

Technological Advances in Effluent Treatment and Sludge Management in the Fishing Industry: systematic literature review

Lucy T. Valdivieso Mejía¹ , Dennis G. Méndez Díaz² , Christian D. Corrales Otazú³ 

^{1, 2, 3} Universidad Tecnológica del Perú, Lima- Perú,

U20206284@utp.edu.pe, C27440@utp.edu.pe , ccorraleso@utp.edu.pe

Abstract - In the fishing sector, specifically companies dedicated to the processing of hydrobiological resources, a variety of industrial effluents and sludges are generated, which require pretreatment before being discharged into the environment. The objective of this review is to identify and analyze the most efficient and innovative industrial wastewater treatment systems. To do so, the following methodology was carried out, initially identifying 528 original articles in SCOPUS, of which 52 of them met the inclusion criteria. The results showed that there was a significant increase in research on industrial effluent treatments during the years 2021 and 2022, with studies carried out in countries on all continents. Most of the research focused on the implementation of membrane bioreactors (MBR), both aerobic and anaerobic, combined with advanced membrane separation techniques, such as ultrafiltration and nanofiltration (NF). Effluent characterization and monitoring of parameters such as pH, temperature, electrical conductivity, COD, BOD5, total suspended solids (TSS), total Kjeldahl nitrogen (TKN), total phosphorus (TP) and nitrates (NO₃⁻) were essential to assess the quality of treated water. Finally, it was concluded that advanced industrial wastewater treatment methods, especially those combining biological processes and membrane separation techniques, are highly effective. The implementation of these technologies, together with continuous monitoring and adequate sludge management, serves to improve water quality and promote environmental sustainability in the industrial sector.

Keywords: Effluents, sludge management, membrane bioreactors, monitoring, water treatment.

Avances Tecnológicos en el Tratamiento de Efluentes y Gestión de Lodos en la Industria Pesquera: Revisión sistemática de literatura

Lucy T. Valdivieso Mejía¹ , Dennis G. Méndez Díaz² , Christian D. Corrales Otazú³ 

^{1, 2, 3} Universidad Tecnológica del Perú, Lima- Perú,

U20206284@utp.edu.pe, C27440@utp.edu.pe, ccorraleso@utp.edu.pe

Resumen- *En el sector pesquero, específicamente empresas dedicadas al procesamiento de recursos hidrobiológicos se genera una variedad de efluentes y lodos industriales, los cuales requieren tratamiento previo antes de ser descargados al medio ambiente. El objetivo de esta revisión es identificar y analizar los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales más eficientes e innovadores. Para ello, se llevó a cabo la siguiente metodología, identificando inicialmente 528 artículos originales en SCOPUS, de los cuales 52 de ellos cumplían con los criterios de inclusión. Los resultados mostraron que hubo un aumento significativo en la investigación sobre tratamientos de efluentes industriales durante los años 2021 y 2022, con estudios realizados en países de todos los continentes. La mayoría de las investigaciones se enfocaron en la implementación de biorreactores de membrana (MBR), tanto aeróbicos como anaeróbicos, combinados con técnicas avanzadas de separación por membranas, como la ultrafiltración y la nanofiltración (NF). La caracterización de efluentes y el monitoreo de parámetros como pH, temperatura, conductividad eléctrica, DQO, DBO5, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), fósforo total (PT) y nitratos (NO₃-) fueron esenciales para evaluar la calidad del agua tratada. Finalmente, se llegó a la conclusión de que los métodos avanzados de tratamiento de aguas residuales industriales, especialmente aquellos que combinan procesos biológicos y técnicas de separación por membranas, son altamente eficaces. La implementación de estas tecnologías, junto con un monitoreo continuo y una adecuada gestión de lodos, sirve para mejorar la calidad del agua y promover la sostenibilidad ambiental en el sector industrial.*

Palabras clave: *Efluentes, gestión de lodos, biorreactores de membranas, monitoreo, tratamiento de aguas.*

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 5 años, estudios analizados indican que los efluentes generados por el procesamiento de recursos hidrobiológicos requieren tratamiento previo antes de ser descargados al medio ambiente. En este sentido se han realizado revisiones diversas, en la cual

indica que, a partir de 2007, surgieron diferentes estudios para mejorar la calidad de las aguas residuales industriales empleando biorreactores anaerobios de membrana dinámica, obteniendo resultados satisfactorios [7]. Esto podría ser una opción viable y sostenible para obtener efluentes residuales industriales de calidad, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la conservación de recursos hídricos.

Adicionalmente, el uso de los biorreactores de naturaleza anaeróbica con membrana de tipo dinámica, presentan muestras de baja turbidez, teniendo una adecuada eliminación de materia de tipo orgánica, además de solutos suspendidos y hueveras de helmintos. [7]. Esto sugiere que dichos reactores pueden ser una tecnología prometedora para plantas procesadoras de recursos hidrobiológicos, permitiendo obtener agua residual industrial tratada de alta calidad y reducir costos operativos. Por otro lado, las aguas residuales industriales que pasan por un proceso de tratamiento para eliminar sólidos suspendidos, materia orgánica y demás contaminantes existentes, generan subproductos conocidos como lodos. Otra revisión expone que estudios realizados recientemente, demuestran que existe eficiencia en los diversos medios de tratamientos de lodo. [6]. Frente a ello, el desarrollo de nuevas estrategias de tratamiento, así como la evaluación crítica de las existentes, permite asegurar un manejo efectivo y responsable de estos subproductos.

Como resultado de lo anterior, los efluentes industriales generados en empresas pesqueras son altamente contaminantes, por lo que se requieren de diferentes tratamientos para hacer que estas aguas residuales sean inocuas y cumplan con los criterios legales para su vertido al medio ambiente. La falta de un tratamiento adecuado puede plantear riesgos significativos tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas. Además, la empresa podría desafortunadamente enfrentar sanciones legales por incumplimiento de las regulaciones ambientales actuales. Por esta razón es necesario

23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in service of society". Hybrid Event, Mexico City, July 16 - 18, 2025

implementar un tratamiento eficaz para abordar esta problemática de manera efectiva.

El estudio del tratamiento de aguas residuales industriales en el contexto de empresas procesadoras de recursos hidrobiológicos es esencial para identificar y promover tecnologías más eficientes y sostenibles. Los resultados de esta revisión pueden ser utilizados por investigadores y profesionales del sector para mejorar las prácticas de tratamiento de efluentes, asegurando así un impacto ambiental positivo y una gestión más efectiva de los recursos hídricos. Las soluciones basadas en esta combinación de tratamientos para efluentes residuales industriales y lodos procedentes de plantas procesadoras de recursos hidrobiológicos ofrecen soluciones innovadoras que contribuyen de manera positiva a la gestión ambiental. Al respecto, no existen muchas publicaciones sobre estos temas con relación a la industria pesquera, por lo que se carece de una visión integral sobre los avances y retos que enfrenta este campo. La ausencia de estudios de revisión dificulta la comprensión completa de esta problemática, por lo que la probabilidad para identificar y adoptar nuevas prácticas se ve limitada.

La presente RSL tiene como objetivo, identificar y analizar los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales más eficientes e innovadores, enfocado especialmente a empresas pesqueras, para mejorar la calidad del agua tratada.

Por otro lado, este estudio se estructura de la siguiente manera. En el apartado 2, Metodología, se detalla el método empleado para la RSL, incluyendo las preguntas de investigación formuladas y los procedimientos utilizados para seleccionar el material analizado en el documento. El apartado 3, Resultados, presenta los hallazgos del análisis de los estudios primarios sobre sistemas de tratamiento de efluentes y lodos industriales. El apartado 4, Discusión, aborda la discusión de las fuentes y tecnologías seleccionadas, ofreciendo una visión general de los diferentes sistemas de tratamiento aplicables a los efluentes residuales generados en la industria pesquera. Finalmente, el apartado 5, Conclusiones, resume los hallazgos más relevantes y las limitaciones del estudio sobre las SRL, subrayando además la importancia de combinar distintos métodos o sistemas de tratamiento para garantizar una gestión sostenible del agua residual y los lodos producidos en la planta.

II. METODOLOGÍA

2.1. Descripción de la estrategia de búsqueda sistemática:

La estrategia de búsqueda empleada en el presente estudio se fundamenta en una revisión sistemática de literatura basada en el tratamiento de aguas residuales industriales y la gestión de lodos en empresas procesadoras de recursos hidrobiológicos. Este enfoque analítico se sustenta en una síntesis cualitativa de la evidencia disponible, con un énfasis en la recolección, evaluación y síntesis de información relevante para alcanzar una comprensión del tema.

2.1.1. Pregunta PICO y sus componentes

Se utilizó la estrategia PICO con la finalidad de lograr definir los componentes, que a posterior permitirán plantear la pregunta de revisión que terminará orientando la RSL. En la tabla I se mencionan los componentes PICO que van acorde a la investigación:

TABLA I
COMPONENTES QUE PERMITE REALIZAR PREGUNTA PICO

Componentes PICO	
Problema	Uso de diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales
Intervención	Gestión de los diversos tratamientos del agua residual
Comparación	Monitoreo de calidad del agua industrial
Resultados	Mejora en la calidad del agua residual
Contexto	Empresas pesqueras

Pregunta PICO (RQ): ¿Qué sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales se emplean para mejorar la calidad del agua residual en empresas pesqueras con problemas de tratamiento ineficaz?

Así mismo para corroborar más información, se realizaron, las siguientes sub-preguntas partiendo de los componentes PICO:

- **RQ1:** ¿Cómo se ha medido la ineficiencia del tratamiento del efluente?
- **RQ2:** ¿Qué sistemas de tratamiento eficientes se podrían utilizar para tratar el agua residual industrial?
- **RQ3:** ¿Qué tan satisfactorios han sido los resultados de los monitoreos de efluentes?
- **RQ4:** ¿Qué parámetros se deben medir para evaluar la calidad del agua residual?

2.1.2. Palabras clave especializadas pertinentes

Se realizó detalladamente la selección de palabras clave las cuales guardaron relación directa con cada componente de la estrategia PICO. detallándose en la tabla II las palabras claves vinculadas con cada componente:

TABLE II
PALABRAS CLAVE

Componentes PICO	Palabras clave
Uso de diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wastewater ▪ Fishing industry ▪ Treatment, ▪ Efficiency ▪ Environment ▪ Urban wastewater
Gestión de los diversos tratamientos del agua residual	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficient system ▪ Industrial wastewater ▪ Dynamic membrane anaerobic bioreactors ▪ Environmental Awareness ▪ Marine life
Monitoreo de calidad del agua industrial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Water monitoring ▪ Treatment efficiency ▪ Quality standards ▪ Water quality ▪ Control ▪ Treatment plant
Mejora en la calidad del agua residual	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dissolved solids ▪ Solids separation ▪ Turbidity ▪ BOD ▪ COD ▪ Sludge treatment.
Empresas pesqueras	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Company ▪ Hydrobiological Resources ▪ Fish processing industry.

2.1.3. Ecuación de búsqueda empleada

La ecuación de búsqueda fue elaborada utilizando las palabras clave relacionadas con cada componente del modelo PICO. Seguidamente se utilizó los operadores booleanos OR y AND los cuales ayudaron a relacionar las palabras. Por un lado, se utilizó el operador booleano OR entre términos añadiendo comillas a aquellas palabras compuestas. Por otro lado, se utilizó el operador booleano AND para interrelacionar las palabras relacionadas con el ORD, sin embargo, estas se separaron mediante paréntesis. A continuación, se ilustra la tabla III donde se aplicaron los operadores booleanos:

TABLE III
APLICANDO LOS OPERADORES BOOLEANOS OR Y AND.

Palabras clave	Aplicando el OR y AND
Wastewater Fishing industry Treatment, Efficiency Environment Urban wastewater Efficient system Industrial wastewater Dynamic membrane anaerobic bioreactors Environmental Awareness Marine life Water monitoring Treatment efficiency Quality standards Water quality Control Treatment plant Dissolved solids	((wastewater OR "Fishing industry" OR treatment) AND ("Efficient system" OR "Industrial wastewater" OR "dynamic membrane anaerobic bioreactors") AND ("Treatment efficiency" OR "Quality standards" OR "Water quality" OR control) AND (solids OR "Dissolved solids" OR "Solids separation" OR "Sludge treatment")) AND ("Hydrobiological Resources" OR fishing OR sludge OR treatment OR "Fish processing industry")) AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "re") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Industrial Water Treatment") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Industrial Wastewaters") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD ,

Solids separation Turbidity BOD COD Sludge treatment Company Hydrobiological Resources Fishing Fish processing industry.	"Bioreactors") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Bioreactor") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Total Dissolved Solids") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Industrial Wastewater Treatment") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Activated Sludge Process") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Activated Sludge") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Sludge") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Membrane Bioreactor") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Suspended Particulate Matter") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Industrial Waste") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Wastewater Treatment Plant") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Membrane Fouling") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Turbidity") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Membranes") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "MBR") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Membrane") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Article") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Wastewater") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Wastewater Treatment") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Chemical Oxygen Demand") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Industrial Wastewater") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Waste Water Treatment Plant") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Sludge Settling") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Seed Sludge")
--	--

2.2. Definición de los criterios de inclusión y exclusión de los artículos científicos

Para la investigación, se establecieron parámetros de inclusión y exclusión, con la única finalidad de lograr contar con los artículos científicos basados en tiempo, distribución geográfica, idioma y relación con el tema de estudio. Los criterios de inclusión/exclusión son:

Inclusiones:

- CI 1: Artículos publicados entre los años 2020-2024
- CI 2: Artículos publicados del área de ingeniería en temas de tratamientos de efluentes.
- CI 3: Artículos científicos, Conferences papers o Reviews
- CI 4: Publicaciones en idioma inglés o español
- CI 5: Publicaciones con acceso abierto.

Exclusiones:

- CE 1: Artículos publicados del 2019 a menos
- CE 2: Artículos no relacionados a la ingeniería y temas de efluentes.
- CE 3: Publicaciones diferentes a Artículos, Conferences papers y Reviews
- CE 4: Publicaciones en diversos idiomas a excepción de inglés y español
- CE 5: Publicaciones sin acceso abierto.

2.3. Descripción del proceso de selección

2.3.1. Resultados obtenidos del proceso de búsqueda de literatura científica

La metodología por utilizar fue la metodología PRISMA, siendo únicamente SCOPUS la base sobre la que se realizó la búsqueda de información. Razón a lo cual se logró determinar un total de 528 resultados (artículos científicos, actas de conferencias y revisiones) relacionados con el tema a investigar. Estos resultados son en totalidad aún sin poner en práctica los criterios de inclusión y exclusión.

2.3.2. Descripción detallada de los pasos del proceso de selección y sus resultados (PRISMA)

Para la elección de estudios que contribuyan a la presente investigación se tomaron en cuenta las etapas de identificación, cribado, idoneidad e inclusión, obteniéndose como resultado: De los resultados obtenidos se ha aplicado una selección basada en los lineamientos PRISMA, no se eliminaron artículos duplicados ya que solo se empleó una base de datos. De los 528 resultados, 157 cumplían con la temática de la revisión sistemática a partir de la revisión de título, resumen y palabras claves. De estos, se recuperaron 147 artículos a texto completo y 41 cumplían con los criterios de inclusión y exclusión. Además, se agregaron 11 estudios nuevos encontrados en la misma base de datos que se relacionaban a los temas de investigación, lo que resultó un total de 52 fuentes. Finalmente, solo utilizamos 20 fuentes para este estudio.

2.3.3. Diagrama de flujo PRISMA que refleje gráficamente el proceso

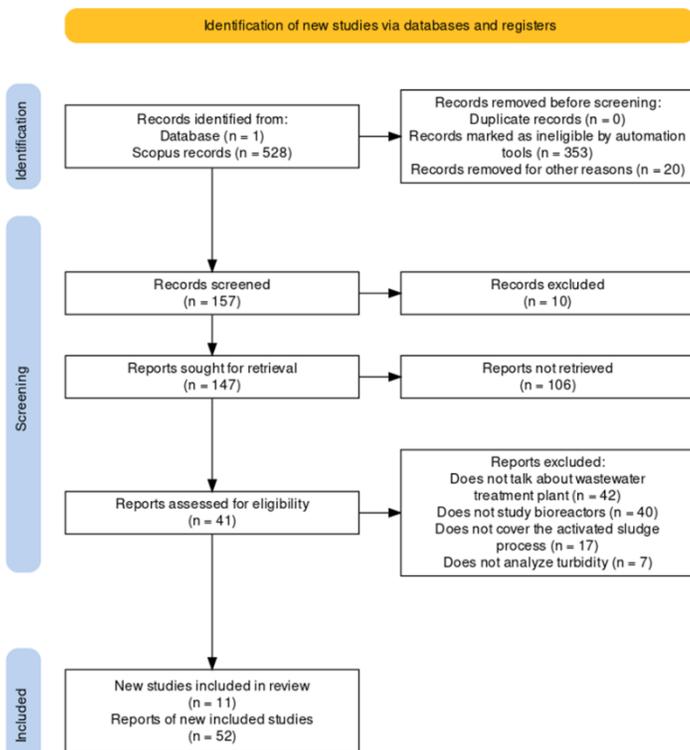


Fig. 1. Diagrama PRISMA de la RSL

III. RESULTADOS

Como parte de los estudios de la revisión sistemática de literatura, teniendo como patrón generatriz el tratamiento de efluentes industriales, se obtuvieron un total de 20 estudios distribuidos entre los años 2021 al 2023. Siendo en el 2021, 7 estudios, en el 2022, 7 estudios y finalmente en el 2023 con 6 estudios sobre el tema en investigación.

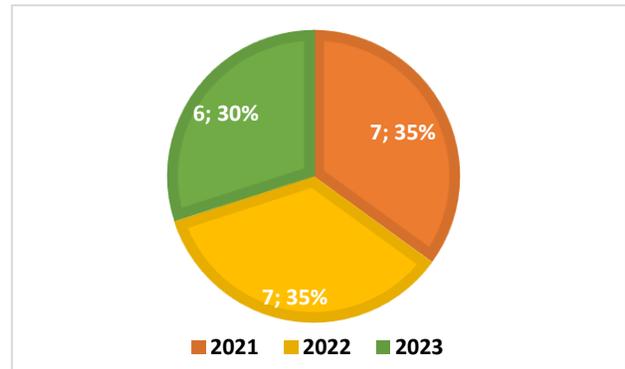


Fig. 2. Número de estudios presentados de acuerdo con su año de presentación

Así mismo con relación a los artículos seleccionados se toma en cuenta la distribución geográfica de los países por continentes. Siendo Asia con 8 estudios, África, 5 estudios, América del norte y sur cada una con 1 estudio y Oceanía presenta 1 estudio.

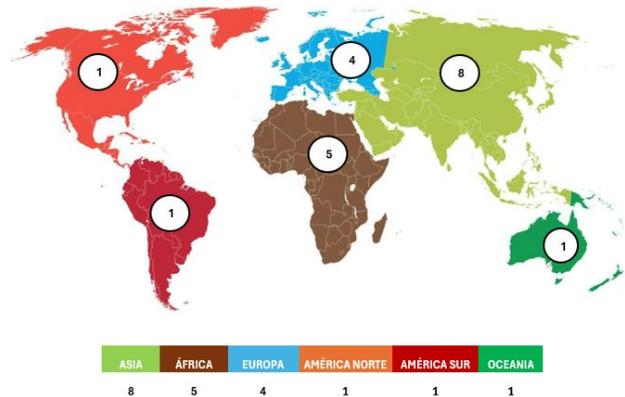


Fig. 3. Distribución geográfica de publicación

3.1. Síntesis de resultados basados en las preguntas de revisión

RQ1: ¿Cómo se ha medido la ineficiencia del tratamiento del efluente?

A. Categorías de datos extraídos

Sistemas de tratamiento y funcionalidad. Evaluación de tecnologías de tratamiento.

B. Síntesis narrativa de los resultados obtenidos:

Tomando en cuenta lo desarrollado por el artículo N° 7 publicado en 2022 por Ayyoub et al., utilizo la tecnología

de tipo MBR, presentándose una eficiencia de remoción del DQO menor al 95%, concluyendo que su aplicabilidad puede ser para efluentes de alta carga, presentando así mismo un margen de error mayor al 5% [5]. En relación con lo comentado en el artículo N° 9, se tiene que la empleabilidad de la tecnología AnDMBR publicado el 2022 por Chimuca et al., según el cual dicha tecnología presenta una eficiencia de DQO entre 85 a 95%, concluyendo que dicho método debe ser aplicado a espacios reducidos [7]. En ese mismo sentido el artículo N°10 planteado por Ayyoub et al. del año 2023, considera que la aplicación de la tecnología AeMBR, demuestra una eficiencia de remoción del DQO entre el 90 al 98%, concluyendo que es aplicable dentro de los procesos de reutilización [4]. Finalmente, el artículo N°9 propuesto por Al-Asheh et al. del año 2021 considera que la aplicación de la tecnología de sistema híbrido, demuestra una eficiencia de remoción de DQO que va del 80 al 96%, concluyendo que su aplicabilidad puede darse en diversos escenarios debido a su alta versatilidad y adaptación [1].

TABLA IV
EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO

Tecnología	Estudio	Eficiencia de Remoción	Aplicabilidad
MBR	Ayyoub et al. (2022)	DQO >95%	Efluentes alta carga
AnDMBR	Chimuca et al. (2022)	DQO: 85-95%	Espacios reducidos
AeMBR	Ayyoub et al. (2023)	DQO: 90-98%	Reutilización
Sistema Híbrido	Al-Asheh et al. (2021)	DQO:88-96%	Versatilidad

RQ2: ¿Qué sistemas de tratamiento eficientes se podrían utilizar para tratar el agua residual industrial?

A. Categorías de datos extraídos

Sistemas de tratamiento

B. Síntesis narrativa de los resultados obtenidos:

Es así como en el artículo N° 5 planteado por Joudah y Racoviteanu del año 2019, plantea que el uso del sistema de biorreactores de membrana (MBR) puesto que combina un proceso biológico con un sistema de filtración por membrana de fibra hueca. Obteniendo como resultados que la solución más exitosa fue la adición de 82 ml de NaOCl al tanque del biorreactor durante un tiempo de retención hidráulica de 24 horas, obteniendo una eficiencia del 99,96% en turbidez, 89,52% para sólidos suspendidos, 93,56% para DQO y 99,36% para DBO [12]. En el artículo N°4 propuesto por Alharthi et al. en el año 2023, sostiene que el uso de sistemas de tratamiento a base de biopelículas, MBR, y uso de tratamiento químicos, procesos fisicoquímicos y por osmosis de adaptan en con mayor eficiencia en el tratamiento de los efluentes [2].

Para el artículo N° 8 propuesto por Gautam et al. en el año 2022, considera que el uso de biorreactores anaeróbicos de membrana (AnMBR) junto a los biorreactores anaeróbicos de membranas sumergidos muestran eficiencia para el tratamiento de efluentes de alta concentración [10]. Con relación al artículo N°3 propuesto por Qiblawey y Judd en el año 2019, analiza los sistemas de membrana en su uso frente a al sistema de lodos activados [17]. Así mismo Sawadogo et al. en el año 2022 como parte del artículo N°11, analiza el sistema de biorreactores anaeróbicos de membrana, con uso de proceso de osmosis inversa (RO) y la nanofiltración (NF), su combinación muestra eficiencia en el tratamiento de efluentes. Esta integración tecnológica permite una mayor eliminación de contaminantes, lo que resalta su potencial para el proceso cumpliendo con los estándares de calidad requeridos para su reutilización y contribuyendo positivamente con el medio ambiente al disminuir su carga contaminante [18]. Finalmente, en el artículo 12 de Leonard propuesto en el año 2021, sostiene que los diversos tipos de sistemas de tratamiento de agua incluyen métodos aeróbicos y anaeróbicos frente a sistemas de reactores secuenciales discontinuos y lodos activados [13].

TABLA V
SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Fuente	Año	Sistema de tratamiento
Joudah y Racoviteanu	2019	Biorreactores de membrana (MBR)
Alharthi et al.	2023	Sistemas de tratamiento químicos, procesos fisicoquímicos y por osmosis
Gautam et al.	2022	Biorreactores anaeróbicos de membrana (AnMBR). Biorreactores anaeróbicos de membranas sumergidos
Qiblawey y Judd	2019	Sistemas de membrana en su uso frente a al sistema de lodos activados
Sawadogo et al.	2022	Sistema de biorreactores anaeróbicos de membrana, Osmosis inversa (RO) Nanofiltración (NF)
Leonard	2021	Métodos aeróbicos y anaeróbicos frente a sistemas de reactores secuenciales discontinuos y lodos activados

RQ3: ¿Qué tan satisfactorios han sido los resultados de los monitoreos de efluentes?

A. Categorías de datos extraídos

Técnicas de innovación, impacto operativo y mejora alcanzada en los tratamientos de efluentes y lodos residuales.

B. Síntesis narrativa de los resultados obtenidos:

De acuerdo con el artículo N° 7 propuesto por Ayyoub et al. del año 2023, considera que una de las principales innovaciones es el uso del proceso AeMBR, el cual muestra una eficiencia a más del 25%, teniendo como impacto, la reducción de costos en el tratamiento de efluentes y de lodos residuales [5]. Así mismo el artículo N° 9 propuesto por Al-Asheh et al. del año 2021, considera

que la innovación de mayor impacto es el control por incrustación, el cual mejora en una vida útil de más del 40% en los procesos de tratamientos, menorando los costos y tiempos de mantenimiento [1]. El artículo N° 5 de Joudah y Racoviteanu del 2019, menciona que la técnica de innovación más útil es la dosificación de NaOCl, puesto que permite mejora los niveles de turbidez entre un 96 a 99%, permitiendo por ende una mejor optimización [12]. Finalmente, el artículo N° 17 de Sawadogo et al. del año 2022 propone como innovación la técnica del AnMBR, la cual mejora los procesos de eliminación de un 53 al 96%, permitiendo tener una mejor calidad de los resultados posterior a la aplicación de los tratamientos [18].

TABLA VI
INNOVACIONES Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS.

Innovación	Investigación	Mejora alcanzada	Impacto Operativo
Proceso AeMBR	Ayyoub et al. (2023)	Eficiencia +25%	Reducción costos
Control de Incrustación	Al-Asheh et al. (2021)	Vida útil +40%	Menor mantenimiento
Dosificación NaOCl	Joudah y Racoviteanu (2019)	Turbidez - 99.96%	Optimización
AnMBR-NF	Sawadogo et al. (2022)	Eliminación 53-96%	Mayor calidad
Ósmosis Directa	Cárdenas y Molina (2022)	>70% reducción volumen	Bajo consumo energético
Filtración Vacío	Fu et al. (2022)	65-85% reducción humedad	Operación simple
Oxidación Supercrítica	Mursalim et al. (2021)	>95% eliminación orgánicos	Residuo inerte
Sistema RAS	Gautam et al. (2022)	>40% mejora sedimentación	Optimización proceso

El tratamiento de lodos y efluentes ha experimentado avances significativos en eficiencia y sostenibilidad. La oxidación supercrítica destaca por su alta tasa de eliminación de compuestos orgánicos, mientras que la filtración al vacío ofrece una solución práctica y económica para la reducción de humedad [6],[9],[14] y [10].

RQ4: ¿Qué parámetros se deben medir para evaluar la calidad del agua residual?

A. Categorías de datos extraídos

Parámetros biológicos y físico-químicos.

B. Síntesis narrativa de los resultados obtenidos:

El artículo N° 13, publicado en 2022 por Cárdenas y Molina, propone como parámetros de evaluación el pH, temperatura y SST[6], así mismo en el artículo N°14 publicado el 2021 por Mursalim et al. considera que además de los parámetros físico-químicos, deben tomarse en cuenta los parámetros biológicos, como el DBQ/DBO, NTK y PT [14].

TABLA VII
PARAMETROS CRÍTICOS DE CONTROL Y MONITOREO

Parámetro	Indicador	Valor
Físico - Químico	pH óptimo	6.8-7.5
	Temperatura:	25-35°C
	SST	<500 mg/L
Biológicos	DQO/DBO5	ratio: 1.5-2.5
	NTK: reducción	>80%
	PT: reducción	>75%

IV. DISCUSIÓN

La presente revisión sistemática revela hallazgos significativos en el tratamiento de efluentes y gestión de lodos en la industria pesquera. Primero, el análisis integral evidencia la evolución tecnológica hacia sistemas más sofisticados, donde los biorreactores de membrana (MBR) han demostrado eficiencias excepcionales en la remoción de demanda química de oxígeno, superando el 95% [5]. No obstante, la implementación industrial de estas tecnologías enfrenta desafíos operativos y económicos que requieren atención prioritaria.

Segundo, la investigación demuestra que la integración de procesos anaeróbicos-aeróbicos presenta resultados prometedores, con eficiencias de eliminación de contaminantes que oscilan entre 53% y 96% [18], así mismo en comparación al uso de la técnica AeMBR-NF esta presenta una eficiencia de +25% considerándose una alternativa ante la ausencia de otras técnicas [4]. Esta variabilidad significativa evidencia la necesidad de profundizar en la comprensión de los parámetros operativos críticos. La caracterización exhaustiva de las condiciones locales y las propiedades específicas del efluente emerge como factor determinante para la optimización de estos sistemas [7].

Tercero se debe considerar que los sistemas híbridos representan un avance tecnológico significativo. Las investigaciones documentan mejoras sustanciales en la eficiencia mediante la combinación sinérgica de diferentes tecnologías, aunque persiste la necesidad de establecer protocolos estandarizados para el escalamiento industrial [1]. Esta brecha entre la investigación de laboratorio y la aplicación práctica constituye un área crítica para futuras investigaciones. En el ámbito de la gestión de lodos, las técnicas de ósmosis directa y oxidación supercrítica han mostrado avances prometedores [6]. Sin embargo, la optimización de estos procesos para mejorar su viabilidad económica y sostenibilidad ambiental continúa siendo un desafío pendiente. Los estudios sobre filtración al vacío subrayan la importancia de desarrollar soluciones que equilibren la eficiencia técnica con la practicidad operativa [9].

Cuarto, se debe mencionar que una limitación significativa identificada es la escasez de estudios longitudinales sobre la degradación de membranas en condiciones industriales reales. La comprensión profunda de los mecanismos de ensuciamiento y el desarrollo de estrategias preventivas efectivas emergen como áreas prioritarias de investigación [5]. Paralelamente, la optimización energética en sistemas híbridos requiere investigación adicional para cuantificar y maximizar beneficios en diversos contextos operativos [16], Todo ello debe tomarse en cuenta en la comparativa de los niveles de eficiencia que desarrolla cada técnica utilizada.

Quinto, frente a todo lo anterior descrito la presente investigación subraya la necesidad de adoptar un enfoque holístico en el diseño e implementación de sistemas de tratamiento, considerando no solo la eficiencia del proceso sino también su viabilidad económica y sostenibilidad ambiental [15]. La automatización y el monitoreo en tiempo real emergen como elementos fundamentales para la optimización operativa. Además, las direcciones futuras de investigación deberían enfocarse en el desarrollo de sistemas inteligentes que integren control adaptativo y aprendizaje automático. Los materiales avanzados para membranas con mayor resistencia al ensuciamiento y vida útil prolongada representan un área prometedora de desarrollo [11]. Adicionalmente, la valorización de subproductos y la recuperación eficiente de nutrientes podrían mejorar significativamente la sostenibilidad económica de estos sistemas [19], en ese sentido urge la puesta en marcha de los diversos tratamientos y recuperación de residuos en beneficio del ambiente y de la economía de las empresas que lo emplean.

Finalmente, el análisis comparativo evidencia la necesidad de un enfoque más integrado que considere múltiples parámetros de rendimiento. La caracterización robusta de lodos residuales y el desarrollo de metodologías estandarizadas para su tratamiento emergen como aspectos críticos frecuentemente subestimados en el diseño de sistemas de tratamiento.

V. CONCLUSIÓN

Esta investigación determinó un incremento sustancial en la investigación durante 2021-2022, con una distribución geográfica que refleja el carácter global de esta problemática ambiental, predominando estudios en Asia (40%) y África (25%). Así mismo la evaluación tecnológica demuestra la superioridad de los biorreactores de membrana (MBR) en términos de eficiencia operativa, alcanzando tasas de remoción de DQO superiores al 95%. La integración sinérgica de sistemas anaeróbicos-aeróbicos exhibe resultados prometedores, con eficiencias de eliminación entre 53% y 96%, aunque se identifica la necesidad crítica de optimizar parámetros operativos específicos para maximizar su rendimiento en

aplicaciones industriales. En ese mismo sentido el análisis paramétrico establece rangos óptimos de operación: pH (6.8-7.5), temperatura (25-35°C), y sólidos suspendidos totales (<500 mg/L), cuyo control riguroso resulta determinante para mantener la eficiencia del tratamiento. La caracterización exhaustiva de efluentes emerge como factor crítico para el diseño e implementación de sistemas de tratamiento efectivos. Por otro lado, se debe considerar que las tecnologías avanzadas de tratamiento de lodos demuestran eficiencias significativas: la ósmosis directa y filtración al vacío logran reducciones volumétricas superiores al 70%, mientras que la oxidación supercrítica alcanza tasas de eliminación de compuestos orgánicos superiores al 95%. Sin embargo, la optimización de estos procesos para mejorar su viabilidad económica constituye un desafío pendiente que requiere investigación adicional. Además, los resultados sugieren direcciones específicas para investigación futura: desarrollo de sistemas inteligentes con control adaptativo, innovación en materiales de membrana con mayor resistencia al ensuciamiento, e implementación de estrategias efectivas para la valorización de subproductos. La integración de estas tecnologías emergentes con consideraciones prácticas de implementación y sostenibilidad económica resulta fundamental para el avance del campo. Finalmente se concluye que la implementación exitosa de estas tecnologías requiere un enfoque holístico que integre eficiencia técnica, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental. La colaboración interdisciplinaria entre investigadores, industria y reguladores emerge como factor determinante para el desarrollo e implementación de soluciones efectivas y sostenibles en el tratamiento de efluentes industriales.,

REFERENCIAS

- [1] S. Al-Asheh, M. Bagheri, & A. Aida. "Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering", 4*, Article 100109. 2021. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100109>.
- [2] M. Alharthi, O. Bamaga, H. Abulkhair, H. Organji, A. Shaiban, F. Macedonio & M.Albeirutty, M. "Evaluation of a hybrid moving bed biofilm membrane bioreactor and a direct contact membrane distillation system for purification of industrial wastewater. *Membranes", 13*(1), Article 16. 2023. Doi:<https://doi.org/10.3390/membranes13010016>
- [3] M. Amin, F. Karimi, A. Fatehizadeh, & H. Movahedian-Attar. "Comparison of horizontal and vertical constructed wetlands with coagulation-flocculation-filtration unit efficiencies in the polishing of industrial wastewater effluent: A case study of Mourchekhort industrial estate wastewater treatment plant, Iran". *Journal of Health System Research, 17*(4), 250-260. 2022. Doi:<https://doi.org/10.22122/jhsr.v17i4.1431>
- [4] H. Ayyoub, S. Elmoutez, S. El-Ghazel, A. Elmidaoui & M. Taky. "Aerobic treatment of fish canning wastewater using a pilot-scale external membrane bioreactor". 17*, Article 101019. 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101019>
- [5] H. Ayyoub, S. Kitanou, B. Bachiri, M. Tahaikt, M. Taky & A. Elmidaoui." Membrane bioreactor (MBR) performance in fish canning industrial wastewater treatment". *Water Practice and

- Technology, 17*(6), 1358-1368. 2022. doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.059>
- [6] G. Cárdenas & F. Molina. "Alternatives to treat sludge from sewage treatment plants: A review". *Ingeniería (Colombia), 27*(3), Article 17945.2022. doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.17945>
- [7] F.Chimuca, S.Do Canto, T. De Sousa, D. Leite, & S. Lopes. "Anaerobic dynamic membrane bioreactor applied to wastewater treatment: A review". *Afinidad, 80*(598), 20-34.2022. doi: <https://doi.org/10.55815/413319>
- [8] F. Vleeschauwer, M. Caluwé, T. Dobbeleers, H. Stes, L. Dockx, F.Kiekens, C. Copot & J. Dries. "A dynamically controlled anaerobic/aerobic granular sludge reactor efficiently treats brewery/bottling wastewater". *Water Science and Technology, 84*(12), 3515-3527.2021. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.470>
- [9] X. Fu, P. Chan, V. Chin, Z. Boon, W. Chen, Y. Zhao, S. Heberlein, Y. Gu, J. Oh & G. Lisak. "Converting sludge to slag through a high temperature slagging co-gasification process: An evaluation based on a demonstration trial and life cycle assessment". Chemical Engineering Journal, 468, Article 143475.2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143475>
- [10] K. Gautam, T. Kamilya, S. Verma, S. Muthukumaran, V. Jegatheesan & D. Navaratna. "Evaluation of membrane cake fouling mechanism to estimate design parameters of a submerged AnMBR treating high strength industrial wastewater". Journal of Environmental Management, 301, Article 113867. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113867>
- [11] S.Hamimed, T. Barkaoui, I. Trabelsi, A. Landoulsi & A. Chatti. "High-performance biological treatment of tuna wash processing wastewater using *Yarrowia lipolytica*". Environmental Science and Pollution Research, 28(2), 1545-1554. 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10586-6>
- [12] S.Joudah, & G. Racoviteanu. "Membrane bioreactors used for treatment of food industry effluents". E3S Web of Conferences, 85*, Article 07013. 2019. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198507013>
- [13] P. Leonard, E. Clifford, W. Finnegan, A. Siggins & X. Zhan. "Deployment and optimisation of a pilot-scale iasbr system for treatment of dairy processing wastewater". Energies, 14(21), Article 7365.2021. doi: <https://doi.org/10.3390/en14217365>
- [14] A. Mursalim, S.Pallu, M. Selintung & R. Rahim. "The effectiveness of increasing the amount of Return Activated Sludge (RAS) in wastewater with a combination biofilter system on bulking parameters". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 841(1), Article 012026. 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/841/1/012026>
- [15] F. Ostovar, N. Abedinzadeh, S. Pourkarim, H. Mirblooki & M. Yazdi. "Combination of coagulation and oxidation processes for treatment of real fish canning wastewater". Desalination and Water Treatment, 211, 131-140. 2021. doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26595>
- [16] M. Prihandrijanti, J. Marcos & C.Salim. "Integrated anaerobic-aerobic and wetland system for wastewater treatment and recycling in fish canning industry". Chemical Engineering Transactions, 83, 127-132. 2021. doi: <https://doi.org/10.3303/CET2183022>
- [17] H. Qiblawey & S. Judd. "Industrial effluent treatment with immersed MBRs: Treatability and cost". Water Science and Technology, 80(4), 762-772. 2019. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.318>
- [18] B. Sawadogo, Y. Konaté, W. Moussa, G. Lesage, F. Zavisca, M. Heran & H. Karambiri. "Anaerobic membrane bioreactor coupled with nanofiltration applied to the treatment of beverage industry wastewater under Soudano-Sahelian climatic conditions". Journal of Membrane Science and Research, 8(4), Article 545078. 2022. doi: <https://doi.org/10.22079/JMSR.2022.545078.1521>
- [19] I. Souli, C. Afonso, A. Lopes, J. Pacheco, L. Ciríaco, L. Labiadh, & A. Fernandes. "Treatment of fish canning wastewater by electrochemical oxidation process". Journal of Water Process Engineering, 56, Article 104423. 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104423>
- [20] J. Struk-Sokolowska, U. Kotowska, J. Piekutin, P. Laskowski, & A. Mielcarek. "Analysis of 1H-benzotriazole removal efficiency from wastewater in individual process phases of a sequencing batch reactor SBR". Water Resources and Industry, 28, Article 100182. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100182>