

REVISIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS DE DESECHOS
INDUSTRIALES PARA GENERACIÓN DE HIDROGENO

Paula Daniela Rueda Jiménez

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniería Química

Director

Duban Fabian García Navas

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Un logro dedicado...

A mis nonos Myriam, Héctor y Alirio, por acompañarme en una etapa tan fundamental como lo es la niñez, porque me formaron con enseñanzas llenas de amor que hoy en día llevo conmigo.

A mi mascota Luna, por acompañarme en muchas desveladas de estudio y por estar conmigo cuando más sola me sentí.

Y a la primera persona que creyó en mí, mi amada profesora de primaria Evangelina, por enseñarme que siempre podré lograr todo lo que quiera, aun así, las cosas se pongan difíciles.

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a mi familia por su apoyo en este nuevo logro. A mis mascotas, Kitty y Benji, por hacerme tan feliz y acompañarme en los momentos difíciles.

Al profesor Crisóstomo, por permitirme ser su auxiliar y enseñarme cosas valiosas de la carrera. Al profesor Duban, por su guía y compromiso durante toda la carrera y especialmente en la etapa final de esta.

Y a mi pareja, William, por ayudarme a ser resiliente y a salir de mi zona de confort; por estar presente en cada momento difícil y en cada alegría, por sus consejos que me ayudaron a llegar tan lejos, por escucharme cuando más lo necesitaba y, sobre todo, por creer siempre en mí.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos.....	11
1.1. Objetivo general.....	11
1.2. Objetivos específicos	11
2. Marco de referencia	12
2.1. Estado del arte.....	12
2.2. Marco teórico.....	14
3. Metodología.....	16
3.1. Caracterización de aguas residuales industriales de Colombia.....	16
3.2. Criterios para la selección de técnicas de tratamiento de aguas residuales.....	20
3.3. Análisis de la producción de hidrogeno a partir de aguas residuales.....	21
4. Resultados.....	23
4.1. Caracterización de aguas residuales industriales de Colombia.....	23
4.2. Criterios para la selección de técnicas de tratamiento de aguas residuales.....	35
4.3. Análisis de la producción de hidrogeno a partir de aguas residuales.....	42
5. Conclusiones.....	47
6. Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas	50
Anexos.....	¡Error! Marcador no definido.

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Escala de puntuación para la selección de industrias	18
Tabla 2. Método de ponderación aplicado a las industrias.....	29
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en la industria de petróleo crudo.....	30
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en refinerías de petróleo.	31
Tabla 5. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en las industrias de caña de azúcar.	32
Tabla 6. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en la industria de aceite de palma.	33
Tabla 7. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en la industria de coquización.	34
Tabla 8. Matriz de las operaciones utilizadas en el tratamiento de aguas residuales agroindustriales.....	40
Tabla 9. Matriz de las operaciones empleadas en el tratamiento de aguas residuales no-agroindustriales.	41
Tabla 10. Porcentaje estimado de rechazo de agua residual.....	41
Tabla 11. Requerimientos de calidad de agua y rendimiento.....	43
Tabla 12. Estimación del potencial de producción de hidrógeno.....	44

Lista de Figuras

Figura 1. Disponibilidad de aguas residuales generadas.	23
Figura 2. Sólidos suspendidos totales en las aguas residuales industriales.	25
Figura 3. Dispersión geográfica de las industrias analizadas.	26
Figura 4. Aporte al PIB de las industrias analizadas en Colombia.	27
Figura 5. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento para la industria de caña de azúcar.	36
Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento para la industria de refinería de petróleo.....	38
Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento para la industria textil.	39
Figura 8. Distribución de la producción potencial de hidrógeno.	45

Lista de Anexos

	Pág.
Apéndices A. Caracterización de las aguas de desecho industrial.	56
Apéndices B. Técnicas de tratamiento de las aguas de desecho industrial.....	60
Apéndices C. Tecnologías para la generación de hidrógeno.	65

Resumen

Título: Revisión de técnicas de tratamiento de aguas de desechos industriales para generación de hidrogeno*

Autor: Paula Daniela Rueda Jimenez**

Palabras Clave: Hidrógeno verde, aguas residuales industriales, electrólisis, evaluación multicriterio.

Descripción: El presente trabajo tiene como objetivo analizar el potencial de aprovechamiento de las aguas residuales industriales en Colombia para la producción de hidrógeno verde, mediante la evaluación de sus características, tratamientos requeridos y tecnologías de producción de hidrógeno aplicables. Para ello, se identificaron las principales industrias generadoras de aguas residuales y se recopiló información sobre su producción y composición fisicoquímica a partir de literatura científica y fuentes oficiales.

La metodología se desarrolló en tres etapas: caracterización de las aguas residuales industriales, selección de tecnologías de tratamiento mediante una metodología multicriterio basada en disponibilidad de agua, calidad del efluente, dispersión geográfica e impacto económico, y análisis del potencial de producción de hidrógeno a partir del agua tratada, considerando tecnologías como fermentación oscura, celdas de electrólisis microbiana y electrólisis del agua, así como los requerimientos de calidad del agua según la norma ASTM D1193.

Los resultados permitieron identificar que, aunque algunas industrias presentan mayor volumen de aguas residuales, las industrias de petróleo crudo, refinerías, caña de azúcar, aceite de palma y coquización presentan mejores condiciones para la producción de hidrógeno. Se concluye que el potencial de producción de hidrógeno depende de diversos aspectos tales como la cantidad y calidad del agua residual, del tratamiento requerido y de factores logísticos y económicos.

* Trabajo de grado

** Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela ingeniería Química.
Director: Duban Fabian García Navas doctor en Ingeniería química.

Abstract

Title: Review of Industrial Wastewater Treatment Techniques for Hydrogen Production**

Author: Paula Daniela Rueda Jiménez*

Key Words: Green hydrogen, industrial wastewater, electrolysis, multicriteria evaluation.

Description: The objective of this study is to analyze the potential use of industrial wastewater in Colombia for green hydrogen production by evaluating its characteristics, required treatment processes, and applicable hydrogen production technologies. To achieve this, the main industries generating wastewater were identified, and information on their production and physicochemical composition was collected from scientific literature and official sources.

The methodology was developed in three stages: characterization of industrial wastewater, selection of treatment technologies using a multicriteria methodology based on water availability, effluent quality, geographic dispersion, and economic impact, and analysis of the hydrogen production potential from treated water, considering technologies such as dark fermentation, microbial electrolysis cells, and water electrolysis, as well as water quality requirements according to ASTM D1193.

The results showed that, although some industries generate larger volumes of wastewater, the crude oil, oil refining, sugarcane, palm oil, and coking industries present better conditions for hydrogen production. It is concluded that the hydrogen production potential depends on several concerns such as the quantity and quality of the wastewater, the required treatment, and logistical and economic factors.

* Trabajo de grado

** Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela ingeniería Química.
Director: Duban Fabian García Navas doctor en Ingeniería química.

Introducción

En la actualidad, la creciente preocupación por la contaminación ambiental, el agotamiento de los fósiles y la necesidad de implementar fuentes de energía sostenibles ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas limpias. En base a esto, el hidrógeno verde se ha posicionado como una de las fuentes de energía más prometedoras, debido a que su producción y uso no generan emisiones de dióxido de carbono (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2020). Sin embargo, la electrólisis convencional requiere un alto consumo de agua, lo que ha impulsado la búsqueda de fuentes alternativas para producir hidrógeno de forma más sostenible.

Dentro de estas alternativas, las aguas residuales industriales representan una fuente potencial para la producción de hidrógeno, ya que contienen agua y, en muchos casos, materia orgánica que puede ser aprovechada mediante procesos electroquímicos. Además, el aprovechamiento de estas aguas permite no solo generar energía, sino también reducir la carga contaminante de los efluentes industriales (Logan & Rabaey, 2012). En Colombia, diversos sectores industriales generan grandes volúmenes de aguas residuales con características fisicoquímicas variadas, lo que implica que no todas las aguas residuales presentan las mismas condiciones para su aprovechamiento (DANE, 2023a).

Por esta razón, es necesario analizar las características de las aguas residuales, los tratamientos requeridos y las tecnologías de producción de hidrógeno para cada tipo de efluente, con el fin de identificar las industrias con mayor potencial de aprovechamiento. A partir de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: **¿Qué tipos de aguas residuales industriales presentan mayor potencial para la generación de hidrógeno verde y qué técnicas de tratamiento son más adecuadas para su aprovechamiento sostenible en el contexto colombiano?**

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Indagar las técnicas de tratamientos de aguas de desechos industriales para su uso en la generación de hidrogeno.

1.2. Objetivos específicos

1. Identificar las características generales de las diversas clases de aguas residuales industriales y agroindustriales en Colombia.

2. Examinar las principales técnicas de tratamiento de aguas residuales industriales, evaluando su potencial aplicación en la generación de hidrógeno.

3. Evaluar la idoneidad de las técnicas de tratamiento de aguas residuales según las características de los efluentes industriales en Colombia, con el fin de valorar su aplicación en la generación de hidrógeno.

2. Marco de referencia

2.1. Estado del arte

La creciente preocupación por reducir la contaminación y promover energías limpias ha impulsado la valorización de residuos industriales. En este contexto, las aguas residuales industriales se perfilan como fuente para generar hidrógeno sostenible (Merabet et al., 2024), en consonancia con la economía circular que busca reutilizar recursos (European commission, 2020). Mediante técnicas como la foto-electrocatalisis, fermentación oscura y distintos tipos de electrólisis, estos efluentes pueden transformarse en hidrógeno verde, contribuyendo a la transición hacia energías más sostenibles.

En 2022 se realizó un estudio sobre el uso de aguas residuales industriales reales como sustrato para generar hidrógeno biológico, evaluando su potencial energético y las limitaciones de su aplicación a gran escala. Se evidenció que los efluentes con alto contenido de carbohidratos y compuestos orgánicos biodegradables como los provenientes de las industrias azucarera y cervecera, poseen gran potencial para la producción de biohidrógeno por su fácil metabolización por microorganismos fermentativos. Este enfoque no solo impulsa una fuente de energía renovable, sino que también favorece la remediación ambiental al disminuir la carga orgánica y los contaminantes de los efluentes. En conjunto, los resultados destacan el creciente interés en convertir las aguas residuales industriales en un recurso energético sostenible y avanzar hacia una economía del hidrógeno basada en residuos orgánicos (Qyyum et al., 2022).

Una investigación realizada en el 2023 analiza cómo la proporción de carbohidratos y ácidos orgánicos afecta las comunidades microbianas y las rutas metabólicas. Se emplearon efluentes de la industria quesera y vinícola, los cuales mostraron alto potencial energético. Se observó que la interacción entre bacterias lácticas y del género *Clostridium* favorece la generación

de hidrógeno, mientras que las bacterias acéticas, comunes en las vinazas, pueden reducir la productividad. En conjunto, el estudio subraya el valor de los efluentes agroindustriales como materia prima sostenible para la producción de hidrógeno a partir de residuos orgánicos fermentados. (Fuentes-Santiago et al., 2023).

Durante el año 2024, se analizaron los avances, ventajas y desafíos del proceso de fotoelectrocatalisis (PEC) aplicado al tratamiento de aguas residuales industriales y a la producción simultánea de hidrógeno verde. El estudio mostró cómo la energía solar puede degradar contaminantes y generar hidrógeno mediante reacciones electroquímicas y fotocatalíticas combinadas, usando efluentes de biodiésel, drenajes ácidos y corrientes con colorantes. Los autores concluyeron que la PEC es una tecnología dual y limpia, capaz de remediar aguas contaminadas y producir hidrógeno renovable (Chauke & Raphulu, 2024). Ese mismo año, otra revisión evaluó el tratamiento electroquímico de efluentes papeleros y textiles, resaltando su potencial para generar hidrógeno y subproductos como lignina, además de reducir contaminantes y el uso de agua potable, contribuyendo a la economía circular y a la transición energética sostenible (Núñez et al., 2024).

Un análisis integral en 2025 sobre la producción de hidrógeno mediante electrólisis de aguas residuales industriales, evaluando sus aspectos tecnológicos, económicos y ambientales, muestra que los efluentes de industrias textiles, petroquímicas, alimentarias y farmacéuticas, ricos en materia orgánica, poseen gran potencial para generar hidrógeno verde. Su aprovechamiento reduce la contaminación y el consumo de agua dulce, contribuyendo a la transición energética y a los objetivos de desarrollo sostenible. Además, se evidenció que más del 60 % de las aguas industriales se descargan sin tratamiento, lo que refuerza la necesidad de valorizarlas mediante fermentación oscura y electrólisis con membrana de intercambio protónico (Robin et al., 2025).

2.2. Marco teórico

Los principales mecanismos para producir hidrógeno a partir de agua incluyen técnicas químicas como la electrólisis y la foto-electrocatalisis, y bioprocesos como la fermentación oscura, foto-fermentación y las celdas microbianas, cuyos principios se describen a continuación. La foto-electrocatalisis combina fotocatalisis y electrólisis en un mismo sistema. En esta técnica, un semiconductor fotoactivo (como TiO_2 , Fe_2O_3 o BiVO_4) absorbe energía solar y genera pares electrón-hueco (e^-/h^+). Los huecos oxidan los contaminantes del agua, mientras que los electrones reducen los protones (H^+) para formar hidrógeno gaseoso (H_2). Este proceso permite remover contaminantes orgánicos y producir hidrógeno simultáneamente, convirtiéndola en una alternativa limpia y eficiente para valorizar aguas residuales industriales (Chauke & Raphulu, 2024).

La fermentación oscura es un proceso biológico anaerobio en el que microorganismos fermentativos degradan compuestos orgánicos, como carbohidratos o ácidos grasos, presentes en el agua residual. Durante la degradación, se libera hidrógeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos. Es una técnica de bajo costo y adecuada para efluentes con alto contenido de materia orgánica (como aquellos de industrias alimentarias, lácteas o del café). Aunque la conversión de sustrato a hidrógeno no es total, puede combinarse con otros procesos como la foto-fermentación para aumentar el rendimiento (Qyyum et al., 2022).

En la foto-fermentación intervienen bacterias fotosintéticas que utilizan la luz solar para convertir ácidos orgánicos en hidrógeno. A diferencia de la fermentación oscura, que no requiere luz, la foto-fermentación aprovecha los subproductos generados en ella (como el ácido acético o láctico) para continuar produciendo H_2 . La integración de ambas técnicas (fermentación oscura + foto-fermentación) permite un mayor aprovechamiento del carbono orgánico y mejora la eficiencia global del sistema biológico.

Las Celdas Microbianas de Electrólisis (MEC) combinan principios biológicos y electroquímicos. En ellas, los microorganismos oxidan la materia orgánica del agua residual y liberan electrones, los cuales se dirigen hacia el cátodo mediante un circuito externo. Con la aplicación de un pequeño voltaje adicional (menor al de la electrólisis convencional), los protones se reducen generando hidrógeno en el cátodo. Esta tecnología es eficiente energéticamente y adecuada para aguas residuales industriales biodegradables, ya que simultáneamente trata el efluente y produce energía limpia (Alqahtani, 2024).

La electrólisis AEL (Electrólisis alcalina) es uno de los métodos más antiguos y estudiados para la producción de hidrógeno. Se basa en el uso de una solución alcalina (KOH o NaOH) como electrolito, en la cual se aplica una corriente eléctrica que separa el agua en H_2 y O_2 . Los electrodos de níquel o acero inoxidable facilitan la reacción, generando hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo. Aunque requiere agua relativamente limpia, su bajo costo la hace viable para operar con aguas industriales previamente tratadas (Núñez et al., 2024).

La PEM (Electrólisis con Membrana de Intercambio Protónico) es un tipo de electrólisis que utiliza una membrana polimérica que permite el paso de protones (H^+) pero bloquea gases y electrones. Al aplicar corriente eléctrica, los protones se trasladan desde el ánodo hacia el cátodo, donde se combinan para formar H_2 . La tecnología PEM destaca por su alta pureza del hidrógeno, su capacidad de operar con energía renovable y su eficiencia superior (70–85 %), aunque su costo de materiales sigue siendo elevado (Merabet et al., 2024).

La electrólisis AEM (Electrólisis con Membrana de Intercambio Aniónico) es una tecnología emergente que combina ventajas de la AEL y la PEM. Emplea una membrana que conduce aniones (OH^-), lo que reduce el uso de metales preciosos y permite trabajar con aguas residuales con cierto nivel de conductividad. Esta técnica muestra un alto potencial para la

producción de hidrógeno verde a partir de efluentes industriales, al requerir menos agua purificada y ofrecer buena estabilidad operativa (Robin et al., 2025).

3. Metodología

3.1. Caracterización de aguas residuales industriales de Colombia

Inicialmente, se hizo una identificación y selección de los sectores industriales relevantes en Colombia con el fin de analizar la generación y caracterización de sus aguas residuales. Para ello, se empleó la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) como herramienta base de categorización, utilizando información oficial reportada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), lo que permitió seleccionar sectores industriales con alta representatividad en términos de producción y generación de aguas residuales. Las industrias seleccionadas fueron: café, caña de azúcar, aceite de palma, petróleo crudo, plásticos, pinturas, fertilizantes, ganadería (producción bovina), industria láctea, textiles, marroquinería, madera, papel, refinerías de petróleo, coquización y minería (oro, carbón, níquel y cobre).

Posteriormente, se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos científicas como Scopus y Web of Science, con el fin de recopilar información sobre los factores de generación de aguas residuales y la caracterización fisicoquímica de los efluentes para cada industria. La cantidad de agua residual generada se estimó mediante la multiplicación del factor de generación de aguas residuales ($\text{m}^3/\text{unidad de producción}$) por el volumen de producción anual reportado para cada sector industrial en Colombia, obteniendo así el volumen de agua residual generado en $\text{m}^3/\text{año}$.

Otras variables como la dispersión de la fuente de agua y el aporte de los sectores industriales al Producto Interno Bruto (PIB) del país fueron tomados de fuentes oficiales como el DANE y los Ministerios de Energía y Agricultura de Colombia. Para la caracterización del agua residual se tomaron como referencia los parámetros establecidos en el *Standard Methods for the*

Examination of Water and Wastewater (APHA) (American Public Health Association, 1999), considerando principalmente parámetros como pH, DQO, DBO, sólidos suspendidos, conductividad, aceites y grasas y metales.

Por otra parte, con el fin de identificar las industrias con mayor potencial para la producción de hidrógeno verde a partir de aguas residuales en Colombia, se aplicó una metodología de evaluación multicriterio basada en una matriz de ponderación. Para ello, se definieron cuatro criterios principales: disponibilidad de agua residual, calidad del agua residual, dispersión de la fuente e impacto económico de cada industria.

La disponibilidad de agua determina la cantidad de materia prima disponible para la producción de hidrógeno; la calidad del agua influye en el tipo de tratamiento requerido, en el porcentaje de rechazo del tratamiento y en la viabilidad de las tecnologías de producción de hidrógeno; la dispersión de la fuente representa la dificultad de recolección del agua residual; mientras que el impacto económico del sector industrial repercute en la viabilidad de implementación de tecnologías de aprovechamiento.

Para la evaluación de estos criterios se estableció una escala de calificación de 1 a 5, donde 1 corresponde a condiciones muy desfavorables y 5 a condiciones muy favorables para la producción de hidrógeno a partir de aguas residuales. Los rangos establecidos para cada criterio se definieron a partir de valores reportados en la literatura para aguas residuales industriales, volúmenes de producción industrial en Colombia y características de localización de las industrias, como se puede ver a en la Tabla 1.

Tabla 1. Escala de puntuación para la selección de industrias

Evaluación multicriterio para la selección de industrias	Puntaje	Nivel	Justificación
Disponibilidad de agua	5	Muy alta	> 100.000.000 (m ³ /año)
	4	Alta	50 – 100 millones (m ³ /año)
	3	Media	10 – 50 millones (m ³ /año)
	2	Baja	1 – 10 millones (m ³ /año)
	1	Muy baja	< 1 millón (m ³ /año)
Dispersión	5	Muy alta	Pocas plantas grandes o actividades muy concentradas; recolección fácil
	4	Alta	Concentración en ciertos núcleos industriales; recolección relativamente fácil
	3	Media	Distribución intermedia; recolección moderadamente compleja
	2	Baja	Muchas fuentes distribuidas regionalmente; recolección difícil
	1	Muy baja	Gran cantidad de unidades pequeñas y dispersas; recolección muy difícil
DQO (mg/L)	5	Muy alta	< 1.000
	4	Alta	1.000 – 5.000
	3	Media	5.000 – 10.000
	2	Baja	10.000 – 20.000
	1	Muy baja	> 20.000
pH	5	Muy alta	6.5 – 8.0
	4	Alta	6.0 – 8.5
	3	Media	5.0 – 9.0
	2	Baja	4.0 – 10.0
	1	Muy baja	< 4 o > 10
Sólidos SST (mg/L)	5	Muy alta	< 500
	4	Alta	500 – 1.000
	3	Media	1.000 – 3.000
	2	Baja	3.000 – 10.000
	1	Muy baja	> 10.000
Conductividad (μS/cm)	5	Muy alta	1.000 – 5.000
	4	Alta	5.000 – 8.000
	3	Media	8.000 – 15.000

Evaluación multicriterio para la selección de industrias	Puntaje	Nivel	Justificación
	2	Baja	15.000 – 20.000
	1	Muy baja	< 500 o > 20.000
Aporte al PIB (%)	5	Muy alta	> 5%
	4	Alta	3-5%
	3	Media	2-3%
	2	Baja	0,5-2%
	1	Muy baja	< 0%

Cada criterio fue clasificado en cinco niveles, desde muy bajo hasta muy alto, con el fin de evaluar de manera comparativa las diferentes industrias. En el caso de la disponibilidad de agua, se asignaron mayores puntajes a las industrias con mayor generación anual de aguas residuales, ya que esto representa una mayor disponibilidad de materia prima para la producción de hidrógeno. Para el criterio de dispersión, se asignaron mayores puntajes a las industrias cuyas fuentes de generación de aguas residuales se encuentran concentradas en pocas plantas o zonas industriales, ya que esto facilita su recolección y tratamiento.

En cuanto a la calidad del agua residual, se evaluaron principalmente parámetros como DQO, pH, sólidos suspendidos y conductividad, debido a que estos parámetros influyen directamente en el tipo de tratamiento requerido y en la viabilidad de las tecnologías de producción de hidrógeno. Finalmente, el impacto económico se evaluó con base en el aporte de cada sector industrial al PIB nacional, con el fin de priorizar industrias con mayor relevancia económica y mayor potencial de implementación de tecnologías de aprovechamiento de aguas residuales.

Posteriormente, a cada industria se le asignó un puntaje para cada criterio y se aplicó una ponderación para reflejar la importancia relativa de cada uno. Los criterios de calidad del agua e impacto económico se consideraron los más influyentes en la viabilidad del proceso, por lo que se les asignó un peso de 0,3 cada uno, mientras que los criterios de disponibilidad de agua y dispersión

de la fuente se ponderaron con un peso de 0,2 cada uno. A partir de esta ponderación se obtuvo una puntuación total para cada industria, lo que permitió clasificarlas e identificar aquellas con mayor potencial para la producción de hidrógeno verde a partir de aguas residuales industriales.

3.2. Criterios para la selección de técnicas de tratamiento de aguas residuales

Inicialmente, se establecieron los criterios técnicos para la selección de las tecnologías de tratamiento aplicables a las aguas residuales industriales previamente caracterizadas. El objetivo principal fue identificar las operaciones unitarias necesarias para acondicionar las características fisicoquímicas de cada tipo de efluente, de manera que el agua residual pudiera ser aprovechada posteriormente en procesos de producción de hidrógeno. Para ello, se realizó una revisión en bases de datos científicas ya mencionadas con el fin de identificar las tecnologías de tratamiento comúnmente en función de cada tipo de contaminante presente en el agua residual de cada sector.

Simultáneamente, las industrias fueron agrupadas en función del tipo de contaminante predominante en sus aguas residuales y de las operaciones unitarias requeridas para su tratamiento. Esta clasificación permitió definir trenes de tratamiento representativos para cada grupo de aguas residuales, evitando la repetición de esquemas de tratamiento similares para diferentes industrias y facilitando la elaboración de diagramas de proceso de bloques (PBD). De esta manera, se establecieron tres grupos principales: (i) aguas residuales con alto contenido de sólidos y materia orgánica, (ii) aguas residuales con presencia de aceites e hidrocarburos, y (iii) aguas residuales con presencia de metales, sales y compuestos químicos recalcitrantes. Para cada grupo se definió un tren de tratamiento general basado en las operaciones unitarias identificadas en la literatura.

Adicionalmente, se incorporó el concepto de porcentaje de rechazo asociado a cada tren de tratamiento, entendido como la fracción del volumen de agua residual que no es recuperada o tratada efectivamente durante el proceso, debido a pérdidas en lodos, generación de corrientes concentradas (como salmueras en procesos de membranas), evaporación o retención de agua en

sólidos. El porcentaje de rechazo se estimó a partir de valores reportados en la literatura para cada operación unitaria y tecnología de tratamiento, y posteriormente se utilizó para estimar el volumen de agua disponible después del tratamiento.

Finalmente, la selección de las tecnologías de tratamiento no solo se realizó con el objetivo de remover contaminantes, sino también de acondicionar el agua residual para su posterior aprovechamiento en la producción de hidrógeno. En este sentido, se priorizaron tratamientos que permitieran la remoción de compuestos inhibidores, como metales pesados y compuestos tóxicos, y que al mismo tiempo permitieran conservar o acondicionar la materia orgánica biodegradable cuando esta pudiera ser utilizada como sustrato en procesos biológicos de producción de hidrógeno, como la fermentación oscura o las celdas de electrólisis microbiana.

3.3. Análisis de la producción de hidrogeno a partir de aguas residuales

En esta sección se evaluó el potencial de producción de hidrógeno a partir de las aguas residuales industriales previamente caracterizadas y acondicionadas mediante los trenes de tratamiento definidos en la Sección 3.2. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos científicas especializadas con el fin de identificar las principales tecnologías empleadas para la producción de hidrógeno a partir de agua y aguas residuales.

Las tecnologías consideradas en este estudio incluyeron procesos biológicos y electroquímicos, tales como la fermentación oscura (Wang & Wan, 2009), las celdas de electrólisis microbiana (MEC) (Wrana et al., 2010) y la electrólisis del agua mediante tecnologías alcalina (AEL) (Zeng & Zhang, 2010), membrana de intercambio protónico (PEM) (Carmo et al., 2013) y membrana de intercambio aniónico (AEM) (Vincent & Bessarabov, 2018). Para cada una de estas tecnologías se analizaron sus principios de funcionamiento, condiciones de operación, rendimiento y requerimientos de calidad del agua.

La selección de la tecnología adecuada para cada tipo de agua residual se realizó con base en las características fisicoquímicas del efluente después del tratamiento, incluyendo la carga orgánica (DQO), el contenido de sólidos, la conductividad, la concentración de sales disueltas y la presencia de compuestos inhibidores. Adicionalmente, se utilizó como referencia la clasificación de calidad de agua establecida en la norma ASTM D1193 (ASTM International, 2018), la cual clasifica el agua en diferentes tipos según su grado de pureza, permitiendo relacionar la calidad del agua tratada con los requerimientos de cada tecnología de producción de hidrógeno.

Una vez seleccionada la tecnología más adecuada para cada industria, se procedió a estimar la cantidad potencial de hidrógeno que puede ser producida. Para ello, se utilizó como base el volumen anual de aguas residuales generado por cada industria (Sección 3.1) y el volumen de agua disponible después del tratamiento, calculado a partir del porcentaje de rechazo estimado para cada tren de tratamiento (Sección 3.2). Posteriormente, se emplearon valores de requerimiento de agua por kilogramo de hidrógeno producido ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg H}_2$), reportados en la literatura para cada tecnología, con el fin de estimar la producción potencial de hidrógeno mediante la relación entre el volumen de agua disponible y el requerimiento de agua de cada tecnología.

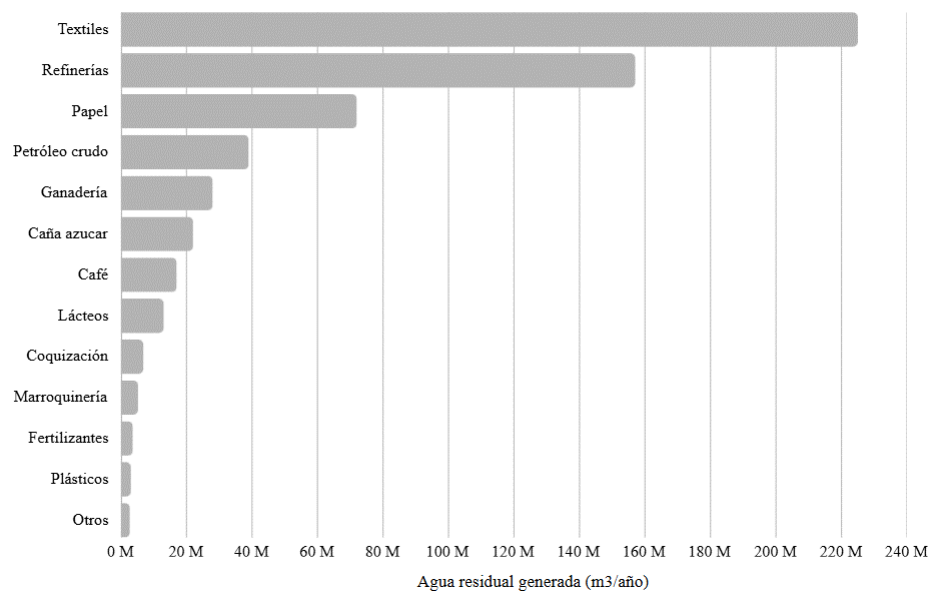
En el caso de la fermentación oscura, debido a que esta tecnología utiliza materia orgánica como sustrato, algunos estudios reportan el rendimiento en términos de cantidad de hidrógeno producido por cantidad de sustrato (por ejemplo, glucosa o DQO). Por esta razón, se realizó una aproximación del rendimiento en términos de agua residual tratada, con el fin de expresar todos los resultados en una misma unidad funcional ($\text{kg H}_2/\text{kg H}_2\text{O}$ o $\text{m}^3 \text{H}_2/\text{m}^3$ agua), permitiendo así la comparación entre tecnologías e industrias. Finalmente, a partir de estos cálculos, se estimó la producción potencial de hidrógeno para cada industria, lo que permitió comparar los diferentes sectores industriales en términos de su potencial de valorización energética a partir de sus aguas residuales.

4. Resultados

4.1. Caracterización de aguas residuales industriales de Colombia

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la caracterización de las aguas residuales industriales en Colombia y al análisis de los criterios utilizados para identificar las industrias con mayor potencial para la producción de hidrógeno verde. En primer lugar, se analiza la disponibilidad de agua residual generada por los diferentes sectores industriales en Colombia, la cual constituye un parámetro fundamental, ya que el volumen de agua generado por cada sector industrial determina, en primera instancia, el potencial teórico de producción de hidrógeno. A mayor disponibilidad de agua residual, mayor es la cantidad de materia prima que puede ser sometida a procesos de tratamiento y posteriormente a tecnologías de producción de hidrógeno. Por esta razón, se realizó una estimación de la cantidad anual de aguas residuales generadas por las principales industrias en Colombia, con el fin de establecer una comparación entre sectores y determinar cuáles presentan una mayor disponibilidad de recurso hídrico residual.

Figura 1. Disponibilidad de aguas residuales generadas.



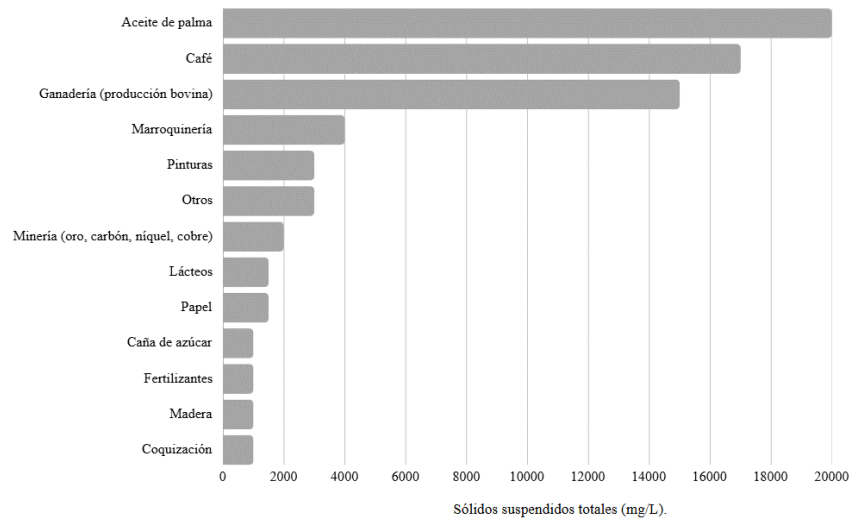
A partir de los resultados obtenidos, se observa que las industrias textiles, de refinerías de petróleo y de papel presentan la mayor generación de aguas residuales en Colombia, lo que concuerda con otras publicaciones (Robin et al., 2025) (Quintero et al., 2023). Esto sugiere que estas industrias poseen una mayor disponibilidad de agua residual, lo que representa una ventaja desde el punto de vista de la producción de hidrógeno, debido a que el volumen de agua disponible influye directamente en la capacidad de producción del proceso.

En un segundo grupo se encuentran industrias como petróleo crudo, ganadería, caña de azúcar y café, las cuales presentan volúmenes intermedios de generación de aguas residuales, lo que indica que también podrían considerarse como fuentes potenciales para la producción de hidrógeno, especialmente si sus características fisicoquímicas resultan favorables para los procesos de tratamiento y acondicionamiento del agua. Finalmente, industrias como lácteos, coquización, marroquinería, fertilizantes, plásticos, aceite de palma y otros sectores presentan menores volúmenes de agua residual generada. No obstante, la selección de las industrias con mayor potencial no debe basarse únicamente en la cantidad de agua residual, sino también en otros criterios como la calidad del agua, ya que esta determina el tipo de tratamiento requerido antes de su utilización en los procesos de producción de hidrógeno.

Dentro de los parámetros fisicoquímicos analizados, se analizaron la demanda química de oxígeno (DQO), el pH, la conductividad y por último los sólidos suspendidos totales (SST) que representan una de las características más relevantes, además se seleccionó como parámetro representativo de la calidad del agua residual (ver Figura 2), debido a que están directamente relacionados con la presencia de materia orgánica, partículas en suspensión y otros contaminantes que pueden afectar los procesos de tratamiento y la operación de los sistemas utilizados para la producción de hidrógeno. Altas concentraciones de SST pueden generar problemas de

sedimentación, obstrucción de tuberías, incrustaciones en equipos y disminución de la eficiencia en los procesos electroquímicos y biológicos (Sánchez et al., 2014).

Figura 2. *Sólidos suspendidos totales en las aguas residuales industriales.*



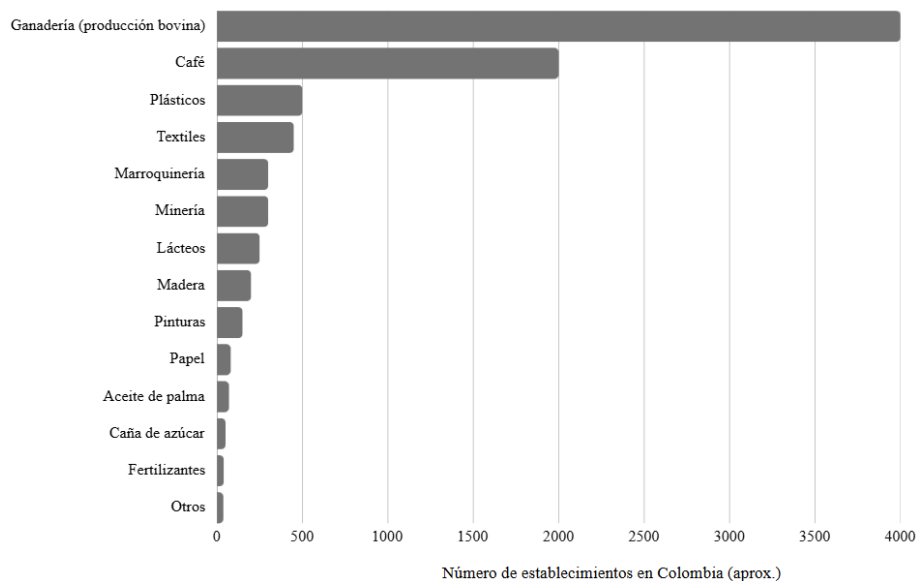
A partir de los resultados obtenidos, se observa que las industrias de aceite de palma, café y ganadería presentan las mayores concentraciones de sólidos suspendidos totales, lo que indica una alta presencia de materia en suspensión y, por lo tanto, la necesidad de aplicar tratamientos primarios más rigurosos antes de su utilización en procesos de producción de hidrógeno. Después se encuentran, industrias como lácteos, papel, caña de azúcar, fertilizantes, madera y coquización presentan menores concentraciones de SST, lo que representa una ventaja, ya que requerirían procesos de acondicionamiento menos complejos. Por último, sectores como marroquinería, pinturas y minería presentan concentraciones intermedias, por lo que sus requerimientos de tratamiento serían moderados.

Estos resultados evidencian como la calidad del agua residual varía significativamente entre industrias, por lo que el tipo de tratamiento requerido depende directamente de la concentración de contaminantes presentes en el agua residual, lo cual influye directamente en la viabilidad técnica y económica del proceso de producción de hidrógeno.

La dispersión geográfica de las industrias mostrada en la Figura 3 representa un factor importante en la evaluación del potencial de aprovechamiento de las aguas residuales, ya que influye directamente en la facilidad de recolección y transporte del agua generada. Industrias altamente concentradas en zonas específicas facilitan la implementación de sistemas de tratamiento centralizados, mientras que industrias con alta dispersión geográfica dificultan la recolección del agua residual y pueden incrementar los costos de operación.

Con base en los resultados presentados, los cuales fueron estimados a partir del número aproximado de unidades productivas por sector en Colombia (DANE, 2023b), se observa que las industrias con mayor dispersión geográfica son la ganadería y la industria del café. Esto se debe a que estas actividades se desarrollan en un gran número de unidades productivas distribuidas en diferentes regiones del país. Esta alta dispersión geográfica representa una limitación para la recolección y el transporte de las aguas residuales generadas, lo que puede incrementar los costos asociados a la implementación de sistemas de tratamiento y, en consecuencia, afectar la viabilidad de la producción de hidrógeno.

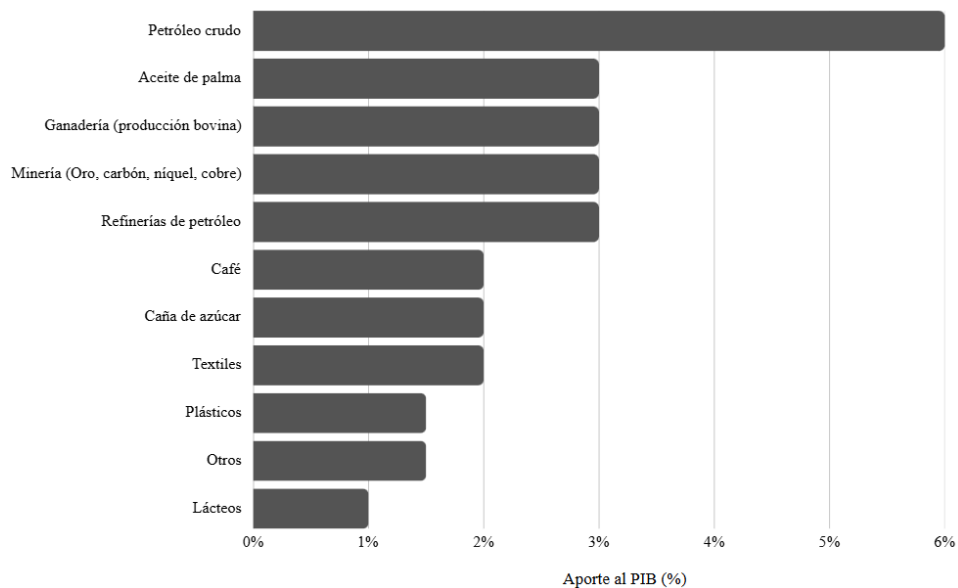
Figura 3. Dispersión geográfica de las industrias analizadas.



Por otro lado, industrias como refinerías de petróleo (otros), papel, pinturas, madera, fertilizantes y aceite de palma presentan una menor dispersión geográfica, ya que la producción se concentra en un menor número de plantas industriales. Esta característica facilita la implementación de sistemas de tratamiento centralizados, lo que representa una ventaja desde el punto de vista logístico y económico. Por lo tanto, la dispersión geográfica de las industrias es un criterio importante en la selección de sectores con potencial para la producción de hidrógeno, ya que afecta en la viabilidad de su recolección, transporte y tratamiento a escala industrial.

Finalmente, el impacto económico del sector industrial representa un factor importante en la evaluación del potencial de aprovechamiento de las aguas residuales, pues permite identificar aquellos sectores que tienen mayor relevancia dentro de la economía nacional, lo que puede favorecer la viabilidad técnica y económica de implementar tecnologías de tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales para la producción de hidrógeno verde.

Figura 4. Aporte al PIB de las industrias analizadas en Colombia.



Con base en los resultados presentados en la Figura 4, se observa que sectores como el petróleo crudo, el aceite de palma, la ganadería, la minería y las refinerías de petróleo presentan un

mayor aporte al Producto Interno Bruto (PIB) (DANE, 2023c) nacional en comparación con otros sectores industriales analizados. Esto indica que estos sectores tienen una alta relevancia dentro de la economía del país, lo que podría favorecer la implementación de tecnologías de tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales, debido a que son sectores con mayor capacidad de inversión y desarrollo tecnológico.

Por otro lado, sectores como café, caña de azúcar, textiles, plásticos y lácteos presentan un menor aporte al PIB en comparación con los sectores anteriormente mencionados. Sin embargo, estos sectores siguen siendo importantes a nivel nacional, especialmente en el caso de las agroindustrias, debido a su impacto social, generación de empleo y presencia en diferentes regiones del país. Se puede considerar entonces el impacto económico del sector industrial un criterio relevante en la selección de industrias con potencial para la producción de hidrógeno, ya que sectores con mayor participación en la economía nacional podrían presentar mayores facilidades para la implementación de tecnologías de aprovechamiento de aguas residuales a escala industrial.

Después de estudiar y seleccionar los criterios que se consideraron importantes para tener en cuenta, se procedió a integrarlos mediante un método de ponderación con el fin de identificar las industrias con mayor potencial para el aprovechamiento de sus aguas residuales en la producción de hidrógeno verde. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos a partir de la ponderación de cada uno de los criterios evaluados para las industrias analizadas.

Como se puede apreciar anteriormente, las industrias seleccionadas según la ponderación teniendo en cuenta los 4 criterios, corresponden a la del petróleo crudo, refinerías de petróleo, caña de azúcar, aceite de palma y coquización, las cuales representan distintos escenarios en términos de carga contaminante, biodegradabilidad y potencial de aprovechamiento para la producción de hidrógeno. A continuación, se presenta la caracterización de cada una de estas industrias, acompañada de tablas que resumen los principales parámetros de calidad del agua, organizados de

acuerdo con la clasificación establecida por APHA (American Public Health Association, 1999) y otras clasificaciones tenidas en cuenta.

Tabla 2. Método de ponderación aplicado a las industrias.

MÉTODO PONDERACIÓN					
Ponderación	0,2	0,3	0,2	0,3	1,0
Industria	Agua residual generada (m3/año)	Calidad	Dispersión	Impacto económico	Ponderación
petróleo crudo	2	4	3	5	3,7
Refinerías de petróleo	1	4,25	5	4	3,675
Caña de azúcar	4	3,5	4	3	3,55
Aceite de palma	5	2	3	4	3,4
Coquización	3	3,5	4	2	3,05
Ganadería (producción bovina)	3	3,25	1	4	2,975
Plásticos	1	4,5	4	2	2,95
Café	5	2,5	1	3	2,85
Fertilizantes (80 al 90% se importa)	3	3	5	1	2,8
Lácteos	3	3,25	3	2	2,775
Papel	2	3,25	4	2	2,775
Minería (Oro, carbón, níquel y cobre)	2	2,5	2	4	2,75
Madera	3	3,75	2	2	2,725
Textiles	1	3,25	3	3	2,675
Pinturas	2	3,25	4	1	2,475
Marroquinerías	2	2	2	1	1,7

Como se mencionó, la industria de petróleo crudo es la primera en la ponderación, esta genera aguas residuales principalmente provenientes de aguas de producción, lavado y procesos de separación de hidrocarburos. Estas aguas se caracterizan por la presencia de aceites y grasas, sólidos suspendidos, sales disueltas, materia orgánica y metales pesados, lo que les confiere una carga contaminante significativa.

En la Tabla 3 se presenta la caracterización fisicoquímica típica de este tipo de agua residual, con el fin de identificar los parámetros más relevantes desde el punto de vista de su tratamiento y su posible aprovechamiento en procesos de producción de hidrógeno. Desde el punto

de vista del aprovechamiento para la producción de hidrógeno, la presencia de materia orgánica, representada por la DQO (300–1.200 mg/L) y la DBO₅ (150–350 mg/L), indica que este efluente puede ser utilizado como sustrato en procesos biológicos (Diya'Uddeen et al., 2011). Sin embargo, la presencia de aceites, grasas y metales puede inhibir estos procesos, por lo que es necesario un pretratamiento fisicoquímico previo.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de aguas residuales en la industria del petróleo.

Físicas	Temperatura	30–60 °C
	Color	grisáceo a marrón oscuro
	Turbidez	50–400 NTU
	Conductividad	1.000–10.000 μS/cm
	Sólidos	SST 50–600 mg/L; SDT 1.000–35.000 mg/L
Químicas	pH	6.0–10.0
	DBOs	DBOs: DBO ₅ 150–350 mg/L
	DQO	DQO: 300–1.200 mg/L
	Alcalinidad	100–500 mg/L como CaCO ₃
	Dureza	200–2.000 mg/L como CaCO ₃
	Nutrientes(N,P)	TKN 10–50 mg/L; NH ₃ -N 5–40 mg/L; fósforo total 1–10 mg/L
	Aceites y grasas	50–300 mg/L
	Metales	Fe 0.5–10 mg/L; Zn 0.1–5 mg/L; Ni 0.05–2 mg/L; Cr 0.05–1 mg/L; Pb < 1 mg/L

De manera similar a la industria de petróleo crudo, las refinerías de petróleo generan aguas residuales con presencia de hidrocarburos, aceites y compuestos orgánicos; sin embargo, en este caso el agua residual no proviene de los yacimientos, sino de los procesos de refinación, tales como destilación, craqueo, reformado, enfriamiento y lavado de equipos. Debido a la variedad de procesos involucrados en la refinación, la composición del agua residual puede ser variable, incluyendo hidrocarburos disueltos, aceites y grasas, compuestos fenólicos, sulfuros, sólidos suspendidos y metales. A continuación, en la Tabla 4 se presentan los principales parámetros fisicoquímicos reportados para las aguas residuales generadas en refinerías de petróleo.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en refinerías de petróleo.

Físicas	Temperatura	30–55 °C
	Color	Gris oscuro a marrón
	Turbidez	50–300 NTU
	Conductividad	1.000–10.000 μ S/cm
	Sólidos	SST 30–500 mg/L; SDT 1.000–20.000 mg/L
Químicas	pH	6.0–9.5
	DBOs	100–300 mg/L
	DQO	300–1.200 mg/L
	Alcalinidad	100–500 mg/L como CaCO ₃
	Dureza	200–1.500 mg/L como CaCO ₃
	Nutrientes(N,P)	TKN 10–50 mg/L; NH ₃ -N 5–40 mg/L; Fósforo total 1–10 mg/L
	Aceites y grasas	10–150 mg/L
	Metales	Fe 0.5–10 mg/L; Zn 0.1–5 mg/L; Ni 0.05–2 mg/L; Cr 0.05–1 mg/L

Como muestra la tabla, la presencia de materia orgánica en este tipo de efluentes, representada por la DQO y la DBO₅, indica que estas aguas residuales pueden ser tratadas mediante procesos biológicos y, a su vez, podrían ser aprovechadas como sustrato en procesos de producción de hidrógeno (Kushwaha, 2015). No obstante, al igual que en las aguas residuales de petróleo crudo (Diya'Uddeen et al., 2011), la presencia de aceites, compuestos tóxicos y metales puede generar inhibición en los procesos biológicos, por lo que se requiere la aplicación de tratamientos previos, principalmente de tipo físico y fisicoquímico, antes de su aprovechamiento.

A diferencia de las aguas residuales generadas en las industrias del petróleo, las cuales contienen principalmente hidrocarburos, aceites y compuestos tóxicos, las aguas residuales de la industria de la caña de azúcar se caracterizan por presentar una alta concentración de materia orgánica biodegradable (Kushwaha, 2015). Estas aguas residuales se generan principalmente durante las etapas de lavado de la caña, extracción del jugo, clarificación y procesos de limpieza de equipos, lo que da lugar a efluentes con alto contenido de azúcares, materia orgánica disuelta y sólidos suspendidos. Dichas características se encuentran especificadas a continuación:

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en las industrias de caña de azúcar.

Físicas	Temperatura	hasta 63 °C
	Conductividad	1.000–2.500 μ S/cm
	Sólidos	Sólidos suspendidos (SST): 800–3.000 mg/L Sólidos totales (TS): 6.062 \pm 62 mg/L Sólidos suspendidos totales (TSS): 5–9.212 mg/L Sólidos suspendidos volátiles (VSS): 335 \pm 7 mg/L
Químicas	pH	pH: 4.5–6.8 pH: 4.5–10
	DBOs	DBOs: 1.200–4.800 mg/L; 60–5.103 mg/L
	DQO	DQO: 2.500–9.000 mg/L; 110–12.211 mg/L
	Dureza	hasta 2.460 mg/L
	Nutrientes(N,P)	TKN 15–40 mg/L; TP 1.3–12 mg/L
	Aceites y grasas	hasta 118 mg/L
	Metales	Zn ²⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺ , Mn ²⁺ , Pb ²⁺ , Cd ²⁺ , Cr ³⁺ , Fe ²⁺

Los valores de DQO (2.500–9.000 mg/L) y DBO₅ (1.200–4.800 mg/L) reportados para este tipo de agua residual indican una alta carga orgánica y una alta biodegradabilidad, lo que hace que este efluente sea especialmente adecuado para tratamientos biológicos, como digestión anaerobia o fermentación oscura, procesos en los cuales la materia orgánica puede ser aprovechada para la producción de hidrógeno. Sin embargo, la presencia de sólidos suspendidos y las variaciones de pH pueden requerir tratamientos preliminares como sedimentación, neutralización y filtración antes de su tratamiento biológico.

Al igual que la industria de la caña de azúcar, la industria del aceite de palma genera aguas residuales con una alta carga de materia orgánica biodegradable. Estas aguas residuales, conocidas como POME (Palm Oil Mill Effluent), se generan principalmente durante los procesos de esterilización, prensado, clarificación y lavado del fruto de palma, y se caracterizan por contener altas concentraciones de sólidos, aceites y materia orgánica. Lo mencionado se representa de manera detallada en la siguiente Tabla:

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en la industria de aceite de palma.

Físicas	Temperatura	70–80 °C
	Conductividad	3.000–8.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	Sólidos	Sólidos totales 40.000–60.000 mg/L; sólidos suspendidos totales 15.000–25.000 mg/L
Químicas	pH	3.5–5.0
	DBOs	DBOs: DBO ₅ 15.000–30.000 mg/L
	DQO	DQO: 40.000–70.000 mg/L
	Nutrientes(N,P)	nitrógeno total 200–750 mg/L; fósforo total 100–180 mg/L
	Aceites y grasas	2.000–7.000 mg/L

Los valores de DQO (40.000–70.000 mg/L) y DBO₅ (15.000–30.000 mg/L) indican que este tipo de agua residual presenta una carga orgánica muy alta y una elevada biodegradabilidad (Latif Ahmad et al., 2003), lo que la hace especialmente adecuada para tratamientos biológicos anaerobios y procesos de fermentación oscura para la producción de hidrógeno. Sin embargo, la alta concentración de sólidos, aceites y grasas puede dificultar algunos procesos biológicos, por lo que generalmente se requieren tratamientos preliminares como sedimentación, enfriamiento y separación de aceites antes de su tratamiento biológico.

En cuanto a las aguas residuales generadas en la industria de coquización provienen principalmente de los procesos de enfriamiento del coque, lavado de gases y recuperación de subproductos del proceso de carbonización del carbón. Estas aguas residuales se caracterizan por contener altas concentraciones de materia orgánica, compuestos fenólicos, amonio, aceites, sólidos suspendidos y metales, lo que les confiere una alta carga contaminante y una composición compleja, dichas características se pueden ver en la siguiente Tabla 7.

A diferencia de las aguas residuales de industrias agroindustriales como la caña de azúcar y el aceite de palma, en las cuales la materia orgánica es fácilmente biodegradable, las aguas residuales de coquización contienen compuestos orgánicos tóxicos que pueden inhibir los procesos

biológicos. Sin embargo, los valores de DQO (2.000–8.000 mg/L) y DBO₅ (1.000–3.000 mg/L) indican que existe una cantidad considerable de materia orgánica (Chang et al., 2008) que podría ser aprovechada en procesos de producción de hidrógeno, siempre y cuando se implementen tratamientos previos para la remoción de compuestos tóxicos como fenoles y amonio.

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales en la industria de coquización.

Físicas	Temperatura	30–60 °C
	Color	Marrón oscuro a negro
	Turbidez	200–1.500 NTU
	Conductividad	2.000–15.000 μS/cm
	Sólidos	SST 200–2.000 mg/L; SDT 3.000–20.000 mg/L
Químicas	pH	6.5–9.0
	DBOs	1.000–3.000 mg/L
	DQO	2.000–8.000 mg/L
	Alcalinidad	500–3.000 mg/L como CaCO ₃
	Dureza	200–1.000 mg/L como CaCO ₃
	Nutrientes(N,P)	TKN 200–800 mg/L; NH ₃ -N 100–500 mg/L; Fósforo total 5–50 mg/L
	Aceites y grasas	50–300 mg/L
Metales	Fe 1–20 mg/L; Zn 0.5–5 mg/L; Ni 0.1–2 mg/L; Cr 0.1–3 mg/L	

Es importante mencionar que, aunque en esta sección se realizó el análisis detallado de las cinco industrias seleccionadas mediante el método de ponderación, el presente estudio incluyó la caracterización fisicoquímica de otras industrias relevantes. Con el fin de no extender excesivamente el documento principal, la información correspondiente a la caracterización de las demás industrias analizadas se presenta en el Anexo 1, donde se incluyen las tablas con los parámetros físicos y químicos de cada uno de los efluentes industriales estudiados. Esta información complementaria permite tener una visión más amplia de las características de las aguas residuales industriales y su posible aprovechamiento en procesos de producción de hidrógeno.

4.2. Criterios para la selección de técnicas de tratamiento de aguas residuales

A partir de la revisión se identificaron las principales operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento de aguas residuales industriales, tales como tamizado, sedimentación, ecualización, neutralización, coagulación–floculación, flotación por aire disuelto (DAF), separación de aceites (API), filtración, precipitación química, procesos biológicos, adsorción con carbón activado, oxidación avanzada y procesos de separación por membranas.

Con base en la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales industriales presentada en la sección anterior, se seleccionaron las técnicas de tratamiento más adecuadas para cada tipo de efluente, considerando principalmente la naturaleza de los contaminantes presentes, como sólidos suspendidos, aceites y grasas, materia orgánica biodegradable, compuestos tóxicos, metales disueltos y sales. Dado que el tratamiento depende principalmente de las características del agua residual y no del tipo de industria, las industrias se agruparon según las características predominantes de sus efluentes, lo que permitió identificar procesos de tratamiento similares y definir diagramas de proceso de bloques (PBD) representativos para cada grupo.

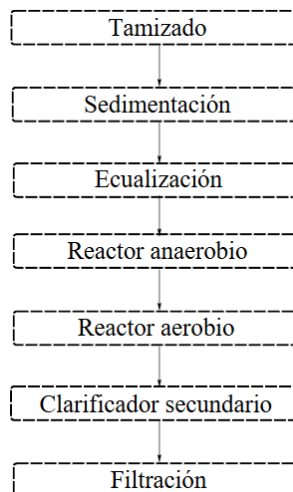
De esta manera, las aguas residuales industriales se clasificaron en tres grupos: (i) aguas con alta carga orgánica y sólidos suspendidos, (ii) aguas con presencia de aceites, grasas e hidrocarburos y (iii) aguas con presencia de compuestos químicos, metales y alta conductividad. Para cada grupo se seleccionó una industria representativa, cuyo proceso de tratamiento se describe mediante un diagrama de bloques aplicable a otras industrias con características similares.

El primer grupo corresponde a las aguas residuales con alta carga orgánica y sólidos suspendidos, las cuales se generan principalmente en industrias agroindustriales donde el agua es utilizada en procesos de lavado, extracción y transformación de materia prima de origen vegetal o animal. Dentro de este grupo se encuentran industrias como café, caña de azúcar, aceite de palma, lácteos, ganadería y bebidas, cuyas aguas residuales se caracterizan por presentar altos valores de

DQO y DBO, así como una elevada concentración de sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable.

Por ende, el tratamiento de este tipo de aguas residuales se basa principalmente en la remoción de sólidos y en la degradación biológica de la materia orgánica. En este estudio se seleccionó la industria de caña de azúcar como industria representativa de este grupo, ya que su agua residual presenta características típicas de efluentes con alta carga orgánica, por lo que el tren de tratamiento utilizado en esta industria puede ser aplicado, con ligeras variaciones, a otras industrias pertenecientes a este mismo grupo (El-Gohary et al., 2009). Teniendo en cuenta lo anterior, el tratamiento de las aguas residuales de la industria de caña de azúcar inicia con operaciones de pretratamiento físico como tamizado y sedimentación (ver Figura 5), las cuales permiten remover sólidos gruesos y material sedimentable.

Figura 5. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento para la de caña de azúcar.



Posteriormente, el agua es sometida a un proceso de ecualización con el fin de homogenizar el caudal y la carga contaminante. Luego, se aplica un tratamiento biológico, generalmente de tipo anaerobio, para la remoción de la materia orgánica biodegradable, seguido de un tratamiento aerobio y una etapa de clarificación secundaria para la separación de lodos. Finalmente, el efluente

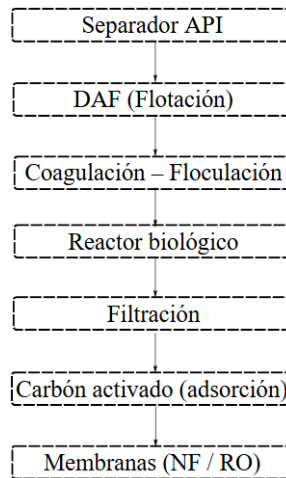
puede pasar por un tratamiento terciario, como filtración, dependiendo de la calidad de agua requerida para su posterior aprovechamiento.

El segundo grupo corresponde a las aguas residuales con presencia de aceites, grasas e hidrocarburos, las cuales se generan principalmente en industrias relacionadas con el procesamiento de petróleo, refinación, coquización y algunas industrias como marroquinerías, donde se emplean grasas y compuestos orgánicos en los procesos productivos. Estas aguas residuales se caracterizan por la presencia de aceites libres, emulsiones de aceite en agua, hidrocarburos disueltos, compuestos fenólicos, sulfuros y, en algunos casos, amoníaco, lo que dificulta su tratamiento mediante procesos biológicos directos.

El tratamiento de este tipo de aguas residuales requiere, en primer lugar, la remoción de aceites y grasas mediante procesos de separación física, seguida de procesos fisicoquímicos para la remoción de emulsiones y compuestos coloidales, y posteriormente un tratamiento biológico para la degradación de la materia orgánica disuelta. Para el PBD se seleccionó la industria de refinería de petróleo como industria representativa de este grupo, ya que presenta un tren de tratamiento típico que puede ser aplicado, con algunas variaciones, a otras industrias con presencia de aceites, grasas e hidrocarburos.

El proceso para tratar las aguas residuales de refinería de petróleo (Royle & Willoughby, 2011) inicia con un proceso de separación primaria de aceites libres mediante un separador API (ver Figura 6), el cual permite remover los hidrocarburos que se encuentran en forma de fase libre. Posteriormente, el efluente pasa a un sistema de flotación por aire disuelto (DAF), donde se remueven aceites emulsificador y sólidos suspendidos finos.

Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento para la refinación de petróleo.



Luego, el agua es sometida a un proceso de coagulación–floculación, con el fin de remover materia coloidal y compuestos difíciles de separar por métodos físicos. Después de los procesos fisicoquímicos, el efluente es tratado biológicamente, generalmente mediante lodos activados o reactores aerobios, para la remoción de la materia orgánica disuelta. Posteriormente, el agua pasa por un proceso de filtración para la remoción de sólidos finos y, como etapa de tratamiento avanzado, puede incluir procesos de adsorción con carbón activado y separación por membranas, como nanofiltración u ósmosis inversa parcial, con el fin de reducir la concentración de compuestos orgánicos disueltos, sales y otros contaminantes remanentes, obteniendo así un efluente con menor concentración de contaminantes y apto para su posible reutilización o tratamiento posterior.

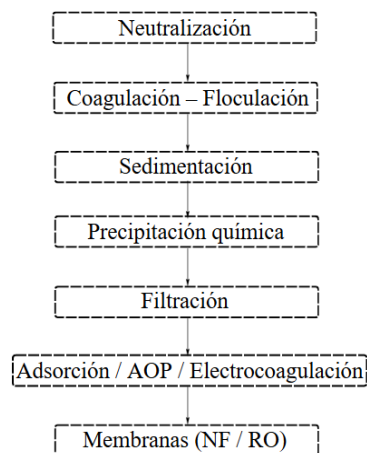
El tercer grupo corresponde a las aguas residuales con presencia de compuestos químicos, metales disueltos y alta conductividad, las cuales se generan principalmente en industrias como textiles, plásticos, pinturas, fertilizantes, papel, farmacéutica y minería. Estas aguas residuales se caracterizan por presentar compuestos de difícil degradación biológica, como colorantes, solventes, compuestos químicos sintéticos, metales pesados y altas concentraciones de sales disueltas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el tratamiento incluye principalmente procesos de neutralización, precipitación química, coagulación–floculación, sedimentación, filtración y

procesos de tratamiento avanzado como adsorción, oxidación avanzada o separación por membranas, con el fin de remover compuestos químicos, metales disueltos, colorantes y sales presentes en el efluente. Para esta sección se seleccionó la industria textil como industria representativa de este grupo, ya que su agua residual presenta características típicas de efluentes con presencia de colorantes, compuestos químicos y alta conductividad (Z. Dong et al., 2019), por lo que el tren de tratamiento utilizado en esta industria puede ser aplicado, con algunas variaciones, a otras industrias pertenecientes a este mismo grupo, como fertilizantes, marroquinería y minería.

Para la industria textil, el tratamiento inicia con un proceso de neutralización para ajustar el pH del efluente y favorecer los procesos posteriores de remoción de contaminantes. Posteriormente, el agua es sometida a un proceso de coagulación–floculación, seguido de una etapa de sedimentación, donde se remueven sólidos suspendidos, colorantes y parte de los metales presentes. El proceso se resume en la Figura 7.

Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento para la industria textil.



Posteriormente, el efluente puede pasar por un proceso de precipitación química o ajuste de pH dirigido para la remoción de metales disueltos. Después, el agua es sometida a un proceso de filtración para remover sólidos finos y, como etapa de tratamiento avanzado, puede incluir procesos de adsorción con carbón activado, oxidación avanzada o electrocoagulación, y finalmente procesos

de separación por membranas, como nanofiltración u ósmosis inversa, para reducir la concentración de sales disueltas, conductividad y compuestos orgánicos recalcitrantes.

Por último, con el fin de resumir las operaciones unitarias y procesos de tratamiento utilizados en las diferentes industrias analizadas, se elaboraron tablas resumen en las cuales se presentan las principales etapas de tratamiento empleadas en cada tipo de agua residual industrial. Debido a que las características de las aguas residuales varían significativamente entre las agroindustrias y las industrias de tipo químico e industrial, las operaciones unitarias se organizaron en dos grupos: agroindustrias (Tabla 8) y las no-agroindustrias (Tabla 9), con el fin de facilitar el análisis y la comparación de los procesos de tratamiento utilizados en cada caso.

Tabla 8. Matriz de las operaciones utilizadas en el tratamiento de aguas residuales agroindustriales.































































































































Operación / Industria	Café	Caña Azucar	Aceite Palma	Ganadería	Lácteos	Fertilizantes	Madera
Rejas / Tamizado							
Desarenado							
Sedimentación primaria							
Ecualización							
Enfriamiento							
Trampa de grasas							
DAF							
Coagulación–floculación							
Precipitación química							
Ajuste de pH							
Filtración							
Separador API							
Oxidación avanzada							
Electrocoagulación							
Intercambio iónico							
Nanofiltración							
Ósmosis inversa							
Stripping							
Tratamiento anaerobio							
Tratamiento aerobio							
Digestión anaerobia							

Tabla 9. Matriz de las operaciones empleadas en el tratamiento de aguas residuales no-agroindustriales.

Operación / Industria	Petróleo crudo	Plásticos	Pinturas	Textiles	Marroquinería	Papel	Refinería	Coquización	Minería
Rejas / Tamizado									
Desarenado									
Sedimentación primaria									
Ecualización									
Enfriamiento									
Trampa de grasas									
DAF									
Coagulación-floculación									
Precipitación química									
Ajuste de pH									
Filtración									
Separador API									
Oxidación avanzada									
Electrocoagulación									
Intercambio iónico									
Nanofiltración									
Ósmosis inversa									
Stripping									
Tratamiento anaerobio									
Tratamiento aerobio									
Digestión anaerobia									

Algo adicional que se requería era saber que cantidad de agua se desechaba debido a diferentes factores como por ejemplo los contaminantes difíciles de separar de estas aguas, en base a esto teniendo en cuenta cada una de las tecnologías de tratamiento identificadas para cada uno de los sectores industriales (ver Tabla 8), se estimó el porcentaje de agua residual que no es recuperada durante dichos procesos, denominado como porcentaje de rechazo.

Tabla 10. Porcentaje estimado de rechazo de agua residual.

Industria	% Rechazo estimado (%)
Café	3 – 8%
Caña de azúcar	5 – 12%
Aceite de palma	8 – 15%
Petróleo crudo	15 – 30%
Plásticos	5 – 15%
Pinturas	10 – 25%
Fertilizantes	15 – 35%
Ganadería	2 – 6%
Lácteos	5 – 10%
Textiles	15 – 30%
Marroquinería	20 – 40%

Industria	% Rechazo estimado (%)
Madera	2 – 8%
Papel	5 – 12%
Refinerías	15 – 35%
Coquización	20 – 40%
Minería	10 – 30%

Este parámetro considera las pérdidas asociadas a la generación de lodos, corrientes concentradas y limitaciones propias de cada operación unitaria (Bhandari & Ranade, 2014). Dado que este valor depende directamente de las tecnologías empleadas y no es reportado de forma específica por industria, se realizó una estimación a partir de rangos típicos encontrados en la literatura para los tratamientos más representativos de cada sector.

Finalmente, es importante mencionar que en esta sección se presentaron únicamente los trenes de tratamiento representativos para cada grupo de aguas residuales industriales. Los procesos de tratamiento específicos para las demás industrias analizadas en este estudio se presentan de manera detallada mediante tablas en el Anexo 2, donde se incluyen las operaciones unitarias requeridas para el acondicionamiento de cada tipo de agua residual y la explicación de cada etapa de este tratamiento.

4.3. Análisis de la producción de hidrogeno a partir de aguas residuales

Con base en las características fisicoquímicas del agua esperadas después del tratamiento, (i.e., DQO, SST, conductividad y concentración de sales disueltas, entre otras), se estableció que las tecnologías biológicas, como la fermentación oscura y las celdas de electrólisis microbiana, son más adecuadas para aguas residuales con alta carga orgánica biodegradable, ya que utilizan la materia orgánica como sustrato para la producción de hidrógeno. Por otro lado, las tecnologías de electrólisis convencional (AEL, PEM y AEM) requieren aguas con mayor grado de pureza y baja

conductividad de contaminantes, por lo que es necesario aplicar tratamientos más avanzados, como filtración, adsorción y procesos de membranas, antes de su utilización.

En la Tabla 11 se presentan las tecnologías de producción de hidrógeno analizadas, el tipo de agua requerido según la norma ASTM D1193 (ASTM International, 2018) y el rendimiento expresado como la cantidad de agua necesaria para producir 1 kg de hidrógeno.

Tabla 11. *Requerimientos de calidad de agua y rendimiento.*

Tecnología	Tipo de agua requerido	Rendimiento
Fermentación oscura	No aplica ASTM (agua residual)	50 kg agua/kg H ₂
MEC	Tipo III – IV (dependiendo tratamiento)	40 kg agua/kg H ₂
AEL	Tipo II	10 – 15 kg agua/kg H ₂
AEM	Tipo II	10 – 15 kg agua/kg H ₂
PEM	Tipo I	10 – 15 kg agua/kg H ₂

Asimismo, se observa que las tecnologías que requieren agua de mayor pureza, como la electrólisis (IEA, 2019) tipo PEM, AEM y AEL, requieren entre 10 a 15 kg de agua por kg de hidrógeno producido, mientras que tecnologías como la fermentación oscura (Mehmeti et al., 2018) y las celdas de electrólisis microbiana (X. Dong et al., 2024) pueden trabajar con aguas residuales o aguas con menor grado de tratamiento, aunque requieren una mayor cantidad de agua por kg de hidrógeno producido.

Una vez identificados los requerimientos de agua para cada tecnología, se estimó la cantidad de hidrógeno que puede producirse a partir del volumen de agua residual generado por cada industria, como se aprecia en la Tabla 12, considerando el porcentaje de rechazo del tratamiento y el volumen de agua disponible después del tratamiento.

Tabla 12. Estimación del potencial de producción de hidrógeno.

Industria	Agua residual generada (m ³ /año)	% Rechazo estimado promedio (%)	H ₂ O después del tratamiento (m ³)	Rendimiento promedio kg H ₂ O/kg H ₂	Hidrógeno H ₂ (Tn)
Textiles	225.000.000	0,25	168.750.000	12,5	13.500.000
Papel	72.000.000	0,2	57.600.000	12,5	4.608.000
Refinerías de Petróleo	157.000.000	0,3	109.900.000	40	2.747.500
Ganadería (producción bovina)	27.900.000	0,23	21.622.500	12,5	1.729.800
Café	16.796.400	0,18	13.857.030	12,5	1.108.562
Petróleo crudo	39.400.000	0,04	37.824.000	50	756.480
Caña de azúcar	22.134.012	0,09	20.252.621	50	405.052
Lácteos	12.979.800	0,08	12.006.315	50	240.126
Fertilizantes (80 al 90% se importa)	3.584.000	0,3	2.508.800	12,5	200.704
Coquización	6.750.000	0,12	5.973.750	50	119.475
Marroquinerías	5.200.000	0,06	4.914.000	50	98.280
Madera	900.000	0,23	697.500	12,5	55.800
Plásticos	3.000.000	0,09	2.745.000	50	54.900
Aceite de palma	1.424.000	0,1	1.281.600	40	32.040
Minería (Oro, carbón, níquel y cobre)	284.956	0,05	270.708	50	5.414
Pinturas	50.000	0,25	37.500	12,5	3.000

Como se puede analizar, las industrias con mayor potencial de producción de hidrógeno son aquellas que generan mayores volúmenes de agua residual, como es el caso de la industria textil (Sigmadaf, 2021), papelera (Singh et al., 2022) y de refinación de petróleo (Qiu et al., 2021). Esto indica que el volumen de agua residual generada es uno de los factores más determinantes en la producción de hidrógeno, por encima del porcentaje de rechazo o del requerimiento de agua de la tecnología. Sin embargo, también se observa que industrias como ganadería y café presentan un aporte importante en la producción potencial de hidrógeno, debido a que, aunque generan menores volúmenes de agua residual, estas aguas presentan características más favorables para su

aprovechamiento, como menores porcentajes de rechazo y menores requerimientos de tratamiento avanzado.

Con el fin de visualizar de manera más clara la contribución de cada industria a la producción potencial de hidrógeno, en la Figura 8 se presenta la distribución del potencial de producción de hidrógeno a partir de aguas residuales industriales por sector industrial, donde el tamaño de cada bloque es proporcional a la cantidad de hidrógeno que puede producirse a partir del agua residual generada en cada industria.

Figura 8. Distribución de la producción potencial de hidrógeno.



Como se mencionó anteriormente las industrias con mayor potencial de producción de hidrógeno son la industria textil, papelera y de refinación de petróleo. Esto se debe principalmente a que estas industrias son consideradas a nivel mundial como algunas de las actividades industriales con mayor consumo de agua y, por lo tanto, con mayor generación de aguas residuales. En estas industrias, el agua es utilizada en grandes cantidades en diferentes etapas del proceso productivo, como lavado, enfriamiento, transporte de materiales, reacciones químicas y limpieza de equipos, lo que genera grandes volúmenes de efluentes industriales.

En el caso de la industria textil, el alto consumo de agua se debe principalmente a procesos de lavado, teñido, blanqueado y acabado de telas, que requieren grandes volúmenes de agua como medio de transporte de colorantes y productos químicos. Se estima que la industria textil puede consumir entre 80 y 150 litros de agua por kilogramo de tela procesada, generando grandes volúmenes de aguas residuales con colorantes, sales y compuestos químicos (Sigmadaf, 2021). Además, se ha reportado que la industria textil es responsable de aproximadamente el 20% del agua contaminada a nivel mundial, convirtiéndola en una de las principales generadoras de aguas residuales industriales (Quintero et al., 2023).

Por otro lado, la industria papelera también genera grandes volúmenes de aguas residuales debido a que el agua es utilizada en prácticamente todas las etapas del proceso de producción del papel, incluyendo la preparación de la pulpa, lavado, blanqueo y transporte de fibras, lo que genera grandes cantidades de efluentes y lodos residuales (Dagar et al., 2022). De manera similar, las refinerías de petróleo utilizan grandes cantidades de agua en procesos como destilación, enfriamiento, desalinización, hidrotratamiento y limpieza de equipos, lo que genera grandes volúmenes de aguas residuales; se estima que entre el 80 y el 90% del agua utilizada en una refinería termina como agua residual (Narayan Thorat & Kumar Sonwani, 2022).

Por lo tanto, debido a la gran cantidad de agua residual generada en estas industrias, el volumen de agua disponible después del tratamiento es mayor en comparación con otras industrias, lo que se traduce en un mayor potencial de producción de hidrógeno. Esto demuestra que el volumen de agua residual generada es uno de los factores más influyentes en la producción potencial de hidrógeno a partir de aguas residuales industriales.

Sin embargo, teniendo en cuenta los criterios evaluados (i.e., disponibilidad de agua residual, calidad, dispersión de la fuente e impacto económico), las industrias con mayor viabilidad para la producción de hidrógeno verde corresponden a petróleo crudo y su refinación, caña de

azúcar, aceite de palma y coquización. Aunque otras industrias generan grandes volúmenes de agua residual, no presentan condiciones favorables en términos de calidad del agua, localización de la fuente y viabilidad económica para su aprovechamiento. Esto indica que la selección de las industrias adecuadas para la producción de hidrógeno verde no debe basarse únicamente en la cantidad de hidrógeno que puede producirse, sino en un análisis integral que incluya factores técnicos, económicos y logísticos. Finalmente, con el fin de complementar el análisis presentado, en el Anexo 3 se muestra de manera detallada la relación entre las diferentes industrias analizadas y las tecnologías de producción de hidrógeno evaluadas, indicando qué tecnologías se adaptan mejor a cada tipo de agua residual industrial.

5. Conclusiones

A partir de la clasificación industrial CIU y la información recopilada de fuentes como el DANE, se logró identificar y caracterizar las principales fuentes de aguas residuales industriales en Colombia utilizando variables que permitieron evaluar criterios clave como la disponibilidad de agua residual, la calidad del efluente, la dispersión geográfica y el impacto económico. Así, las industrias con mayor disponibilidad de agua residual corresponden principalmente a los sectores textil, papelería y de refinación de petróleo, mientras que las agroindustrias como la caña de azúcar y el aceite de palma presentan efluentes con alta carga orgánica y biodegradabilidad. Por otro lado, sectores como la ganadería y el café presentan alta dispersión geográfica, dificultando su aprovechamiento, mientras que industrias como la refinación, el aceite de palma y la coquización presentan condiciones favorables en términos de concentración industrial e impacto económico.

El análisis de las técnicas de tratamiento de aguas residuales industriales permitió establecer que la selección del tren de tratamiento depende principalmente del tipo de contaminantes presentes en el efluente, tales como sólidos suspendidos, aceites e hidrocarburos, materia orgánica

biodegradable, metales y compuestos químicos recalcitrantes. Por lo tanto, las aguas con alta carga orgánica requieren principalmente tratamientos biológicos, mientras que las aguas con presencia de hidrocarburos y compuestos químicos requieren tratamientos fisicoquímicos y procesos avanzados. Asimismo, se determinó que las tecnologías de producción de hidrógeno presentan diferentes requerimientos de calidad de agua, donde las tecnologías biológicas requieren aguas residuales tratadas parcialmente, mientras que las tecnologías de electrólisis requieren aguas con mayor grado de pureza, requiriendo tratamientos más avanzados como filtración, adsorción y procesos de membranas.

La evaluación de la idoneidad de las técnicas de tratamiento y su relación con la producción de hidrógeno permitió establecer que el potencial de producción de hidrógeno a partir de aguas residuales industriales depende principalmente del volumen de agua residual disponible después del tratamiento, del porcentaje de rechazo del proceso y del tipo de tecnología de producción de hidrógeno utilizada. Aunque industrias como la textil, papelera y refinación presentan el mayor potencial teórico de producción de hidrógeno debido al alto volumen de agua residual generado, el análisis multicriterio permitió determinar que las industrias con mayor viabilidad para la producción de hidrógeno verde en el contexto colombiano son petróleo crudo, refinerías de petróleo, caña de azúcar, aceite de palma y coquización, debido a que presentan un equilibrio entre disponibilidad de agua, calidad del efluente, menor dispersión geográfica e impacto económico.

6. Recomendaciones

Se recomienda incluir en futuros estudios un análisis energético para cada industria, con el fin de evaluar el consumo de energía de los procesos de tratamiento de aguas residuales y de las tecnologías de producción de hidrógeno, y así determinar la viabilidad energética del proceso.

Se recomienda realizar un análisis económico detallado que incluya costos de inversión, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento y de producción de hidrógeno, con el fin de evaluar la viabilidad económica de implementar estas tecnologías a escala industrial en Colombia.

Se recomienda desarrollar estudios a escala piloto para algunas de las industrias con mayor potencial identificadas en este trabajo, con el fin de validar experimentalmente los resultados obtenidos mediante el análisis teórico y la revisión bibliográfica.

Se recomienda evaluar la integración de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno dentro de las mismas instalaciones industriales, con el fin de reducir costos de transporte de agua, aprovechar la infraestructura existente y mejorar la eficiencia del proceso.

Finalmente, se recomienda ampliar el estudio a otras industrias no analizadas en detalle en este trabajo, así como evaluar la variabilidad temporal de las aguas residuales industriales, ya que sus características pueden cambiar dependiendo del proceso productivo y la época del año.

Referencias Bibliográficas

- Alqahtani, H. S. (2024). Lower-Carbon Hydrogen Production from Wastewater: A Comprehensive Review. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 8659, 16(19), 8659. <https://doi.org/10.3390/SU16198659>
- American Public Health Association, A. W. W. A. W. E. F. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- ASTM International. (2018). *Specification for Reagent Water*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1193-06R18>
- Bhandari, V. M., & Ranade, V. V. (2014). Advanced Physico-chemical Methods of Treatment for Industrial Wastewaters. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*, 81–140. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099968-5.00002-7>
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 38, Number 12, pp. 4901–4934). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Chang, E. E., Hsing, H. J., Chiang, P. C., Chen, M. Y., & Shyng, J. Y. (2008). The chemical and biological characteristics of coke-oven wastewater by ozonation. *Journal of Hazardous Materials*, 156(1–3), 560–567. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.12.106>
- Chauke, N. M., & Raphulu, M. (2024). A review: Simultaneous “one-pot” pollution mitigation and hydrogen production from industrial wastewater using photoelectrocatalysis process. *Materials Today Catalysis*, 5, 100052. <https://doi.org/10.1016/J.MTCATA.2024.100052>
- Dagar, S., Singh, S. K., & Gupta, M. K. (2022). Economics of advanced technologies for wastewater treatment: Evidence from pulp and paper industry. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 960639. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.960639/TEXT>

DANE. (2023a). *Encuesta ambiental industrial (EAI)*.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-ambiental-industrial-eai>

DANE. (2023b). *Encuesta anual manufacturera (EAM)*.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam>

DANE. (2023c). *PIB Información técnica*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/pib-informacion-tecnica>

Diya'Uddeen, B. H., Daud, W. M. A. W., & Abdul Aziz, A. R. (2011). Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 89, Number 2, pp. 95–105). <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.11.003>

Dong, X., Pang, D., Luo, G., & Zhu, X. (2024). Microbial Water Electrolysis Cells for Efficient Wastewater Treatment and H₂ Production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *12*(10), 4203–4212. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c07953>

Dong, Z., Driscoll, C. T., Johnson, S. L., Campbell, J. L., Pourmokhtarian, A., Stoner, A. M. K., & Hayhoe, K. (2019). Projections of water, carbon, and nitrogen dynamics under future climate change in an old-growth Douglas-fir forest in the western Cascade Range using a biogeochemical model. *Science of The Total Environment*, *656*, 608–624. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.11.377>

El-Gohary, F. A., Badawy, M. I., El-Khateeb, M. A., & El-Kalliny, A. S. (2009). Integrated treatment of olive mill wastewater (OMW) by the combination of Fenton's reaction and anaerobic treatment. *Journal of Hazardous Materials*, *162*(2–3), 1536–1541. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2008.06.098>

European commission. (2020). *Circular economy action plan - Publications Office of the EU*.

[https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/45cc30f6-cd57-11ea-adf7-](https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/45cc30f6-cd57-11ea-adf7-01aa75ed71a1/language-en)

[01aa75ed71a1/language-en](https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/45cc30f6-cd57-11ea-adf7-01aa75ed71a1/language-en)

Fuentes-Santiago, V., Valdez-Vazquez, I., Vital-Jácome, M., Zavala-Méndez, M., Razo-Flores, E.,

& Carrillo-Reyes, J. (2023). Carbohydrates/acid ratios drives microbial communities and

metabolic pathways during biohydrogen production from fermented agro-industrial

wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110302.

<https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.110302>

IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Green Hydrogen Guide for policy

making. *Green Hydrogen Guide for Policy Making*, 1, 52.

<https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>

Kushwaha, J. P. (2015). A review on sugar industry wastewater: sources, treatment technologies,

and reuse. *Desalination and Water Treatment*, 53(2), 309–318.

<https://doi.org/10.1080/19443994.2013.838526>

Latif Ahmad, A., Ismail, S., & Bhatia, S. (2003). Water recycling from palm oil mill effluent

(POME) using membrane technology. In *European Desalination Society, International Water*

Association. A.L. Ahmad et al. / *Desalination* (Vol. 157).

Logan, B. E., & Rabaey, K. (2012). Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by

using microbial electrochemical technologies. *Science*, 337(6095), 686–690.

<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1217412;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;WEBSITE:>

[WEBSITE:AAAS-](https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1217412;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;WEBSITE:)

[SITE;JOURNAL:JOURNAL:SCIENCE;WGROU:STRING:PUBLICATION](https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1217412;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;WEBSITE:)

- Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Arampatzis, G., McPhail, S. J., & Ulgiati, S. (2018). Life cycle assessment and water footprint of hydrogen production methods: From conventional to emerging technologies. *Environments - MDPI*, 5(2), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS5020024>
- Merabet, N. H., Kerboua, K., & Hoinkis, J. (2024). Hydrogen production from wastewater: A comprehensive review of conventional and solar powered technologies. *Renewable Energy*, 226, 120412. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2024.120412>
- Narayan Thorat, B., & Kumar Sonwani, R. (2022). Current technologies and future perspectives for the treatment of complex petroleum refinery wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 355, 127263. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.127263>
- Núñez, R., Merayo, N., Hermosilla, D., Gascó, A., Dos santos-García, A. J., & Caravaca, Á. (2024). Electrochemical treatment of industrial wastewater for hydrogen production. *Current Opinion in Electrochemistry*, 46, 101533. <https://doi.org/10.1016/J.COELEC.2024.101533>
- Qiu, B., Tao, X., Wang, H., Li, W., Ding, X., & Chu, H. (2021). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 155, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081>
- Quintero, J. S., Corporación, S., & De Bogotá, T. (2023). *Agua, recurso afectado por la industria textilera*. Corporación Tecnológica De Bogotá. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/6465>
- Qyyum, M. A., Ihsanullah, I., Ahmad, R., Ismail, S., Khan, A., Nizami, A. S., & Tawfik, A. (2022). Biohydrogen production from real industrial wastewater: Potential bioreactors, challenges in commercialization and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(88), 37154–37170. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.195>

- Robin, H. M., Naha, H., Hossain, M. S., Mashadul Islam Rafi, S., Golam Kibria, M., & Mourshed, M. (2025). A comprehensive analysis of hydrogen production through electrolysis of industrial wastewater: Prospects and challenges. *Energy Reviews*, 4(3), 100155. <https://doi.org/10.1016/J.ENREV.2025.100155>
- Royle, M., & Willoughby, D. (2011). The safety of the future hydrogen economy. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(6), 452–462. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2011.09.003>
- Sánchez, L. D., Sánchez, L. D., & Viáfara, C. A. (2014). Impacto de los sólidos suspendidos totales sobre la obstrucción en emisores de riego localizado de alta frecuencia. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 199–210. <https://doi.org/10.25100/iyc.v16i2.3695>
- Sigmadaf. (2021). *Tratamiento y reutilización de aguas residuales textiles*. https://sigmadafclarifiers.com/tratamiento-y-reutilizacion-de-aguas-residuales-industria-textil/?utm_source
- Singh, A. K., Kumar, A., Bilal, M., & Chandra, R. (2022). Environmental pollutants of paper industry wastewater and their toxic effects on human health and ecosystem. *Bioresource Technology Reports*, 20, 101250. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2022.101250>
- Vincent, I., & Bessarabov, D. (2018). Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 81, pp. 1690–1704). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.258>
- Wang, J., & Wan, W. (2009). Factors influencing fermentative hydrogen production: A review. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 34, Number 2, pp. 799–811). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.015>
- Wrana, N., Sparling, R., Cicek, N., & Levin, D. B. (2010). Hydrogen gas production in a microbial electrolysis cell by electrohydrogenesis. *Journal of Cleaner Production*, 18(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.018>

Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 36, Number 3, pp. 307–326). <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.11.002>

Apéndices

Apéndice A. Caracterización de las aguas de desecho industrial.

Industria	Unidad de referencia	Producción	Fuente	Unidad de referencia	Agua residual generada (m3/año)	Fuente	Caracterización	Referencia de la caracterización
Café	t/año	839820	https://federacioncafeteros.org/wp/listado-noticias/colombia-sigue-aumentando-su-produccion-cafetera-con-una-cifra-que-se-aproxima-a-los-14-millones-de-sacos-al-cierre-del-2024/	10-30 m3/t	16796400	Artículo Anaerobic Digester Variation on Wastewater Treatment	<p>Acidez Extrema: El pH es muy bajo, con valores de 2,38 y 2,68, lo cual es significativamente más ácido que el rango estándar permitido (6,0-9,0).</p> <p>Alta Carga Orgánica: Presenta niveles de DBO5 (hasta 3.770 mg/L) y DQO (hasta 4.302 mg/L) extremadamente altos, lo que consume el oxígeno del agua y asfixia la vida acuática.</p> <p>Sólidos y Turbidez: Registra niveles elevados de sólidos totales (TS) y sólidos suspendidos (TSS), alcanzando hasta 4.183 mg/L, lo que aumenta la turbidez del río.</p> <p>Nutrientes: Contiene altas concentraciones de nitratos, amonio y fosfatos, lo que puede causar la eutrofización (crecimiento excesivo de algas) en los cuerpos de agua receptores</p>	Effect of Wastewater Discharge From Coffee Processing Plant on River Water Quality, Sidama Region, South Ethiopia:https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8842449/#:~:text=Abstract,%2%B1%20432.9%20mg/L.
Caña de azúcar	t/año	22134012	https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215	m3/t	22134012	Artículo Impact of sugar mills effluent on environment around mills area	<p>Características Físicas Temperatura: hasta 63 °C Sólidos Totales (TS): 6.062 ± 62 mg/L Sólidos Suspendidos Totales (TSS): 5 – 9.212 mg/L Sólidos Suspendidos Volátiles (VSS): 335 ± 7 mg/L Conductividad: asociada a alta concentración de TDS (sin valor específico reportado)</p> <p>Características Químicas pH: 4.5 – 10 DBO5: 60 – 5.103 mg/L DQO: 110 – 12.211 mg/L Dureza (como CaCO3): hasta 2.460 mg/L Nitrógeno total (TKN): 15 – 40 mg/L Fósforo total (TP): 1.3 – 12 mg/L Aceites y grasas: hasta 118 mg/L Metales reportados: Zn²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺, Cr³⁺, Fe²⁺</p> <p>Características Biológicas Biodegradabilidad: alta Coliformes: no reportado Toxicidad: asociada a alta carga orgánica (sin valor específico)</p>	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1944398624045223
Aceite de palma	t/año	1780000	https://fedepalma.org/noticias/la-produccion-de-aceite-de-palma-en-colombia-mantiene-su-crecimiento-sostenido-en-2025/	0.8 m3/t	1424000	Althausen, M. (2016). Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio-Convertir un residuo en un recurso. Palmas, 37(Especial Tomo II), pp. 31-37.	<p>En cuanto a sus características físicas y químicas adicionales, el POME presenta concentraciones elevadas de sólidos totales (40.000–60.000 mg/L), sólidos suspendidos totales (15.000–25.000 mg/L), aceites y grasas (2.000–7.000 mg/L), además de nutrientes como nitrógeno total (200–750 mg/L) y fósforo total (100–180 mg/L). La conductividad eléctrica suele ser alta (aproximadamente 3.000–8.000 µS/cm), asociada a la presencia de sales disueltas y compuestos orgánicos. Estas características convierten al POME en uno de los efluentes agroindustriales con mayor carga contaminante reportada en la literatura.</p>	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852409018136?via%3Dihub
Petróleo crudo	barril procesado/año	13260000	https://www.anh.gov.co/es/operacion-es-y-regal%C3%ADas/sistemas-integrados-operaciones/estad%C3%ADsticas-de-producci%C3%B3n/	m3/año	39400000	https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostenibilidad/gestional/gestional-integral-del-agua/manejo-agua?	<p>pH: 6.0 – 10.0 DBO5: 150 – 350 mg/L DQO: 300 – 1.200 mg/L Alcalinidad: 100 – 500 mg/L como CaCO3 Dureza: 200 – 2.000 mg/L como CaCO3 Nitrógeno total (TKN): 10 – 50 mg/L Amoníaco (NH3-N): 5 – 40 mg/L Fósforo total: 1 – 10 mg/L Aceites y grasas: 50 – 300 mg/L Fenoles: 0.1 – 20 mg/L Sulfuros: 1 – 50 mg/L Metales reportados: Fe: 0.5 – 10 mg/L Zn: 0.1 – 5 mg/L</p>	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714418306858?via%3Dihub ; https://www.epa.gov/eg/petroleum-refining-effluent-guidelines

Industria	Unidad de referencia	Producción	Fuente	Unidad de referencia	Agua residual generada (m ³ /año)	Fuente	Caracterización	Referencia de la caracterización
Plásticos	t/año	1500000	https://www.datatur.com/industria-plastica-en-colombia-2025/	2 m ³ /t	3000000	Technical guidelines for the prevention of plastic and resin pellet leakage from formal and informal recycling facilities	Ni: 0.05 – 2 mg/L Cr: 0.05 – 1 mg/L Pb: < 1 mg/L pH: 6.0 – 9.0 DBO: 100 – 800 mg/L DQO: 300 – 2.500 mg/L Alcalinidad: 100 – 400 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 100 – 500 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total (TKN): 5 – 40 mg/L Fósforo total: 0.5 – 10 mg/L Aceites y grasas: 20 – 200 mg/L Fenoles (cuando hay resinas fenólicas): 0.1 – 10 mg/L Metales (por pigmentos y catalizadores): Zn: 0.1 – 3 mg/L Cr: 0.05 – 2 mg/L Ni: 0.05 – 1 mg/L Pb: < 1 mg/L	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479708003617?via%3Dihub ; https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/pol_bref_0807.pdf
Pinturas	Tn/año	250 000	https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-pintura-en-colombia#:~:text=Visi%C3%B3n%20General%20del%20Mercado%20de%20Pinturas%20en%201.611%20C35%20millones%20de%20USD%20en%202035.	0.2 m ³ /t	50000	https://www.researchgate.net/publication/270647693_Treatability_of_Water-Based_Paint_Effluents	pH: 6.0 – 11.0 (puede ser alcalino por resinas y aditivos) DBO: 200 – 1.500 mg/L DQO: 800 – 6.000 mg/L Alcalinidad: 200 – 800 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 100 – 600 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total (TKN): 10 – 60 mg/L Fósforo total: 2 – 20 mg/L Aceites y grasas: 100 – 1.000 mg/L Fenoles: 0.5 – 50 mg/L Metales (por pigmentos): Zn: 0.5 – 5 mg/L Cr: 0.1 – 10 mg/L Pb: 0.1 – 5 mg/L Cd: 0.01 – 1 mg/L	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894708005202
Fertilizantes (80 al 90% se importa)	Tn/año	280 000	https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera	12.8 m ³ /t	3584000	https://www.researchgate.net/publication/342394558_Analysis_of_water_and_electricity_consumption_of_urea_fertilizer_industry_case_study_PT_X	pH: 2.0 – 9.0 (puede ser muy ácido en fertilizantes fosfatados) DBO: 20 – 300 mg/L DQO: 100 – 1.000 mg/L Alcalinidad: 200 – 1.000 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 200 – 1.500 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total: 50 – 1.500 mg/L Amoníaco (NH ₃ -N): 10 – 1.000 mg/L Nitratos (NO ₃ ⁻): 50 – 1.000 mg/L Fósforo total: 10 – 500 mg/L Aceites y grasas: 10 – 100 mg/L Metales reportados: Cd: 0.01 – 5 mg/L Cr: 0.05 – 5 mg/L Pb: 0.1 – 5 mg/L Hg: < 1 mg/L As: 0.01 – 2 mg/L	https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ivie_aaf.pdf
Ganadería (producción bovina)	toneladas de carne bovina/año	930 000	https://www.fedegan.org.co/estadisticas/produccion-carne	20 – 40 m ³ /t	27900000	https://www.frontiersin.org/journal/article/10.3389/fenv.2019.00013/full	pH: 6.5 – 8.5 DBO: 1.000 – 6.000 mg/L DQO: 2.000 – 10.000 mg/L Alcalinidad: 1.000 – 5.000 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 500 – 2.000 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total (TKN): 200 – 2.000 mg/L Amoníaco (NH ₃ -N): 50 – 1.500 mg/L Fósforo total: 50 – 500 mg/L Aceites y grasas: 100 – 500 mg/L Metales (trazas típicas): Zn: 0.1 – 5 mg/L Cu: 0.05 – 3 mg/L Fe: 1 – 20 mg/L	https://www.researchgate.net/publication/259500486_Manure_management_treatment_strategies_for_sustainable_agriculture_-_2nd_ed_edited_by_CH_Burton_and_C_Turner_Authors_Burton_CH_Turner_C_Publisher_Silsoe_Silsoe_Research_Institute_Publication_year_2003
Lácteos	L/año	7211000	https://aneia.unian.des.edu.co/sector-lacteo-en-colombia-un-analisis-global-y-retos-a-futuro/	1.0 – 2.5 m ³ /t	12979800	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479708001648	pH: 4.0 – 11.0 (variación por procesos CIP alcalinos/ácidos) DBO: 1.000 – 5.000 mg/L DQO: 2.000 – 8.000 mg/L Alcalinidad: 500 – 3.000 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 200 – 1.000 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total (TKN): 50 – 400 mg/L Fósforo total: 20 – 200 mg/L Aceites y grasas: 100 – 1.000 mg/L Relación DBO/DQO: 0.5 – 0.7 (alta biodegradabilidad)	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479713002880?via%3Dihub

Industria	Unidad de referencia	Producción	Fuente	Unidad de referencia	Agua residual generada (m ³ /año)	Fuente	Caracterización	Referencia de la caracterización
Textiles	t/año	1500000	https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera	100 – 200 m ³ /t	225000000	https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera	pH: 6.0 – 11.0 DBO: 200 – 1.500 mg/L DQO: 800 – 5.000 mg/L Alcalinidad: 200 – 1.000 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 100 – 500 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total: 10 – 100 mg/L Fósforo total: 5 – 50 mg/L Aceites y grasas: 10 – 100 mg/L Metales reportados (por colorantes y mordientes): Cr: 0.1 – 5 mg/L Cu: 0.05 – 3 mg/L Zn: 0.1 – 5 mg/L Ni: 0.05 – 2 mg/L	https://www.researchgate.net/publication/329228079_Textile_dye_wastewater_characteristics_and_constituents_of_synthetic_effluents_a_critical_review ; https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479716305266
Marroquinerías	t/año	130000	https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera	30 – 50 m ³ /t	5200000	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195925521000470	pH: 3.0 – 12.0 (según etapa del proceso) DBO: 1.500 – 6.000 mg/L DQO: 4.000 – 15.000 mg/L Alcalinidad: 500 – 3.000 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 500 – 3.000 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total: 100 – 500 mg/L Fósforo total: 10 – 100 mg/L Aceites y grasas: 100 – 1.000 mg/L Sulfuros: 50 – 500 mg/L Cromo total (Cr): 50 – 500 mg/L	https://www.researchgate.net/publication/245167877_An_Improved_Product-Process_for_Cleaner_Chrome_Tanning_in_Leather_Processing ; https://www2.kuet.ac.bd/JES/images/files/v6/v6j8.pdf
Madera	t/año	1500000	https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO	0.6 m ³ /t	900000	https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/2fda2226-b000-4cee-8186-8cacab86316b/content	pH: 4.5 – 9.0 DBO: 500 – 3.000 mg/L DQO: 1.000 – 6.000 mg/L Alcalinidad: 200 – 1.500 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 100 – 500 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total: 5 – 50 mg/L Fósforo total: 1 – 20 mg/L Aceites y grasas: 20 – 200 mg/L Fenoles: 0.5 – 20 mg/L Resinas y ácidos grasos (extractivos de madera): 50 – 500 mg/L	https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2470031
Papel	t/año	1800000	https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera	40 m ³ /t	72000000	https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f5d00042-09e0-472f-8951-2d33f6f8975b/content	pH: 4.0 – 9.0 DBO: 500 – 2.500 mg/L DQO: 1.000 – 6.000 mg/L Alcalinidad: 200 – 1.500 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 100 – 500 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total: 5 – 50 mg/L Fósforo total: 1 – 20 mg/L Aceites y grasas: 20 – 200 mg/L Fenoles: 0.5 – 20 mg/L Compuestos organoclorados (AOX): 0.5 – 8 mg/L	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969704004279?via%3Dihub
Refinerías de Petróleo	barriles/año	157000000	https://www.ecoportal.com.co/wps/portal/	1.0 m ³ /barril	157000000	https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostenibilidad/ambiental/gestion-agua	pH: 6.0 – 9.5 DBO: 100 – 300 mg/L DQO: 300 – 1.200 mg/L Alcalinidad: 100 – 500 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 200 – 1.500 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total (TKN): 10 – 50 mg/L Amoníaco (NH ₃ -N): 5 – 40 mg/L Fósforo total: 1 – 10 mg/L Aceites y grasas: 10 – 150 mg/L Fenoles: 0.1 – 20 mg/L Sulfuros: 1 – 50 mg/L Metales reportados: Fe: 0.5 – 10 mg/L Zn: 0.1 – 5 mg/L Ni: 0.05 – 2 mg/L Cr: 0.05 – 1 mg/L	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718343109
Coquización	t/año	4 500 000	https://www.iea.org/data-and-statistics	1.5 m ³ /t	6750000	https://www.ific.org/content/dam/ific/doc/2000/2007-integrated-steel-mills-ehs-guidelines-en.pdf	pH: 6.5 – 9.0 DBO: 1.000 – 3.000 mg/L DQO: 2.000 – 8.000 mg/L Alcalinidad: 500 – 3.000 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 200 – 1.000 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total (TKN): 200 – 800 mg/L Amoníaco (NH ₃ -N): 100 – 500 mg/L Fósforo total: 5 – 50 mg/L Aceites y grasas: 50 – 300 mg/L Fenoles totales: 100 – 1.000 mg/L Cianuros: 1 – 50 mg/L Metales reportados: Fe: 1 – 20 mg/L Zn: 0.5 – 5 mg/L Ni: 0.1 – 2 mg/L Cr: 0.1 – 3 mg/L	https://www.researchgate.net/publication/326559665_Characterization_of_coke_oven_wastewater ; https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407018420

Industria	Unidad de referencia	Producción	Fuente	Unidad de referencia	Agua residual generada (m3/año)	Fuente	Caracterización	Referencia de la caracterización
Minería (Oro, carbón, níquel y cobre)	t/año	47493	https://mineriaencolombia.anm.gov.co/sites/default/files/2024-09/Ficha%20Carb%C3%B3n%2008%202024.pdf	6 m³/t	284956	https://www.epa.gov/eg/mineral-mining-and-processing-effluent-guidelines?utm	pH: 2.0 – 9.0 (2-4 en drenaje ácido; 6-9 en efluentes tratados) DBO: 10 – 300 mg/L DQO: 50 – 800 mg/L Alcalinidad: 0 – 1.000 mg/L como CaCO ₃ Dureza: 200 – 5.000 mg/L como CaCO ₃ Nitrógeno total: 1 – 50 mg/L Fósforo total: < 10 mg/L Aceites y grasas: 5 – 100 mg/L	https://www.researchgate.net/publication/287235143_Mine_Wastes_Characterization_Treatment_and_Environmental_Impacts ; https://www.epa.gov/eg/mineral-mining-and-processing-effluent-guidelines

Para consultar la hoja de cálculo con la información pertinente visite el siguiente enlace: [Anexo 1_Caracterizacion aguas de desecho industrial.xlsx](#)

Apéndice B. Técnicas de tratamiento de las aguas de desecho industrial.

Café https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15275922.2025.2490477#abstract			
Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar sólidos gruesos (cáscaras, mucílago, partículas) y evitar obstrucciones en equipos posteriores; el efluente presenta alta carga de sólidos.
2	Remoción de sólidos suspendidos	Sedimentación primaria	Reducir SST (hasta 4183 mg/L), mejorar la estabilidad del proceso biológico y evitar acumulación de sólidos en el reactor.
3	Ajuste de pH	Neutralización con cal o NaOH	El pH reportado es ácido (2.3–4.8); se debe ajustar a un rango adecuado para actividad microbiana (≈ 5.5 –6.5).
4	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Fermentación oscura en reactor anaerobio (CSTR o UASB operado en fase acidogénica)	El efluente presenta alta DBO (3172–4432 mg/L) y DQO (6070–7655 mg/L), con fracción biodegradable significativa, lo que lo hace altamente apto para producción biológica de hidrógeno.
5	Pulimiento (si se requiere vertimiento)	Tratamiento aerobio o filtración	Reducir materia orgánica residual si se busca cumplir normativa ambiental posterior a la valorización energética.
Caña Azúcar https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408009308?via%3Dihub			
Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas/tamizado + desarenado	Retirar sólidos gruesos y arenas para evitar taponamientos y proteger bombas y tuberías (el efluente presenta alta carga de sólidos).
2	Ecuilibración y control de temperatura	Tanque de ecuilibración + enfriamiento (intercambiador, torre o aireación controlada)	Homogeneizar caudal y concentración; bajar la temperatura (reportada hasta 63 °C) porque temperaturas altas desestabilizan o inhiben procesos biológicos.
3	Remoción de aceites y grasas	Trampa de grasas o DAF (flotación por aire disuelto)	Reducir aceites y grasas (hasta 118 mg/L), que pueden interferir con la actividad microbiana y causar espuma o flotación de lodos.
4	Ajuste de pH	Neutralización con cal o NaOH (según el pH medido)	Estabilizar el pH en un rango adecuado para producción biológica de H ₂ (el pH reportado es variable: 4.5–10).
5	Control de inhibidores (si aplica)	Coagulación–floculación y/o precipitación de metales	Disminuir la posible inhibición por metales reportados (Zn, Ni, Cu, Mn, Pb, Cd, Cr, Fe), especialmente si se encuentran en concentraciones elevadas.
6	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Fermentación oscura en reactor anaerobio (CSTR o UASB operado en fase acidogénica)	Es la opción más adecuada porque el efluente tiene carga orgánica alta (DBO/DQO elevadas), lo que favorece la producción de H ₂ a partir de materia orgánica biodegradable.
Aceite de palma https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410005663?via%3Dihub https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148124004774?via%3Dihub			
Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar fibras, restos sólidos gruesos y evitar obstrucciones en equipos posteriores (SST 15.000–25.000 mg/L).
2	Enfriamiento y ecuilibración	Tanque de ecuilibración + sistema de enfriamiento	La temperatura es elevada (70–80 °C); se debe reducir para evitar inhibición microbiana y estabilizar el proceso.
3	Remoción de aceites y grasas	Trampa de grasas o DAF (flotación por aire disuelto)	El contenido de aceites y grasas es muy alto (2.000–7.000 mg/L); pueden inhibir o desestabilizar procesos biológicos.
4	Ajuste de pH	Neutralización con cal o NaOH	El pH es ácido (3.5–5.0); debe ajustarse a rango óptimo para producción biológica de H ₂ (≈ 5.5 –6.5).
5	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Fermentación oscura en reactor anaerobio (CSTR)	Altísima DQO (40.000–70.000 mg/L) y DBO (15.000–30.000 mg/L) → efluente extremadamente rico en materia orgánica biodegradable, ideal para producción de hidrógeno.
6	Pulimiento (si se requiere vertimiento)	Tratamiento aerobio o laguna facultativa	Reducir materia orgánica residual posterior a valorización energética.
Petróleo crudo https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438940900257X?via%3Dihub			
Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Separación primaria de hidrocarburos	Separador API / CPI	Remover aceites libres (50–300 mg/L) y fase oleosa flotante.
2	Remoción avanzada de aceites	Flotación por aire disuelto (DAF) o hidrociclón	Reducir aceites emulsificados y turbidez (50–400 NTU).
3	Remoción de sólidos	Filtración multimedia o cartucho	Reducir SST (50–600 mg/L) para proteger procesos posteriores.
4	Remoción de metales (si necesario)	Precipitación química o intercambio iónico	Disminuir Fe, Zn, Ni, Pb, Cr si superan límites inhibitorios.

5	Desalinización	Ósmosis inversa o nanofiltración	SDT hasta 35.000 mg/L → salinidad elevada que inhibe procesos biológicos.
6	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Electrólisis (preferiblemente AEM o AEL tras desalinización)	La carga orgánica es baja–moderada (DQO 300–1200 mg/L); no es ideal para fermentación. Tras desalinización, puede emplearse como fuente de agua para electrólisis. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211630034X

Plásticos			
Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar sólidos gruesos y proteger equipos; el efluente puede arrastrar partículas/plásticos finos y sólidos (SST 100–1.500 mg/L).
2	Ecuilización	Tanque de ecuilización (con agitación)	Homogeneizar caudal y cargas (DQO 300–2.500 mg/L; turbidez 50–500 NTU) para estabilizar la eficiencia del tren.
3	Remoción de aceites/grasas	Trampa de grasas o DAF	Reducir aceites y grasas (20–200 mg/L), que pueden generar flotación/ensuciamiento y afectar procesos biológicos/electroquímicos.
4	Clarificación físico-química	Coagulación–floculación + sedimentación (o DAF químico)	Bajar turbidez y color asociado a pigmentos/aditivos; mejora la biodegradabilidad aparente y reduce carga particulada antes del paso de H ₂ .
5	Control de metales (si aplica)	Precipitación química / ajuste de pH dirigido	Disminuir posibles inhibidores (Zn, Cr, Ni, Pb) si se detectan en niveles que afecten bioprocesos.
6	Método para generar H ₂ (más conveniente)	MEC (Celda microbiana de electrólisis)	Aprovecha la materia orgánica moderada (DQO/DBO) para producir H ₂ mientras reduce DQO; es más adecuado que fermentación oscura cuando la carga orgánica no es extremadamente alta y hay variabilidad por pigmentos/aditivos.

Pinturas <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451910324000942?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar sólidos gruesos y proteger equipos; SST 500–5.000 mg/L.
2	Remoción de aceites y resinas	DAF (flotación por aire disuelto)	Reducir aceites (100–1.000 mg/L) y partículas hidrofóbicas que afectan procesos posteriores.
3	Tratamiento físico-químico	Coagulación–floculación + sedimentación	Remover pigmentos, color intenso y reducir turbidez (200–2.000 NTU).
4	Remoción de metales	Precipitación química (ajuste de pH)	Disminuir Zn, Cr, Pb y Cd, que pueden inhibir procesos biológicos y electroquímicos.
5	Tratamiento avanzado (si se requiere)	Oxidación avanzada (AOP) o electrocoagulación	Degradar compuestos orgánicos recalcitrantes y solventes.
6	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Electrólisis (preferiblemente AEM tras clarificación)	La carga orgánica es variable y puede contener compuestos tóxicos; tras tratamiento y clarificación, el agua puede utilizarse para electrólisis con menor riesgo de ensuciamiento.

Fertilizantes <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479718305656?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Remover sólidos suspendidos (100–2.000 mg/L) y proteger equipos posteriores.
2	Ecuilización	Tanque de homogenización	Estabilizar caudal y variabilidad de pH (2.0–9.0).
3	Ajuste de pH	Neutralización controlada	Llevar el pH a rango neutro para evitar corrosión e interferencias en procesos posteriores.
4	Remoción de metales	Precipitación química / ajuste de pH selectivo	Reducir Cd, Cr, Pb y As, que pueden interferir en procesos electroquímicos.
5	Control de sólidos disueltos (si necesario)	Nanofiltración u ósmosis inversa parcial	Reducir SDT si están en niveles que afecten estabilidad del sistema.
6	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Electrólisis (preferiblemente AEM)	La alta conductividad favorece la eficiencia electroquímica; baja DBO/DQO no favorece rutas biológicas.

Ganadería (producción bovina) <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319909004467?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado grueso	Retirar sólidos grandes (estiércol, fibras) y proteger equipos; SST 1.000–10.000 mg/L.
2	Sedimentación primaria	Tanque de sedimentación	Reducir sólidos suspendidos y carga particulada antes del reactor biológico.
3	Ecuilización	Tanque de homogenización	Estabilizar caudal y concentración de materia orgánica.
4	Control de pH (si necesario)	Ajuste leve si se desvía del rango óptimo	El pH ya está cercano a neutro, generalmente adecuado para procesos anaerobios.

5	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Fermentación oscura en reactor anaerobio (CSTR o UASB operado en fase acidogénica)	Alta DBO y DQO biodegradables favorecen la producción de hidrógeno a partir de materia orgánica.
6	Tratamiento posterior (si se requiere vertimiento)	Digestión anaerobia completa o tratamiento aerobio	Reducir carga orgánica residual y cumplir normativa ambiental.

Lácteos <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319908013219?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar sólidos gruesos y restos de cuajada o materia particulada (SST 500–3.000 mg/L).
2	Remoción de grasas	Trampa de grasas o DAF	Reducir aceites y grasas (100–1.000 mg/L), que pueden afectar estabilidad del reactor anaerobio.
3	Ecuilización	Tanque de homogenización	Estabilizar caudal y variaciones de carga orgánica.
4	Ajuste de pH	Neutralización controlada	El pH puede variar (4–11); se ajusta a rango óptimo para fermentación (≈5.5–6.5).
5	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Fermentación oscura en reactor anaerobio (CSTR o UASB en fase acidogénica)	Alta DQO y DBO biodegradables favorecen producción eficiente de hidrógeno.
6	Tratamiento posterior (si se requiere vertimiento)	Digestión anaerobia completa o tratamiento aerobio	Reducir carga orgánica residual para cumplir normativa ambiental.

Textiles <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718347338?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar sólidos gruesos y fibras textiles; proteger equipos posteriores.
2	Ecuilización	Tanque de homogenización	Estabilizar variaciones de pH (6–11), DQO y caudal.
3	Remoción de color y sólidos	Coagulación–floculación + sedimentación o DAF	Reducir color intenso y turbidez (100–2.000 NTU), mejorar calidad del efluente.
4	Remoción de metales	Precipitación química / ajuste de pH	Disminuir Cr, Cu, Zn y Ni que pueden interferir en procesos posteriores.
5	Tratamiento avanzado	Oxidación avanzada (AOP) o electrocoagulación	Degradar colorantes recalcitrantes y compuestos orgánicos persistentes.
6	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Electrólisis (preferiblemente AEM tras clarificación)	La biodegradabilidad es variable y la salinidad alta; tras tratamiento, el agua puede utilizarse como fuente para electrólisis.

**Marro-
quinería** <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965260400157X?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar sólidos gruesos (SST 1.000–8.000 mg/L).
2	Ecuilización	Tanque de homogenización	Estabilizar pH extremadamente variable (3–12).
3	Remoción de cromo (etapa crítica)	Precipitación química de Cr(III) como hidróxido (ajuste de pH 8–9)	El Cr total (50–500 mg/L) es altamente tóxico e inhibe procesos biológicos y electroquímicos.
4	Coagulación–floculación	Remoción adicional de sólidos y metales residuales	Reducir turbidez y mejorar calidad del efluente.
5	Desalinización parcial (si necesaria)	Nanofiltración u ósmosis inversa	SDT hasta 40.000 mg/L; alta salinidad puede afectar estabilidad del sistema.
6	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Electrólisis (AEM tras remoción completa de Cr)	Debido a la toxicidad del cromo y alta salinidad, la ruta electroquímica es más controlable que la biológica.

Madera <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032108001147?via%3Dihub>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148124004774?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar partículas de madera y sólidos gruesos (SST 200–2.000 mg/L).
2	Sedimentación primaria	Tanque de sedimentación	Reducir sólidos suspendidos y carga particulada.
3	Ecuilización	Tanque de homogenización	Estabilizar variaciones de DQO (1.000–6.000 mg/L) y pH.
4	Ajuste de pH (si necesario)	Neutralización leve	Mantener pH en rango óptimo para proceso biológico (≈5.5–6.5).

5	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Fermentación oscura en reactor anaerobio (CSTR)	Carga orgánica biodegradable moderada–alta permite producción de hidrógeno; ausencia de metales pesados favorece estabilidad microbiana.
6	Tratamiento posterior (si se requiere)	Digestión anaerobia completa o aerobio	Reducir DQO residual antes de vertimiento.

Papel <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319912001863?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar fibras y sólidos gruesos (SST 500–3.000 mg/L).
2	Sedimentación primaria	Clarificador primario	Reducir sólidos suspendidos y estabilizar el efluente antes del reactor.
3	Ecuilización	Tanque de homogenización	Estabilizar variaciones de DQO (1.000–6.000 mg/L) y pH (4–9).
4	Ajuste de pH (si necesario)	Neutralización leve	Mantener rango óptimo para fermentación (≈5.5–6.5).
5	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Fermentación oscura en reactor anaerobio (CSTR)	La carga orgánica biodegradable y ausencia de metales pesados favorecen la producción biológica de hidrógeno.
6	Tratamiento posterior (si se requiere)	Digestión anaerobia completa o tratamiento aerobio	Reducir DQO residual y cumplir normativa ambiental.

Refinerías de Petróleo <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095758201100098X?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Separación primaria de aceites	Separador API / CPI	Remover aceites libres y parte de los sólidos; aceites y grasas 10–150 mg/L.
2	Remoción de aceites emulsificados	DAF (flotación por aire disuelto)	Reducir emulsiones y turbidez (50–300 NTU) para estabilizar el tratamiento posterior.
3	Remoción de sólidos finos	Filtración multimedia o cartucho	Bajar SST (30–500 mg/L) y proteger unidades avanzadas.
4	Tratamiento biológico convencional (para “limpiar” orgánicos)	Lodos activados / MBBR (aerobio)	Con DQO 300–1.200 mg/L y DBO 100–300 mg/L, el aerobio es eficiente para reducir orgánicos y compuestos biodegradables.
5	Pulimiento avanzado (según calidad requerida)	Carbón activado o membranas	Remover trazas orgánicas (fenoles, compuestos aromáticos) y bajar DQO residual antes de electrólisis.
6	Control de sales (si es necesario para electrólisis)	Nanofiltración/Ósmosis inversa parcial	SDT 1.000–20.000 mg/L: si el objetivo es alimentar electrolizadores, conviene reducir sales/impurezas para evitar incrustación/ensuciamiento.
7	Método para generar H ₂ (más conveniente)	Electrólisis (AEM o AEL) usando agua ya tratada	La carga orgánica es baja–moderada (no ideal para fermentación); tras tratamiento, el agua puede ser fuente alternativa para electrólisis con menor riesgo de ensuciamiento.

Coquización <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/19/8659>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
1	Pretratamiento físico	Rejas / Tamizado	Retirar sólidos gruesos y proteger equipos posteriores.
2	Separación de aceites	Separador API / DAF	Reducir aceites (50–300 mg/L) y fracción flotante.
3	Remoción de compuestos tóxicos	Stripping de amoníaco + oxidación química (si aplica)	Disminuir NH ₃ (100–500 mg/L) y compuestos inhibitorios.
4	Remoción de metales	Precipitación química	Reducir Fe, Zn, Ni y Cr para evitar inhibición.
5	Tratamiento biológico controlado	Reactor anaerobio (etapa previa de adaptación)	Reducir fracción biodegradable antes de valorización energética.
6	Método para generar H ₂ (más conveniente)	MEC (Celda microbiana de electrólisis)	La carga orgánica es moderada–alta, pero la toxicidad limita fermentación pura; MEC es más tolerante y permite tratamiento + producción de H ₂ .

Minería (Oro, carbón, níquel y cobre) <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969705006145?via%3Dihub>

Orden	Etapa	Tecnología recomendada	Propósito / justificación técnica
-------	-------	------------------------	-----------------------------------

1	Neutralización primaria	Adición de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	Elevar pH en caso de drenaje ácido (pH 2-4) y favorecer precipitación de metales.
2	Precipitación de metales	Formación de hidróxidos metálicos + sedimentación	Remover Fe, Mn, Cu, Zn y otros metales típicos en efluentes mineros.
3	Clarificación	Sedimentador / filtración	Reducir sólidos suspendidos (hasta 10.000 mg/L).
4	Ajuste fino de pH	Control de pH neutro	Preparar el agua para uso posterior en sistemas electroquímicos.
5	Desalinización parcial (si necesaria)	Nanofiltración / ósmosis inversa	SDT hasta 50.000 mg/L pueden generar incrustaciones en electrolizadores.
6	Método para generar H_2 (más conveniente)	Electrólisis (AEM o AEL)	Baja DQO/DBO no favorece rutas biológicas; tras remoción de metales y ajuste de pH, puede emplearse para producción electroquímica de H_2 .

Para consultar la hoja de cálculo con la información pertinente visite el siguiente enlace: [Anexo](#)

[2_nicas de tratamiento de las aguas de desecho industrial.xlsx](#)

Apéndice D. Tecnologías para la generación de hidrógeno.

Fermentación oscura	Celdas de electrólisis microbiana (MEC)	Electrólisis AEM	Electrólisis AEL	Electrólisis PEM
<p>La fermentación oscura es un proceso biológico anaerobio mediante el cual microorganismos fermentativos degradan compuestos orgánicos presentes en el agua residual, produciendo hidrógeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos como subproductos. Durante este proceso, las bacterias utilizan la materia orgánica como fuente de carbono y energía, generando electrones y protones que posteriormente se combinan para formar hidrógeno molecular (H₂).</p> <p>Debido a este mecanismo metabólico, la eficiencia del proceso depende directamente de la disponibilidad de materia orgánica biodegradable, por lo que aguas residuales con altas concentraciones de DQO o DBO resultan particularmente adecuadas para este tipo de tecnología. Asimismo, el proceso requiere condiciones estrictamente anaerobias, ya que la presencia de oxígeno inhibe la actividad de los microorganismos fermentativos.</p> <p>El pH óptimo del proceso se encuentra generalmente entre 5 y 6, ya que valores cercanos a la neutralidad favorecen rutas metabólicas que consumen hidrógeno, reduciendo su rendimiento. De igual forma, la temperatura influye significativamente en la actividad microbiana, operando comúnmente en rangos mesofílicos (30–40 °C) o termofílicos (50–60 °C). Finalmente, la presencia de metales pesados o compuestos tóxicos puede inhibir la actividad microbiana, por lo que su concentración debe ser limitada.</p>	<p>Las celdas de electrólisis microbiana (Microbial Electrolysis Cells, MEC) son sistemas bioelectroquímicos en los cuales microorganismos electroactivos oxidan materia orgánica presente en el agua residual en el ánodo, liberando electrones y protones. Los electrones son transferidos al circuito externo y, con la aplicación de un pequeño voltaje adicional, los protones se reducen en el cátodo para formar hidrógeno.</p> <p>Debido a este mecanismo, las MEC requieren aguas residuales con suficiente materia orgánica biodegradable, ya que esta actúa como sustrato para los microorganismos electroactivos. La oxidación microbiana de la materia orgánica genera electrones que son posteriormente utilizados en la reacción de producción de hidrógeno.</p> <p>Además, el sistema requiere una conductividad adecuada del agua, ya que la transferencia eficiente de electrones y protones dentro del reactor depende de la capacidad del medio para conducir corriente eléctrica. Generalmente se aplica un voltaje externo entre 0.2 y 0.8 V, el cual reduce la barrera energética necesaria para la producción de hidrógeno en el cátodo. El sistema opera típicamente en condiciones anaerobias en el ánodo y con pH cercano a la neutralidad (6.5–7.5) para favorecer la actividad microbiana.</p>	<p>La electrólisis con membrana de intercambio aniónico (AEM) es una tecnología electroquímica en la cual el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de corriente eléctrica. En este sistema, una membrana de intercambio aniónico permite el transporte de iones hidroxilo (OH⁻) desde el cátodo hacia el ánodo, separando simultáneamente los gases producidos.</p> <p>Debido a la presencia de una membrana y catalizadores electrocatalíticos, el agua utilizada en este proceso debe presentar bajas concentraciones de sólidos suspendidos y contaminantes, ya que estos pueden provocar ensuciamiento de la membrana (membrane fouling) y reducir la eficiencia del sistema. Asimismo, se requiere una conductividad adecuada, generalmente proporcionada mediante soluciones alcalinas o electrolitos, que facilitan el transporte iónico dentro del sistema.</p> <p>Las condiciones de operación suelen encontrarse en temperaturas moderadas, generalmente entre 40 y 60 °C, lo que mejora la cinética de las reacciones electroquímicas y la eficiencia del proceso.</p>	<p>La electrólisis alcalina (Alkaline Electrolysis, AEL) es una tecnología ampliamente utilizada para la producción de hidrógeno, en la cual el agua es dividida en hidrógeno y oxígeno mediante corriente eléctrica en presencia de un electrolito alcalino, comúnmente hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH).</p> <p>En este sistema, los iones hidroxilo (OH⁻) generados en el cátodo se transportan hacia el ánodo a través del electrolito, donde se produce oxígeno. Debido a este mecanismo electroquímico, el sistema requiere una alta conductividad del medio, proporcionada por el electrolito alcalino.</p> <p>Asimismo, el agua utilizada debe estar libre de sólidos suspendidos y contaminantes, ya que estos pueden afectar el desempeño de los electrodos y provocar incrustaciones o deposición de materiales en las superficies catalíticas. Las condiciones de operación típicas incluyen temperaturas entre 60 y 90 °C, lo que incrementa la velocidad de reacción y mejora la eficiencia energética del proceso.</p>	<p>La electrólisis con membrana de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane, PEM) es una tecnología electroquímica que utiliza una membrana polimérica conductora de protones para separar los productos de reacción. En este proceso, el agua se oxida en el ánodo generando oxígeno, protones y electrones. Los protones atraviesan la membrana hacia el cátodo, donde se combinan con los electrones provenientes del circuito externo para formar hidrógeno.</p> <p>Debido a la alta sensibilidad de la membrana y de los catalizadores metálicos utilizados (generalmente basados en platino o iridio), esta tecnología requiere agua de alta pureza, generalmente desionizada o ultrapura. La presencia de sales, metales o sólidos puede provocar envenenamiento de catalizadores, degradación de la membrana o pérdida de conductividad protónica, reduciendo significativamente la eficiencia del sistema.</p> <p>Las condiciones de operación suelen encontrarse entre 50 y 80 °C, lo que favorece el transporte de protones a través de la membrana y mejora el rendimiento electroquímico.</p>
<p>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031990800918X</p>	<p>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815001635</p>	<p>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117309127</p>	<p>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128509000598</p>	<p>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319913002607</p>

Industrias	Efluente dominante	DQO aprox.	Limitante principal	Tecnología conveniente	Tipo de agua	Rendimiento (%)
Aceite de palma	Extremadamente alta DQO	40.000–70.000 mg/L	Grasas elevadas	Fermentación oscura	No aplica ASTM	50
Café	Alta carga orgánica biodegradable	6.000–7.500 mg/L	pH ácido	Fermentación oscura	No aplica ASTM	50
Caña de azúcar	Muy alta carga orgánica	2.500–9.000 mg/L	Temperatura alta	Fermentación oscura	No aplica ASTM	50
Coquización	Orgánico complejo + tóxicos	2.000–8.000 mg/L	Fenoles/NH ₃	MEC	Tipo III – IV	40
Fertilizantes	Altamente mineralizado	100–1.000 mg/L	Sales y metales	Electrólisis	Tipo I-II	12.5
Ganadería bovina	Alta carga orgánica	2.000–10.000 mg/L	Sólidos altos	Fermentación oscura	No aplica ASTM	50
Lácteos	Alta carga orgánica	2.000–8.000 mg/L	Grasas	Fermentación oscura	No aplica ASTM	50
Madera	Orgánico lignocelulósico	1.000–6.000 mg/L	Fenoles/lignina	Fermentación oscura	No aplica ASTM	50
Marroquinerías	Orgánico alto + Cr elevado	4.000–15.000 mg/L	Cromo (50–500 mg/L)	Electrólisis	Tipo I-II	12.5
Minería	Mineralizado (AMD)	50–800 mg/L	pH ácido y metales	Electrólisis	Tipo I-II	12.5
Papel	Orgánico lignocelulósico	1.000–6.000 mg/L	Color	Fermentación oscura	No aplica ASTM	50
Petróleo crudo	Hidrocarburos + alta salinidad	300–1.200 mg/L	Sales y aceites	Electrólisis	Tipo I-II	12.5
Pinturas	Orgánico + pigmentos/metales	800–6.000 mg/L	Metales y colorantes	Electrólisis	Tipo I-II	12.5
Plásticos	Orgánico moderado + pigmentos	300–2.500 mg/L	Aditivos	MEC	Tipo III – IV	40
Refinerías	Orgánico bajo–moderado	300–1.200 mg/L	Aceites/aromáticos	Electrólisis	Tipo I-II	12.5
Textiles	Colorantes + salinidad alta	800–5.000 mg/L	Salinidad y metales	Electrólisis	Tipo I-II	12.5

Para consultar la hoja de cálculo con la información pertinente visite el siguiente enlace: [Anexo](#)

[3_Tecnologías para la generación de Hidrogeno.xlsx](#)