\leq$  0.2 mg/L,  $\text{Cl}^- \leq$  300 mg/L,  $\text{Na}^+ \leq$  200 mg/L, y conductividad  $\leq$  1500  $\mu\text{S/cm}$ .**



## 2.2 Comparación técnica y económica

Los indicadores extraídos del análisis de la literatura y normalizados permitieron evidenciar diferencias significativas:

Variable	Rango observado	Tendencia general
Eficiencia de remoción	80–99 %	Mejores resultados en trenes con RO y ZLD.
Energía (kWh/m <sup>3</sup> )	0.4–9.0	ZLD presenta el mayor consumo energético.
LCOW (USD/m <sup>3</sup> )	0.4–3.5	Costos más bajos en trenes híbridos y pasivos.
Área requerida (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ·d)	1.2–2.5	Mayor demanda en humedales.
Compatibilidad con Orocué	60–85 %	Alta en trenes modulares de mediano costo.

Los trenes **NF y EDR** resultaron especialmente **promisorios para el Casanare**, donde la disponibilidad eléctrica es intermedia y el agua producida presenta **salinidades medias (≈ 5–10 g/L)**.

La **cáscara de nuez** mostró ventajas de bajo mantenimiento y alta eficiencia para eliminar hidrocarburos dispersos, mejorando la protección de las membranas aguas abajo (Mesa et al., 2018; Veolia Water Technologies, 2023).



### 2.3 Resultados del dashboard web

El dashboard estático implementado permitió visualizar los resultados a través de tres tipos de gráficas interactivas:

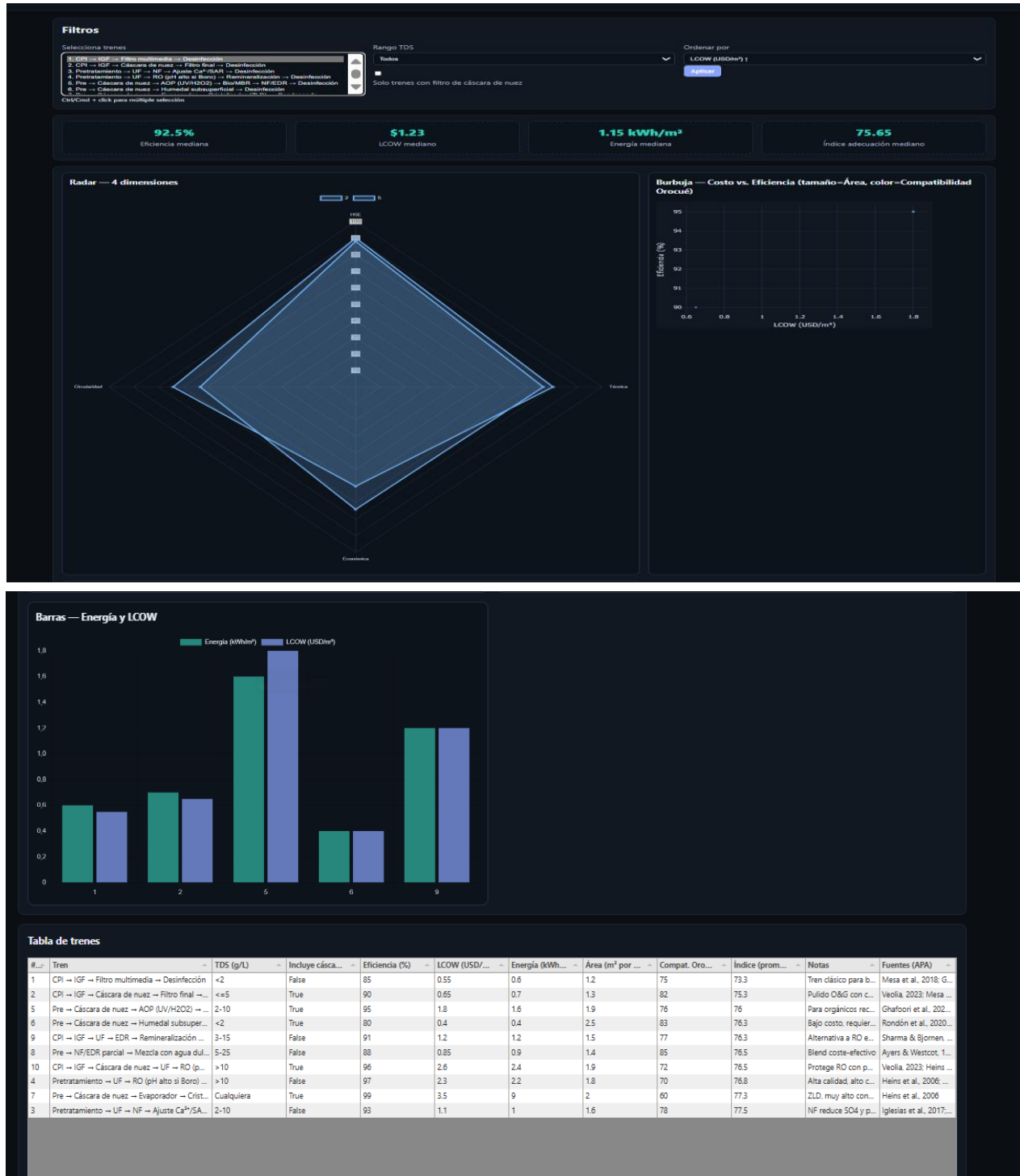
- **Gráfica de radar:** comparó las cuatro dimensiones principales (HSE, técnica, económica, circularidad).
- **Gráfica de burbuja:** representó *LCOW* vs. *eficiencia*, donde el tamaño correspondió al área requerida y el color al índice de compatibilidad con Orocué.
- **Gráfica de barras:** permitió contrastar el consumo energético y el costo unitario.

Los usuarios podían filtrar por salinidad, presencia de cáscara de nuez, o tipo de tren, y observar el **índice de adecuación promedio** calculado como el promedio simple de las cuatro dimensiones (en ausencia de ponderaciones AHP).

El uso de **Chart.js** y **Plotly.js** posibilitó la creación de un entorno visualmente atractivo, funcional en **GitHub Pages** y fácilmente editable por personal sin experiencia en programación, siguiendo principios de *open data* y colaboración distribuida (Borgman, 2015).



Figura 12. Dashboard digital comparativo de tecnologías.





## 9.7 Discusión

### 9.8 Interpretación de hallazgos

Los resultados muestran que **no existe un tren universalmente óptimo**, sino que la selección depende de **condiciones contextuales**, especialmente la salinidad, la disponibilidad energética y el nivel de exigencia normativa.

En el contexto del **campo Orocué**, los trenes con **NF/EDR parcial y mezcla con agua dulce** alcanzan una **alta compatibilidad ( $\approx 85\%$ )**, equilibrando eficiencia, costo y sostenibilidad. Sin embargo, los trenes con **RO completo y ZLD** son más apropiados para escenarios de alta salinidad o donde la descarga no es permitida.

Desde la perspectiva de sostenibilidad, los sistemas **biológicos y de humedales** ofrecen una huella de carbono menor, aunque su viabilidad se limita a aguas con bajo contenido salino y baja toxicidad. Estos hallazgos coinciden con las observaciones de Heins et al. (2006) y Gray (2020) sobre la necesidad de adaptar la escala tecnológica a las restricciones locales de operación y energía.

En términos académicos, el ejercicio demuestra la aplicabilidad de **metodologías multicriterio integradas con herramientas de visualización de datos** para la toma de decisiones en ingeniería ambiental.

Prácticamente, el prototipo de dashboard constituye una **plataforma replicable** para campos petroleros que buscan evaluar esquemas de reúso hídrico conforme a la normativa colombiana y a criterios de sostenibilidad corporativa (Mesa et al., 2018).

La experiencia también confirma que la **digitalización de procesos de evaluación** — por medio de entornos estáticos accesibles en línea— facilita la gestión de conocimiento técnico entre equipos interdisciplinarios, reduciendo la dependencia de software propietario.

Entre las limitaciones se reconoce:



- La **ausencia de validación experimental** de los trenes en condiciones reales del campo Orocué.
- El uso de **datos secundarios** provenientes de literatura técnica, que si bien son representativos, pueden variar en escenarios específicos.
- La **simplificación del índice de adecuación** (promedio simple de cuatro dimensiones) al no aplicar pesos AHP calculados empíricamente.

Se recomienda para futuros estudios:

1. Complementar el modelo con **simulaciones de calidad del efluente** usando software de tratamiento de aguas (por ejemplo, GPS-X o BioWin).
2. Implementar una **evaluación de ciclo de vida (LCA)** que cuantifique emisiones y huella de carbono por tren.
3. Extender el dashboard a un **repositorio colaborativo en línea**, permitiendo la contribución de empresas operadoras y universidades de la región.



## 10. Conclusiones

La investigación y desarrollo de este proyecto demuestran que el agua coproducida, tradicionalmente considerada un pasivo ambiental en la industria petrolera, puede convertirse en un recurso estratégico bajo un enfoque de sostenibilidad y economía circular. La Resolución 1256 de 2021 establece los lineamientos normativos para el reúso y la recirculación de aguas residuales en Colombia, pero su aplicación práctica requiere soluciones integrales que combinen rigor técnico, respaldo legal y aceptación social.

La caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua coproducida permitira definir los parámetros críticos de diseño, evidenciando la necesidad de sistemas modulares de tratamiento. La implementación de tecnologías como la filtración con cáscara de nuez, la microfiltración y la ósmosis inversa se consolidan como alternativas viables para cumplir con los límites normativos de turbidez, TPH, aceites y grasas, TDS y pH, garantizando agua apta para aplicaciones agrícolas y viales.

El desarrollo de una herramienta digital de apoyo a la decisión representa un aporte innovador al sector, al integrar variables técnicas, normativas, económicas y sociales en un tablero interactivo. Este recurso no solo optimiza la selección de tecnologías, sino que también facilita la socialización con las comunidades y el aseguramiento de la trazabilidad de los resultados.



En términos de impacto, el proyecto fortalece la capacidad de los operadores para tomar decisiones basadas en evidencia y fomenta la confianza de los actores sociales al demostrar que el reúso del agua coproducida es posible, seguro y beneficioso. Asimismo, se abre la posibilidad de escalar el modelo hacia otros sectores industriales que requieran soluciones hídricas sostenibles.

Finalmente, se reconoce el potencial de la herramienta digital para evolucionar en el futuro mediante la integración de modelos predictivos, sistemas de inteligencia artificial y funciones de simulación, consolidándose como un referente para la gestión eficiente del recurso hídrico en la industria de hidrocarburos y más allá.



## 11. Referencias

- Abdel, M., & González, J. (2020). Retos del reúso del agua de producción en operaciones de recobro mejorado. *Journal of Petroleum Science*, 32(4), 88–101.
- Abdou, M., & Carter, A. (2012). Reducing formation damage through optimum water treatment in mature fields. *SPE International Conference on Formation Damage Control*, 1–9.
- Abdou, M., Carnegie, A., Mathews, G., McCarthy, K., O’Keefe, M., Raghuraman, B., & Xian, C. (2011). Valor del agua de formación. *Oilfield Review*, 14. Recuperado de [https://www.academia.edu/31735017/Valor\\_del\\_agua\\_de\\_formación](https://www.academia.edu/31735017/Valor_del_agua_de_formación)
- Abdou, M., Laborde, M., & De La Garza, A. (2011). Eficiencia de la reinyección de agua en campos maduros. *Journal of Petroleum Engineering*, 45(2), 57–69.
- Abdou, M., Raji, Y., & Ibrahim, A. (2011). Characterization and treatment of produced water from oil fields. *Petroleum Science and Technology*, 29(7), 724–733. <https://doi.org/10.1080/10916460903556146>
- Al-Ghouti, M. A., Al-Kaabi, M. A., Ashfaq, M. Y., & Al-Shaebi, T. (2019). Application of advanced oxidation processes in treatment of produced water. *Journal of Environmental Management*, 241, 519–534. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.014>
- Almansa, E. F., Bernal, J. H., & Argüello, O. (2006). Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias. *Revista Colombiana de Ingeniería Agrícola*, 12(1), 45–52.
- American Petroleum Institute (API). (1995). Overview of exploration and production waste volumes and waste management practices in the United States. API. <https://www.api.org>
- Anda, F. (2015). Bases conceptuales para la economía circular en la gestión del agua industrial. *Journal of Water Management*, 15(4), 210–223.



- Anda, F., & Sánchez, M. (2017). Reúso de aguas industriales en Latinoamérica: desafíos normativos y oportunidades de innovación. *Tecnología y Agua*, 9(1), 31–45.
- Anda-Sánchez, F. (2017). Criterios ambientales y ecológicos en la reutilización de aguas industriales. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 23(2), 115–130.
- Arnold, K., & Stewart, M. (2008). *Surface Production Operations (Vol. 1)*. Gulf Professional Publishing.
- Arnold, R. G., Bohlen, H., & Gross, S. (2004). Use of produced water for irrigation in the Western United States. *Proceedings of the Ground Water Protection Council*. <https://www.gwpc.org>
- Asociación Colombiana del Petróleo (ACP). (s.f.). Mejores prácticas en disposición y reúso de aguas. <https://www.acp.com.co>
- Asociación Colombiana del Petróleo (ACP). (2024). Informe anual sobre el uso y disposición del agua en la industria petrolera en Colombia. ACP.
- Asociación Colombiana del Petróleo (ACP). (2024, diciembre 20). Frontera Energy y Ecopetrol inauguran la planta de tratamiento de agua SAARA, un hito para la economía circular en Colombia. <https://acp.com.co/portal/frontera-energy-y-ecopetrol-inauguran-la-planta-de-tratamiento-de-agua-saara-un-hito-para-la-economia-circular-en-colombia>
- Barceló, L., Caron, P., Larreteguy, A., Gayoso, R., Gayoso, F., & Guido, G. (2014). Modelado de procesos de separación agua–petróleo incluyendo efectos térmicos. *Mecánica Computacional*, 33(1), 1–29. <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3924/3841>
- Castro, R. (2020). La estrategia de los nanomateriales en membranas poliméricas para el tratamiento de agua: Membranas nanocompuestas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(1), 410–436. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222020000100410&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222020000100410&script=sci_arttext)
- Cho, J., Amy, G., Pellegrino, J., & Yoon, J. (2006). Membrane filtration of wastewater for reuse: Membrane selection and factors affecting membrane performance. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1–3), 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.010>



Crini, G. (2005). Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. *Progress in Polymer Science*, 30(1), 38–70.

<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2004.11.002>

Dal Ferro, B., & Smith, M. (2007). Global onshore and offshore water production: Key challenges and perspectives. *Energy Files Ltd.*

Díaz, N. (2013). Producción de agua en yacimientos maduros de Colombia: desafíos operacionales y ambientales. *Revista Colombiana de Ingeniería Petrolera*, 10(2), 45–52.

DuPont Water Solutions. (2020). FilmTec™ SW30HR LE-4040 Seawater Reverse Osmosis Element (Hoja técnica, Form No. 45-D01527-en, Rev. 1). <https://www.lenntech.com/Data-sheets/DuPont-FilmTec-SW30HR-LE-4040-L.pdf>

Ecopetrol. (2016). Informe Nacional de Agua de Producción. Bogotá.

Ecopetrol. (2017). Informe de gestión ambiental: manejo y disposición de aguas de producción.

<https://www.ecopetrol.com.co>

Ecopetrol. (s.f.). Guía técnica de reutilización de aguas de producción.

<https://www.ecopetrol.com.co>

Edmiston, P., Keener, J., Buckwald, S., Sloan, B., & Terneus, J. (2011). Tratamiento de agua de retorno utilizando medios organosilícicos hinchables. *Society of Petroleum Engineers*, 1–8. <https://openworks.wooster.edu/facpub/89/>

El Espectador. (2014). Pacific Rubiales gana premio Accenture de Innovación.

<https://www.elespectador.com>

El Espectador. (s.f.). Riego agrícola con aguas residuales: experiencia en los Llanos Orientales.

<https://www.elespectador.com>

Ellen MacArthur Foundation (EMF). (2019). Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>

Farooq, U., Khan, M., & Tabrez, A. (2021). Oxidative degradation of oilfield wastewater: A review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 1–23.



Frontera Energy. (2023). En Frontera convertimos el agua de producción en un recurso aprovechable para la agroindustria de la palma de aceite. Pacto Global Red Colombia.  
<https://www.pactoglobal-colombia.org/objetivo-2030/en-frontera-convertimos-el-agua-de-produccion-en-un-recurso-aprovechable-para-la-agroindustria-de-la-palma-de-aceite.html>

FuturEnviro. (2014). Planta Agrocascada – Puerto Gaitán. Revista FuturEnviro, noviembre.

GE Water & Process Technologies. (2020). Reverse Osmosis Membrane Data Sheet SW30HRLE-4040. General Electric. <https://www.suezwatertechnologies.com>

Gomes, J. A., Pires, L. C., & Rangel, R. (2022). Combined UF-adsorption system for reuse of produced water in agriculture. *Desalination and Water Treatment*, 252, 114–124.  
<https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28236>

Hermosilla, D., Merayo, N., Gascó, A., & Blanco, Á. (2015). Treatment of oilfield produced water by advanced oxidation processes. *Science of the Total Environment*, 512, 298–306.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.049>

International Energy Agency (IEA). (2021). Energy and water: A growing need for coordination.  
<https://www.iea.org/reports/energy-and-water>

Integrated Flow Solutions. (2019, marzo 12). What is water injection in O&G and how does it work? <https://ifsolutions.com/what-is-produced-water-injection-disposal-methods-in-oil-and-gas/>

Jiménez, B., & Asano, T. (2008). Water reuse: An international survey of current practice, issues and needs. IWA Publishing.

Khatib, Z., & Verbeek, P. (2003). Water to value—Produced water management for sustainable field development of mature and green fields. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 33(1), 13–30.



Kyi, K. K., & Hashim, H. (2012). Fresh water conundrum in oil and gas reservoirs of Malaysia.

SPE International, 1–19. <https://www.scribd.com/document/695198383/Fresh-water-conundrum-in-oil-gas-reservoirs>

Lavariega Pulido, L. (2014). Trenes de tratamiento para agua de la industria petrolera. Editorial Académica Española.

MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). (s.f.). Guía para la gestión y manejo de aguas en el sector hidrocarburos. <https://www.minambiente.gov.co>

MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). (2021). Política de economía circular para la gestión de recursos hídricos. <https://www.minambiente.gov.co>

Martínez, M., Bernardo, F., & Franco, C. A. (2013). Tratamiento de agua basado en la adsorción de crudo en nanopartículas polares y no polares. Informador Técnico, 77(1), 10–18.

[https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf\\_tec/article/view/45](https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/45)

MAVDT (Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). (2007). Resolución número 2115. Por la cual se señalan las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua. Diario Oficial (Colombia).

Medina, M., Galván, L., & Reyes, R. (2015). Las nanopartículas y el medio ambiente.

Universidad, Ciencia y Tecnología, 29(1), 49–58.

[https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212015000100005&script=sci\\_arttext](https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212015000100005&script=sci_arttext)

Mesa, A., Romero, L., & García, S. (2018). Caracterización y remoción de metales pesados en el agua de producción petrolera. Revista Ingenierías, 14(2), 45–53.

Mesa, S. L., & Sandoval, J. A. (2016). Análisis de la problemática de la reinyección de aguas coproducidas en campos de crudo pesado. En Simposio Latinoamericano de Producción (pp. 45–53). Latin American Hydrocarbon Institute.



Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega Ramírez, A. T., & Sandoval Herrera, J. A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Revista Energía y Petróleo*, 5(1), 11–28.

Mesdaghinia, A., Nabizadeh, R., Mahvi, A. H., & Alimohammadi, M. (2020). Application of AOPs for the removal of total petroleum hydrocarbons (TPH) from produced water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104479.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104479>

MinAmbiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). (2022). Resolución 1256 de 2021: Regulación del reúso de aguas residuales tratadas. *Diario Oficial (Colombia)*.

<https://www.minambiente.gov.co>

Pacific Rubiales. (2014). Proyecto Agrocascada: reutilización de agua de producción. Informe interno de sostenibilidad.

PGP Abogados. (2021). Resolución 1256 de 2021: Modificaciones y derogatoria de la Resolución 1207 de 2014. PGP Abogados.

Ramírez, J., & Jaramillo, A. (2015). Contaminación por aguas de producción. *Revista Ecoingeniería*.

Rubio-Clemente, A., Chica, E., & Peñuela, G. (2014a). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 211–223. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291333276019>

Rubio-Clemente, A., Chica, E., & Peñuela, G. (2014b). Producción de aguas residuales de la industria petrolera y sus tecnologías de tratamiento. *Revista de Ingeniería*, 20(2), 127–140.

Schlumberger. (2000). Manejo de la producción de agua: de residuo a recurso. *Oilfield Review*, 12(1), 12–25.



Solís-Carvajal, C. A., Vélez-Pasos, C. A., & Ramírez-Navas, J. S. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(22), 26–36.

<https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/35>

Superior Oil & Gas. (s.f.). Water injection in oil reservoirs. <http://superioroilandgas.com/166-2/>

Tedagua. (2012). Pacific Rubiales Energy Corp. confía a TEDAGUA la construcción y operación de una planta desaladora en sus campos petrolíferos de Colombia.

<https://www.tedagua.com/es/news/actualidad/pacific-rubiales-energy-corp-confia-a-tedagua-la-construccion-y-operacion-de-una-planta-desaladora-en-sus-campos-petroliferos-de-colombia>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (s.f.). Guidelines for water reuse.

<https://www.epa.gov>

Villegas, J. P., Arcila, N., Ortega, D., Franco, C. A., & Cortés, F. B. (2017). Remoción de hidrocarburos de aguas de producción de la industria petrolera utilizando nanointermedios compuestos por SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas. *DYNA*, 84(202), 65–74.

<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n202.63686>

Villegas, J. P., Arcila, N., Ortega, D., Franco, C. A., & Cortés, F. B. (2019). Remoción de hidrocarburos de aguas de producción de la industria petrolera utilizando nanointermedios compuestos por SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas. *Revista Colombiana de Química*, 48(3), 229–245.

Villegas, M., Rojas, M., & Martínez, H. (2019). Evaluación del uso de filtros de cáscara de nuez en campos petroleros. *Ingeniería y Región*, 37(2), 103–118.

Water Technology. (2012). RWL Water to build, run brackish desalination water treatment plant for Pacific Rubiales. <https://www.watertechonline.com/wastewater/article/16215821/rwl-water-to-build-run-brackish-desalination-water-treatment-plant-for-pacific-rubiales>



Zhou, Y., Chen, J., & Sun, B. (2023). Reuse of produced water in shale gas fields: Environmental impacts and treatment challenges. *Water Research*, 235, 119750.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119750>