

Contribution and perspectives of microalgae in industrial wastewater recovery: A literature review, 2014 - 2024

Ayala Quispe, Fiorella Stephanie, Bachelor¹ , Zevallos Cuellar, Andrea Victoria, Bachelor² ,
Rodríguez Alegre, Lino Rolando, Master³ , Egúsqiza Rodríguez, Margarita Jesús, Master⁴ , López
Padilla, Rosario del Pilar, Master⁵ , Paz Campaña, Augusto Edward, Master⁶ , Romero Mendoza,
Claudia Sofia, Master⁷ 

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Peru, Lima - Peru, U19200871@utp.edu.pe, U19201786@utp.edu.pe,
C22953@utp.edu.pe

^{4,5,6,7}Cesar Vallejo University, Lima - Peru, megusquizar@ucvvirtual.edu.pe, rlopezp@ucv.edu.pe,
aepazc@ucvvirtual.edu.pe, cromeroms@ucvvirtual.edu.pe

Abstract: *Water is essential for human survival; industrial processes, population growth and its concentration in urban areas generate about 380 billion tons of wastewater in the world. Microalgae, recognized for their great efficiency in the treatment of these effluents, make it possible to change the focus from a make-take-waste economy to a circular one; that is: reduce, reuse, recycle and regenerate. The objective was: To document the bibliometric aspects of wastewater treatment using microalgae. The methodology was a systematic review of literature between 2014 and 2024. The search was made in databases such as Scopus, Scielo, PubMed, Wiley Online and Taylor & Francis, identifying 44 articles for analysis; in addition, inclusion and exclusion criteria were established following the Prisma methodology. Conclusion: Wastewater treatment using microalgae is a promising solution for its recovery, making it possible to eliminate pollutants and, in addition, mitigate the environmental impact in a transition towards more sustainable practices.*

Keywords— *Wastewater, Wastewater recovery, microalgae, Circular economy, Industrial effluents.*

Contribución y perspectivas de las microalgas en la recuperación de las aguas residuales industriales: Una revisión de literatura, 2014 - 2024

Ayala Quispe, Fiorella Stephanie, Bachelor¹ , Zevallos Cuellar, Andrea Victoria, Bachelor² , Rodríguez Alegre, Lino Rolando, Master³ , Egúsqiza Rodríguez, Margarita Jesús, Master⁴ , López Padilla, Rosario del Pilar, Master⁵ , Paz Campaña, Augusto Edward, Master⁶ , Romero Mendoza, Claudia Sofía, Master⁷ 

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Lima - Perú, U19200871@utp.edu.pe, U19201786@utp.edu.pe, C22953@utp.edu.pe

^{4,5,6,7}Universidad César Vallejo, Lima - Perú, megusquizar@ucvvirtual.edu.pe, rlopez@ucv.edu.pe, aepazc@ucvvirtual.edu.pe, cromeroms@ucvvirtual.edu.pe

Resumen: *El agua es esencial para la supervivencia humana; los procesos industriales, el crecimiento poblacional y su concentración en áreas urbanas generan unos 380 mil millones de toneladas de aguas residuales en el mundo. Las microalgas, reconocidas por su gran eficiencia en el tratamiento de estos efluentes, posibilitan cambiar el enfoque desde una economía make – take – waste a una circular; esto es: reducir, reutilizar, reciclar y regenerar. El objetivo fue: Documentar los aspectos bibliométricos acerca del tratamiento de aguas residuales utilizando microalgas. La metodología fue la revisión sistemática de literatura comprendida entre los años 2014 – 2024. La búsqueda se hizo en bases de datos como Scopus, Scielo, PubMed, Wiley Online y Taylor & Francis, identificándose 44 artículos para el análisis; además, se establecieron criterios de inclusión y exclusión siguiendo la metodología Prisma. Conclusión: El tratamiento de aguas residuales mediante microalgas es una solución prometedora para su recuperación, posibilitando la eliminación de contaminantes y, además, mitigar el impacto ambiental en una transición hacia prácticas más sostenibles.*

Palabras Clave— *Aguas residuales, Recuperación de aguas residuales, microalgas, Economía circular, Efluentes industriales.*

I. INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la supervivencia humana y fundamental en los diversos procesos industriales [1]. Se estima que la industrialización, la urbanización y el crecimiento de la población producen unos 380 mil millones de toneladas de aguas residuales en el mundo [2]. Estos efluentes contienen: compuestos orgánicos, químicos nocivos, colorantes, metales pesados, sales y sólidos disueltos, amoníaco, antibióticos, aceites, grasas, altos niveles de pH y desechos nucleares, entre otras toxinas, lo que aumenta la turbidez en las reservas de agua incrementando tanto la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). Por otro lado, reducen la fotosíntesis y afectan el crecimiento de las plantas. Adicionalmente, estas perturbaciones del sistema hídrico incrementan la bioacumulación, la toxicidad, la carcinogenicidad y la mutagenicidad [3]. De forma

complementaria, elementos nutrientes como el nitrógeno y el fósforo liberados sin tratamiento previo pueden ocasionar la eutrofización de los cuerpos de agua naturales cuyos impactos ecológicos se evidencian en la reducción de la biodiversidad, la toxicidad y disminución de la utilidad de los cuerpos de agua [4]. Las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales, tienen como desventajas la variabilidad en la eficiencia de eliminación de compuestos contaminantes, altos costos de instalación y mantenimiento; las mismas que se ven en aumento a medida que se busca incrementar su capacidad [5]; además, emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso N₂O [6]; un problema mundial para reducir la huella de carbono [7].

Los métodos físicos y químicos son las técnicas convencionales para el tratamiento de aguas residuales. El tratamiento físico implica la eliminación de contaminantes del agua sin afectar sus propiedades bioquímicas [8]. La adsorción, filtración, sedimentación, ebullición, ósmosis inversa, desalinización, destilación e irradiación de luz se incluyen entre los métodos físicos; en tanto que, la cloración, floculación, coagulación y el intercambio iónico, entre otros, constituyen los métodos químicos. Estos últimos como parte de sus limitaciones, no son muy eficaces ni adecuados para la degradación de iones de metales pesados o productos químicos tóxicos. Por otro lado, alternativas como la irradiación ultravioleta, la incineración o los tratamientos con ozono, son más costosos y no se adecuan a las necesidades del momento [9] [10]. Adicionalmente, las nanopartículas de las microalgas, como los nanomateriales provenientes de las diatomeas y el empleo de las microalgas como biosensores para la determinación de contaminantes en efluentes [11] han dado lugar a métodos potencialmente más económicos, ecológicos y sostenibles en el tratamiento de aguas residuales [12] [13].

A las microalgas se les reconoce como los microorganismos más eficientes para el tratamiento de efluentes industriales y fue en la década de los 40 cuando, por vez primera, se hizo mención

acerca de su potencial como biocombustible [14]; además, su biomasa sirve como sustrato para la síntesis de biocombustibles. Las microalgas crecen de forma natural en aguas residuales y eliminan contaminantes como metales pesados, nitritos, fosforo y algunos compuestos químicos complejos de estos [15]; ayudan a eliminar bacterias y patógenos fecales [16] además de proporcionar condiciones óptimas para una mejor producción de lípidos [17]. Las microalgas son microorganismos eucariotas unicelulares renovables presentes tanto en el suelo, cuerpos de agua dulce y los océanos. Su filogenia es diferente a la de las plantas terrestres [18]. Tienen tasas de desarrollo rápidas, alta productividad, incluso con materiales limitados y acumulan cantidades importantes de ácidos grasos y tienen una notable capacidad de adaptación [16]. El principal aporte de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales son los diferentes mecanismos que poseen para la eliminación de contaminantes múltiples a través de un sistema algal-bacteriano mediante diversos procesos [19].

Los beneficios de las microalgas se pueden resumir del modo siguiente: Primero, podrían eliminar y/o reducir nutrientes, contaminantes orgánicos, metales pesados, la (DQO) y (DBO) en aguas residuales de forma eficaz [1]. Segundo, la biomasa de algas cultivadas en aguas residuales podría ser fuente potencial de productos que podrían utilizarse en el campo de los biocombustibles, cosméticos, productos farmacéuticos y los nutraceuticos [20] [21][22]. Tercero, el tratamiento de aguas residuales mediante microalgas podría ayudar a integrar como parte del mismo: el secuestro industrial de CO₂, valorizar la biomasa de microalgas cambiando el enfoque de tratamiento de las aguas residuales desde uno de economía lineal; esto es: extraer, producir, desperdiciar al de una economía circular que implica: reducir, reutilizar, reciclar y regenerar [23].

La Revisión Sistemática de Literatura (RSL), es un artículo académico que incluye hallazgos sustanciales como contribuciones teóricas y metodológicas sobre un tema en particular [24]. Se analizaron investigaciones desarrolladas respecto a la utilización de las microalgas para el tratamiento y remediación de aguas residuales industriales y proponiéndose como pregunta de investigación lo siguiente: ¿Qué se conoce acerca de las microalgas y su aplicación para el tratamiento de aguas residuales?

La justificación para trabajar este tema fue contar con mayores alcances sobre alternativas para el tratamiento de efluentes industriales, pues se deben aunar esfuerzos para su recuperación. Respecto al objetivo general, se propuso el siguiente: Documentar los aspectos bibliométricos acerca del tratamiento de aguas residuales utilizando microalgas. La revisión de estas investigaciones estuvo comprendida entre los años 2014 – 2024.

Además, se discute los obstáculos y retos futuros respecto al uso de las microalgas y las perspectivas de su aplicación. Se emplearon ecuaciones de búsqueda en bases de datos de impacto. El diseño metodológico tomó como referencia el

esquema general de las revisiones sistemáticas. Los resultados recogen el procesamiento de la información de las publicaciones de las bases datos. Finalmente, se detallan las conclusiones de la revisión.

II. METODOLOGÍA

La (RSL) se define como “un esfuerzo académico para identificar, evaluar y sintetizar exhaustivamente investigaciones relevantes sobre un tema en particular. Se utilizan para probar una hipótesis o vincular una serie de hipótesis” [24]. La secuencia seguida fue la siguiente:

Estrategias de búsqueda sistemática

1. Pregunta PICO

Se aplicó la estrategia de la pregunta PICO y para alcanzar el objetivo propuesto se planteó como pregunta de investigación la siguiente:

- RQ: ¿Cuál es la contribución de las microalgas en la recuperación de las aguas residuales del sector industrial? A partir de ello se desglosaron las siguientes interrogantes:
- RQ1: ¿Cómo son los procesos para la recuperación de las aguas residuales del sector industrial?
- RQ2: ¿Cuáles son los resultados obtenidos por el uso de microalgas en la recuperación de las aguas residuales del sector industrial?

A partir de las interrogantes propuestas se obtuvieron las palabras claves que sirvieron como guía para la búsqueda de los artículos de investigación. Estas fueron: “Aguas residuales”, “Microalgas”, “Recuperación de las aguas residuales”, “Tratamiento de aguas residuales” y “Sector Industrial”. Así, se hizo una búsqueda más precisa en la base de datos Scopus y otras similares.

TABLA 1.
PALABRAS CLAVES OBTENIDAS DE LAS PREGUNTAS PICO

Componente	Palabras clave
P Problema	Recuperación de las aguas residuales “Wastewater” OR “wastewater recovery” OR “microalgae” OR “Contribution of microalgae” OR “Water reclamation”
I Intervención	Utilización de microalgas OR“Benefits of microalgae” OR “industrial sector”
C Comparación	- - “Wastewater recovery” OR “Contribution of microalgae” OR
O Resultados	Recuperación de las aguas residuales “recovery of wastewater” OR “Wastewater treatment”

C	Contexto	Sector Industrial	OR "Industrial sector" OR "microalgae using" OR "wastewater recovery"
---	----------	-------------------	---

A partir de las palabras claves, se elaboraron códigos de búsqueda como base de la ecuación siguiente: ("Wastewater" OR "wastewater recovery" OR "microalgae") AND ("Usage of microalgae" OR "microalgae" OR "Water Reclamation") AND ("Benefits of microalgae" OR "Industrial sector" OR "Wastewater treatment" OR "Wastewater") AND ("Wastewater recovery" OR "Contribution of microalgae" OR "recovery of wastewater") AND ("Industry Sector" OR "microalgae" OR "wastewater recovery")

2. Criterios de inclusión y exclusión

Sirvieron para identificar las investigaciones efectuadas y filtrar los documentos relevantes. Los criterios establecidos fueron los siguientes:

TABLA 2.
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

Criterios de Inclusión	Criterios de exclusión
CI1. La investigación debería incluir el uso de las microalgas al tratamiento de aguas residuales en el sector industrial.	CE1. Estudios desarrollados con otros métodos para la recuperación de aguas residuales
CI2. Se debe buscar estudios que incluyan los métodos de recuperación de aguas residuales industriales mediante microalgas.	CE2. Estudios desarrollados en un contexto diferente al sector industrial.
CI3. Los estudios deben tener datos sobre la aplicación de microalgas en la recuperación de aguas residuales del sector industrial provenientes de bases de datos indexadas.	CE3. Publicaciones de artículos de páginas no confiables.
CI4. Publicaciones acerca del tema de los años 2014 - 2024	CE4. Las publicaciones que se encuentren fuera de ese rango de años.

B. Proceso de selección de estudios

A partir de la ecuación de búsqueda propuesta para la base de datos de Scopus así como aquellas provenientes de Scielo, PubMed, Springer y los criterios de inclusión y exclusión señalados. Se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA 3.
DOCUMENTOS POR BASE DE DATOS

Fuente	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total
Scielo	1						1
Scopus	1	2	1	1	0	2	7
PubMed			1				1
Wiley Online					1		1

Fuente	2020	2021	2022	2023	2024	Total
Scopus	4	6	6	6	3	25
Taylor & Francis	1	1	2	1		5
Wiley Online	1	1	1			3
Pubs	1					1

Para una búsqueda coherente que cumpla con estándares de calidad y trazabilidad garantizando su validez, se ha seguido los criterios de la estrategia PRISMA [25]

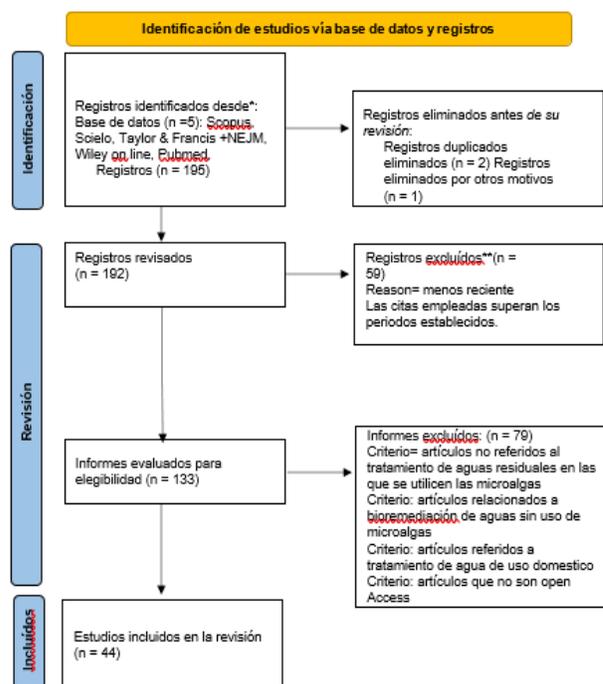


Fig 1. Diagrama de flujo de fases según modelo

Se aplicó la ecuación para las diferentes bases de datos, encontrándose un total de 195 documentos. Luego de eliminarse 3 documentos quedaron inicialmente 192 artículos de potencial utilidad. Al revisar los resúmenes se eliminaron 59 pues excedían el periodo de revisión quedando 133 documentos considerados como adecuados. Además, se eliminaron 79 documentos pues no estaban referidos al tratamiento de aguas

residuales en las que se utilicen las microalgas, se referían a tratamiento de aguas para uso doméstico, biorremediación de aguas sin hacer uso de las microalgas y no eran Open Access. Finalmente se recuperaron 44 documentos, los que se consideraron como los adecuados para la investigación.

III. RESULTADOS

Producto del análisis de los 44 artículos seleccionados se describen a continuación, los principales hallazgos relacionados con el objetivo propuesto.

Se analizaron los artículos recuperados que hacen referencia al tratamiento de aguas residuales con diferentes microalgas utilizados en diferentes ambientes contaminados.

[26] En la acuicultura convencional con alta densidad de población, el agotamiento del oxígeno y la eutrofización son los principales problemas. Las microalgas pueden resolverlos mediante la fotosíntesis y la asimilación de nutrientes, cambiando el perfil de la comunidad bacteriana creando un entorno favorable para la cría de peces. Es de esperar que la aplicación de la biotecnología de microalgas resuelva algunos problemas de la acuicultura y la industria.

[27] La biofloculación es una técnica prometedora para la recolección de algas, así como para la recuperación de nutrientes de aguas residuales; en esa medida, el cultivo de microalgas con la ayuda de hongos genera atención pues no demandan el uso de productos químicos y requieren poco aporte de energía. La aplicación del cultivo de microalgas asistida por la pelletización de hongos para mejorar el proceso de recolección de algas y la recuperación de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales utilizando dos cepas de microalgas marinas (*Nannochloropsis salina* y *Chlorella salina*) y tres especies de hongos marinos (*Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus niger* y *Aspergillus fumigatus*). Después de 48 horas de cultivo, la mayor eficiencia de floculación (98.9%) correspondió a la asociación *A. fumigatus* y *C. salina*, en tanto que el porcentaje más bajo (85.9%) fue para la asociación *A. niger* y *N. salina* [27].

[28] Las microalgas se perfilan como poderosos agentes de biorremediación en los sistemas para el tratamiento, digestión y eliminación de contaminantes de las aguas residuales y ciertas cepas tienen la capacidad para absorber una diversidad de contaminantes, incluidos metales pesados, compuestos nitrogenados y productos químicos nocivos, lo que fomenta un enfoque multifacético para la purificación del agua y la administración del medio ambiente. La incorporación de microalgas como agentes de biorremediación en estos sistemas permite la reutilización tanto del agua regenerada y la biomasa producida en diversos sectores de la actividad industrial contribuyendo al logro del sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible. En esa medida, los sistemas que utilizan microalgas pueden integrarse a los sistemas de tratamiento de agua con que se cuentan para producir biocombustibles actuando, además, como agentes fitoremediadores. El tratamiento de aguas residuales con microalgas incluyen tanto la eliminación de nutrientes, iones de metales pesados, patógenos y la reducción

de DBO utilizando el oxígeno producido mediante la fotosíntesis y tiene, respecto a los tratamientos convencionales, la ventaja de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero; pues al ser microorganismos fotosintéticos, pueden aumentar la absorción de carbono de la atmósfera y convertirlo en biomasa y otros nutrientes que aliviarían el problema del calentamiento global.

[29] Los mataderos, por su alto consumo de agua, generan volúmenes importantes de aguas residuales con alta carga orgánica y concentraciones importantes de nitrógeno y carbono. Este medio favorece el cultivo heterótrofo de organismos unicelulares como las cianobacterias del género *Phormidium*. En esa medida, los sistemas de biorreactores heterótrofos basados en microalgas que son utilizados para el tratamiento secundario de aguas residuales tienen ventajas comparativas respecto a los tratamientos convencionales mediante lodos activados y los sistemas anaeróbicos. Estos sistemas son la forma más rentable de eliminar la materia orgánica de las aguas residuales; por su bajo requerimiento de energía y la eliminación parcial del nitrógeno y fósforo de las aguas residuales ayudando al tratamiento terciario de estas aguas. Los lodos de las microalgas son una biomasa rica que puede utilizarse para la producción de biodiesel. Por otro lado, los biorreactores heterótrofos lograron altas eficiencias en la disminución de DQO y la mejora de los contenidos de nitrógeno y fósforo totales.

[30] A pesar de que las aguas residuales domésticas son un sistema estable y de bajo costo, tanto para el tratamiento mediante microalgas y la generación de biodiesel; sin embargo, estas aguas, se constituyen en un ambiente adverso para el desarrollo de estas por la presencia de contaminantes y depredadores. El cultivo de la cepa *Scenedesmus* sp. ZTY1, registrada con la patente. CGMCC 7059 y aislada en una planta de tratamiento de aguas en Beijing, fue inoculada en una proporción del 2,5% (v/v) en frascos Erlenmeyer que contenían aguas residuales y demostraron un buen rendimiento en la producción de lípidos y en la eliminación de nutrientes de las aguas residuales domésticas. El cultivo de microalgas para la producción de biomasa es una forma muy prometedora para la disposición simultánea tanto de las aguas residuales y la recuperación de nutrientes, en comparación con el proceso de lodos activados, este solo se ocupa de la eliminación de contaminantes; en esa medida, la tecnología de microalgas puede recuperar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo de las aguas residuales en la forma de biomasa valiosa siendo más significativa para el desarrollo sostenible.

[31] Los compuestos fenólicos son los contaminantes más peligrosos de las aguas residuales industriales de los efluentes de las refinerías. Las tecnologías convencionales para su eliminación como la oxidación avanzada, la electrocoagulación, la descomposición térmica y la adsorción tienen una baja eficiencia o tienen un alto requerimiento de energía. Por ello, la biorremediación bacteriana se estima que es un enfoque factible por su costo y, además, es amigable con el medio ambiente pues ocasiona la mineralización total de los

compuestos tóxicos. Se evaluaron, a nivel de laboratorio, cultivos de microalgas de las especies (*Chlorella* sp. y *Tetraselmis* sp.) para eliminar compuestos fenólicos de grado analítico como el fenol, 4-nitrofenol y 2,4-dinitrofenol a diferentes concentraciones que simulaban contenidos de aguas residuales provenientes de refinerías utilizándose la biomasa proveniente de la degradación de los compuestos fenólicos para la producción de biodiésel. Se demostró que el uso de microalgas es seguro y barato comparado con los métodos convencionales ya que no se tienen grandes requerimientos energéticos y sin ningún efecto negativo.

[32] Las aguas residuales de las industrias cárnicas, ganaderas y alimentarias contienen diversos compuestos. Así, las provenientes de las industrias lecheras contienen desechos ricos en carbono, nitrógeno y fósforo. Por otro lado, aquellas provenientes de la producción de vino contiene etanol, azúcares y ácidos orgánicos. Los métodos biológicos, fisicoquímicos y mecánicos de tratamiento eliminan solo los contaminantes más orgánicos y su efecto es mínimo en el manejo de los contaminantes inorgánicos. Por otro lado, las microalgas contribuyen tanto a la remediación de aguas residuales y la producción de biomasa para la generación sostenible de biocombustibles. A ello se añade que es respetuosa con el medio ambiente al no generar contaminación secundaria pues, su biomasa tras la eliminación de nutrientes puede reutilizarse y a su vez eliminar eficientemente los contaminantes orgánicos y/o inorgánicos de estas aguas residuales. Se trabajó con una nueva cepa de microalga aislada de las aguas residuales de una mina de cobre a la que se le denominó como *Diplosphaera* sp. MM1. La misma demostró gran potencial para la remediación de aguas residuales tanto de productos lácteos y las provenientes de bodegas produciéndose simultáneamente biomasa. Así, la mayor producción de biomasa se obtuvo después de 14 días de cultivo y dependió de la variación en la proporción de las combinaciones de aguas residuales y agua desionizada empleada. Las aguas residuales lecheras turbias con alta concentración de nitrógeno y fósforo ralentizaron el crecimiento inicial del alga. Sin embargo, al final del día 14, la producción de biomasa era casi el doble respecto al de las aguas residuales de las bodegas.

[33] Indonesia es el segundo productor mundial de caucho natural después de Tailandia y produjo en el 2017 unas 322.986 toneladas de residuos líquidos que contenían agentes contaminantes como compuestos nitrogenados y fosfatos que inciden en la DBO y la DQO que ocasionan la eutrofización, por lo que estas aguas deben ser tratadas antes de ser vertidos al río. El estudio aplicó procesos de oxidación avanzada de radiación ultravioleta (UV), ozono y una combinación de UV/ozono para el tratamiento de las aguas residuales evaluando la cinética de la DQO, el nitrógeno y la eliminación total de fósforo mediante procesos de oxidación avanzada. El mejor método en términos de tiempo óptimo de exposición a los agentes oxidantes correspondió a la combinación UV/ozono por su mayor constante de velocidad de reacción. Por otro lado, finalizado el tratamiento, se demostró que el efluente resultante

podía utilizarse como potencial medio de cultivo de microalgas y las aguas tratadas mediante el método UV/ozono pueden utilizarse para el cultivo de la *Spirulina platensis* sin requerirse nutrientes externos para su cultivo. Por otro lado, al ser bajo el pH inicial de las aguas residuales no fue tomada en cuenta para el estudio siendo materia de investigación a futuro. Se demostró que los nutrientes de los efluentes de aguas residuales podrían utilizarse como suplementos alimenticios para la producción de microalgas y reducir los costos de producción en los bioprocesos de cultivo a gran escala.

[34] La remediación biológica utilizando las capacidades bioquímicas de los organismos naturales o sus metabolitos se asocia a métodos respetuosos con el medio ambiente para extraer diversos xenobióticos, incluidos los metales pesados, de las aguas residuales de diversas instalaciones industriales. Por ello, es importante evaluar la contribución de las microalgas en la transformación de compuestos de metales pesados como el cadmio (Cd) y cromo (Cr) y la desintoxicación del medio natural. Los metales pesados y otros contaminantes químicos ingresan al hábitat humano por procesos naturales y actividades industriales como la producción de materiales refractarios, fertilizantes fosforados, herbicidas y lodos de depuración que contienen cadmio. Se añaden también, los tintes y pigmentos de la producción textil que contienen cromo, así como la quema de combustibles minerales que han derivado en la contaminación ambiental.

[35] La demanda energética mundial aumenta el riesgo del agotamiento de recursos no renovables como el petróleo, y las microalgas pueden ser una fuente muy rica de energía renovable y sostenible. Sus altas tasas de crecimiento, la capacidad para capturar CO₂ y el poder cultivarse en aguas residuales son su contribución para reducir las huellas de carbono y ecológica; además, al almacenar carbono como lípidos y carbohidratos producen biocombustibles diversos. Lo anterior las asocia a la bioeconomía circular enfocada en la sostenibilidad del medioambiente y objetivos sociales sin agotar los recursos del planeta. La eficiencia fotosintética de las algas en la captura del carbono es de 8,3 % comparado al 2,4 % de las plantas C₃. Por su diversidad metabólica, las microalgas pueden cultivarse en diferentes condiciones de temperatura, pH, CO₂ y salinidad siendo un agente potencial de biorremediación de aguas residuales. Por otro lado, la energía requerida es menor que en los procesos convencionales de lodos activados. Un estudio realizado en España reveló que para el primer caso fue de unos 0,5 kwh por cada m³ de aguas residuales pudiendo reducirse a 0,2 kwh/m³ en el tratamiento mediante microalgas pues estas utilizan luz solar o artificial para asimilar nutrientes de las aguas residuales convirtiendo al carbono fotosintéticamente en biomasa reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Los métodos convencionales de tratamiento utilizan diferentes mecanismos para eliminar los nutrientes disipando el C, N, P a la atmósfera; en tanto que las microalgas utilizan mecanismos de asimilación para eliminar los nutrientes recuperándolos en la biomasa de estas. Así, la sostenibilidad de

recursos y la recuperación de nutrientes es un imperativo de la bioeconomía circular de las microalgas. [36] Señalan las tasas de eliminación de nutrientes contaminantes por diferentes microalgas en diversas fuentes de aguas residuales como se muestran en la Tabla 4.

Clorella sp.	Aguas residuales industriales	NH4-N: 95.6% TP: 26.4%	Vadiveloo et al. (2021)
C. vulgaris	Aguas residuales industriales	N: 100% TP: 60% - 90%	Filippino et al. (2015)

Fuente: Modern Advancement in Biotechnological Applications for Wastewater Treatment through Microalgae: a Review. Institute for Ionics. DOI 10.1007/s11270-023-06409-2

TABLA 4
EFECTOS DE LAS MICROALGAS EN LA ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES CONTAMINANTES EN DIVERSOS TIPOS DE AGUAS RESIDUALES DE DIFERENTES SECTORES INDUSTRIALES.

Microalgas	Fuente de aguas residuales	Eficiencia de eliminación de nutrientes (%)	Referencias
Dunaliella salina	Aguas residuales municipales	NO3: 88% NH4-N: 70% TP: 47.5%	Liu y Yildiz (2018)
Parachlorella kessleri	Efluente secundario	TN: 78.3% TP>97.7% DQO: 88.8%	Chen et al. (2020)
Chlorella pyrenoidosa	Aguas residuales agrícolas	TN: 88.7% TP: 67.6%	Tan et al. (2021)
Espirulina sp. LEB	Residuos de acuicultura (1L)	TN: 79.28% TP: 93.84%	Cardoso et al. (2020)
C. sorokiniana	Deshidratación de lodos	NHA-N: 98% - 100% TN: 63.2% TP: 70%	Srimongkol et al. (2019)
Microalgas autóctonas mixtas	Tanque de sedimentación secundario	NH4-N: 63.2% DQO: 64.9%	Aketo et al. (2020)
Clorella sp. y Scenedesmo	Aguas residuales municipales	NH4-N: 98% TN: 94% TP: 95%	Silambarasan et al. (2021)
S. obliquus	Aguas residuales municipales pretratadas	TN: 99.8% TP: 83.1%	Han et al. (2021)
Picochlorum sp.	HTL-APL	TN: 95.4% TP: 97.2%	Das et al. (2020)
Tetraselmis sp.	HTL-APL	TN: 98.5% TP: 98.0%	Das et al. (2020)
Consortios de microalgas	Aguas residuales industriales	TN: 74% TP: 92%	Villar Navarro et al. (2018)

[37] Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales basadas en microalgas son eficientes para eliminar nitritos, fosfatos, dióxido de carbono, metales pesados, mantener el contenido de oxígeno disuelto y ayudan a reducir los patógenos y las bacterias fecales presentes en las aguas residuales, entre otros. Las especies comúnmente empleadas son las algas verdiazules eucariotas y procarióticas. Además, las microalgas proporcionan una cantidad sustancial de oxígeno molecular como agente oxidante para la oxidación bacteriana reduciendo la DBO y la DQO constituyéndose en una opción sostenible en términos medioambientales por su capacidad de convertir el dióxido de carbono en sustancias químicas y productos combustibles sin causar contaminación y contribuyendo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Finalmente, las tecnologías que hacen uso de microalgas son capaces de tratar las aguas residuales en un solo paso a diferencia de los tratamientos convencionales que requieren múltiples procesos para fijar las proporciones de carbono, nitrógeno y fósforo (C:N:P).

Los sistemas de tratamiento con microalgas son una solución prometedora por su menor consumo de químicos. Además, la recuperación de los bioproductos provenientes de estos sistemas de tratamiento puede reducir el impacto ambiental hasta 5 veces respecto a los sistemas convencionales e impulsar la bioeconomía circular del sector agua por la valorización de los productos como pigmentos naturales, biofertilizantes y biogás que provienen de las microalgas. [38] Otros beneficios además de la reducción de emisiones son la fabricación de productos de valor añadido como: generar electricidad, recuperar nutrientes y fijar carbono inorgánico atmosférico. Respecto a la tecnología a ser empleada, esta debe ser comercialmente viable. Finalmente, las microalgas a ser utilizadas deben poseer cualidades como una alta producción de biomasa, adaptabilidad a diferentes tipos de aguas residuales, composición bioquímica constante y una mayor eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales por la especie a utilizarse respecto a otras que no son muy adecuadas. [39]

El incremento en la demanda mundial de productos agrícolas ha dado lugar a la liberación de un gran volumen de sustancias contaminantes, las que afectan negativamente el medio ambiente. Las microalgas, como método de biorremediación, han demostrado ser el más eficaz y seguro en la eliminación de estos contaminantes respecto a los métodos convencionales, ayudando a disminuir el efecto del calentamiento global por su capacidad para capturar CO2. La Chlorella spp es la microalga más eficiente, económica y la mejor especie para la eliminación

de contaminantes del medio ambiente. Finalmente, a pesar de los éxitos con las microalgas en la producción de biodiésel, la aplicación de la ingeniería genética para la producción de microalgas en el tratamiento de aguas residuales es aún escasa. [40]

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la investigación muestran que las microalgas pueden, de forma eficaz reducir las emisiones de dióxido de carbono y colaborar con las bacterias para eliminar el nitrógeno amoniacal de las aguas industriales residuales. [26] Las investigaciones han revelado que las microalgas tienen la capacidad de acumular metales pesados y reducir eficazmente contaminantes en diversas fuentes de aguas residuales. [28] municipales, industrias diversas y agrícolas, demostrándose que estas pueden ser una alternativa sostenible y efectiva para el tratamiento de aguas residuales, promoviendo la recuperación de recursos y reduciendo el impacto ambiental en un 71%. [27] Además, se destaca la capacidad de las microalgas para fijar carbono a través de la fotosíntesis, pudiendo capturar dióxido de carbono y simultáneamente producir biomasa [37]. Esto sugiere que las microalgas no sólo pueden promover el reciclaje de aguas residuales, sino también mitigar el cambio climático al actuar como sumidero de carbono [26]. Por su parte, [35] [41] señalan que las microalgas se destacan por su capacidad para fijar carbono mediante la fotosíntesis con una eficiencia de hasta el 8,3%, frente al 2,4% de las plantas.

Aun cuando el tratamiento de las aguas residuales mediante microalgas se orienta a la eficiente eliminación del nitrógeno y fósforo, no todos los contaminantes y metales pesados pueden erradicarse de forma efectiva. Por ejemplo, se debe seleccionar entre las diferentes cepas de algas debido a la composición física y química de las aguas residuales atribuibles a su procedencia, los factores de inhibición del medio ambiente y las propias aguas residuales antes de integrar las microalgas al tratamiento por su impacto en el crecimiento de estas y la eficiencia del proceso [42]. Por otro lado, aun cuando, el cultivo de microalgas en aguas residuales es sencilla y eficaz; económicamente, no es una alternativa convincente para tratar las aguas residuales por el alto costo de procesamiento posterior, la pequeña escala de producción y que solo algunas especies y modos de cultivo seleccionados producen una biomasa de calidad que puede convertirse en bioproductos útiles [42]. El desarrollo y diseño de sistemas de cultivo de microalgas de bajo costo es un tema crítico en lo referente al crecimiento de microalgas en aguas residuales para la generación de biomasa y la eliminación de nutrientes. [43] Los fotobiorreactores cerrados son costosos y su diseño es complicado. Los costos tanto de un fotobiorreactor de panel plano, los tubulares, y los de columna de burbujas están entre los 42,2, 26,2 y 15,5 \$ m⁻² respectivamente. Por otro lado, Ahmed y cols. informaron que en la etapa de cultivo se utilizó la mayoría de los recursos operativos y los fotobiorreactores (PBR) requiriéndose casi diez veces más energía cuando se utiliza bombeo y/o la reaireación. El método convencional de cultivo de microalgas fotoautótrofas utiliza CO₂ como fuente de carbono. Sin embargo, los procedimientos para purificar, almacenar y distribuir CO₂ aumentan el costo de producción de microalgas. El cultivo utilizando dióxido de carbono disuelto o

bacterias para producir CO₂ se propusieron como una solución prometedora. El uso de bicarbonato en el medio de cultivo podría incrementar la productividad hasta en un 50% mayor respecto a la del CO₂ reduciendo el costo del cultivo en un 55%. El reciclaje de recursos es también una estrategia para reducir el costo del sistema de cultivo.

Otra barrera en el tratamiento a gran escala de las aguas residuales mediante microalgas es su procesamiento posterior. Se realizan estudios para desarrollar enfoques de recolección económicos y eficaces. [43] propone *Chlorella* sp. biomasa utilizando *Aspergillus* sp., un hongo filamentoso presente en aguas residuales de la melaza para simplificar la recolección y minimizar el costo de producción del proceso. [43] La coagulación con: (sulfato de aluminio, cloruro férrico, coagulantes como el Tanfloc SG y Zetag 8185) seguida de flotación por aire disuelto (DAF) ha demostrado alta eficiencia; sin embargo el contenido residual de hierro y aluminio en el efluente final exige prudencia en el uso de sales metálicas.

[43] A pesar del potencial de las microalgas cultivadas en aguas residuales, se tienen pocas investigaciones acerca del valor de la biomasa. Los estudios futuros deberían concentrarse en encontrar mejores fuentes de aguas residuales, optimizar las condiciones de crecimiento, la acumulación de producto y la extracción y conversión de la biomasa. Además, para favorecer el desarrollo de microalgas, es necesario el desarrollo de técnicas de pretratamiento eficaces y asequibles, así como sistemas de reactores integrados.

Como perspectivas futuras [44] menciona:

Las investigaciones en tratamiento de aguas residuales con microalgas son a nivel piloto llevarlas a escala industrial las expondría a variaciones en la concentración de contaminantes reduciendo la eficiencia y el rendimiento de biomasa. Debe explorarse sobre consorcios de microalgas adaptadas a condiciones ambientales exigentes con capacidad de degradar contaminantes

Se requieren estudios de ingeniería genética para obtener células de microalgas de genoma mejorado adaptadas a circunstancias desfavorables con mayores rendimientos en bioproductos y eliminación de contaminantes

Es necesario comparar la viabilidad económica del tratamiento de aguas residuales con microalgas y los métodos tradicionales. Se tienen pocos estudios y falta pautas de diseño y operación de sistema de tratamiento con microalgas. Se debe investigar para aumentar la resiliencia y flexibilidad de las cepas de microalgas ante diversos tipos de aguas residuales.

Diversas investigaciones han utilizado las microalgas para reducir contaminantes típicos y metales pesados en aguas residuales; además, estas pueden remediar contaminantes provenientes de productos del cuidado personal y los antibióticos. Son necesarias investigaciones sobre algas en el tratamiento biológico y comprender de mejor forma su interacción con las bacterias de las aguas residuales.

Una de las mayores limitaciones de las plantas de tratamiento de aguas residuales a gran escala es inhibir el

crecimiento de las microalgas por el color oscuro de las aguas residuales y los contaminantes peligrosos. Se sugiere, controlar los efluentes o hacer un tratamiento previo antes de introducir las microalgas. Además, por la diversidad y cantidad de nutrientes en las aguas residuales son necesarios tratamientos previos para equilibrar idealmente los nutrientes para las microalgas. Son adecuadas mezclas optimizadas de varias fuentes de agua residuales como nutriente único y equilibrado para las microalgas.

El estimar la cantidad de aguas residuales de procedencia industrial y las formas de cultivo de microalgas pueden diferir según las zonas geográficas, la disponibilidad de luz solar y variaciones de temperatura. En las zonas más frías el cultivo de las microalgas en aguas residuales debería hacerse con fotobiorreactores para obtener productos de alto valor añadido.

Otro reto es el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales a gran escala, especialmente en los procesos de tratamiento basados en microalgas, es el seguimiento de variables como: pH, temperatura, condiciones de las células de microalgas, DBO y OD, requiriéndose tecnologías como el monitoreo en línea y el control remoto

V. CONCLUSIONES

Se identificó la contribución de las microalgas en el tratamiento de las aguas residuales industriales. Destaca la alta capacidad de absorción de contaminantes, ya que las microalgas no solo son eficaces en la eliminación del fósforo y nitrógeno como nutrientes contaminantes de las aguas residuales, sino que también tienen un desempeño esencial en la mitigación de la eutrofización y la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). El uso de microalgas es prometedor debido a que estas ejercen diversos efectos benéficos, como para abordar la disminución de oxígeno mediante la fotosíntesis, la biofloculación que permite la reutilización del medio de cultivo y la eficiente extracción de nutrientes. El uso de ciertas microalgas en la biorremediación de aguas residuales industriales logró una eliminación total o parcial de los contaminantes. Se demostró que *Chlamydomonas* sp. pudo eliminar en su totalidad el amoníaco de las aguas residuales, sin embargo, la microalga que mejores resultados tuvo es *Chlorella vulgaris* logrando una eliminación de casi la totalidad de los nutrientes encontrados en las aguas residuales como: fósforo total, nitrógeno total, amoníaco y carbono orgánico disuelto. También tienen la capacidad para fijar carbono fotosintéticamente con mayor eficiencia que las plantas, ya que estas pueden actuar como sumideros de carbono, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático.

Las microalgas tienen una amplia aplicabilidad en diferentes sectores industriales, como el textil, alimentario y agrícola, demostrando altos niveles de eficiencia en la eliminación de nutrientes contaminantes en diversas fuentes de aguas residuales. Para futuros trabajos se sugiere realizar una revisión del comportamiento de las microalgas ante aguas residuales producidas por las minas. Este tratamiento representa una solución prometedora para la recuperación de aguas residuales

industriales, ofreciendo beneficios tanto en la eliminación de contaminantes como en la mitigación del impacto ambiental, lo que respalda su potencial como herramienta clave en la transición hacia prácticas más sostenibles en los tratamientos de aguas residuales industriales.

AGRADECIMIENTOS

Para valorar el empeño y dedicación de los estudiantes Ayala Quispe Fiorella Stephanie y Zevallos Cuellar Andrea Victoria de la carrera de Ingeniería en Seguridad Laboral y Ambiental de la Universidad Tecnológica del Perú UTP sede Ate.

REFERENCIAS

- [1] Y. Song, L. Wang, X. Qiang, W. Gu, Z. Ma, y G. Wang, «The promising way to treat wastewater by microalgae: Approaches, mechanisms, applications and challenges», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, p. 103012, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.103012.
- [2] M. Qadir *et al.*, «Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source», *Natural Resources Forum*, vol. 44, n.º 1, pp. 40-51, 2020, doi: 10.1111/1477-8947.12187.
- [3] S. Kumari, V. Singh, y D. Singh, «Nanoparticle synthesis advancements and their application in wastewater treatment: A comprehensive review», *10.5267/j.ccl*, vol. 13, n.º 1, pp. 31-40, 2024, doi: 10.5267/j.ccl.2023.9.002.
- [4] L. Li, K. Gao, M. Yang, Q. Zheng, M. Zhang, y X. Deng, «Challenges and potential solutions of microalgae-based systems for wastewater treatment and resource recovery», *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fbioe.2023.1210228.
- [5] D. Dutta, S. Arya, y S. Kumar, «Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices», *Chemosphere*, vol. 285, p. 131245, dic. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131245.
- [6] X. Zhou, F. Yang, F. Yang, D. Feng, T. Pan, y H. Liao, «Analyzing greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment plants using pollutants parameter normalizing method : a case study of Beijing», *Journal of Cleaner Production*, vol. 376, p. 134093, nov. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134093.
- [7] R. Du, C. Li, Q. Liu, J. Fan, y Y. Peng, «A review of enhanced municipal wastewater treatment through energy savings and carbon recovery to reduce discharge and CO₂ footprint», *Bioresource Technology*, vol. 364, p. 128135, nov. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128135.
- [8] M. Sharma *et al.*, «Recent advances in microbial engineering approaches for wastewater treatment: a

- review», *Bioengineered*, vol. 14, n.º 1, p. 2184518, dic. 2023, doi: 10.1080/21655979.2023.2184518.
- [9] A. Fahad, R. M. S. Mohamed, B. Radhi, y M. A. Sahari, «Wastewater and its Treatment Techniques: An Ample Review», *INDJST*, vol. 12, n.º 25, pp. 1-13, jul. 2019, doi: 10.17485/ijst/2019/v12i25/146059.
- [10] G. Crini y E. Lichtfouse, «Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment», *Environmental Chemistry Letters*, vol. 17, n.º 1, pp. 145-155, 2019, doi: 10.1007/s10311-018-0785-9.
- [11] M. J. Khan *et al.*, «Diatom microalgae as smart nanocontainers for biosensing wastewater pollutants: recent trends and innovations», *Bioengineered*, vol. 12, n.º 2, pp. 9531-9549, dic. 2021, doi: 10.1080/21655979.2021.1996748.
- [12] C. Gomez-Solís *et al.*, «Rapid synthesis of ZnO nanocorncoobs from Nital solution and its application in the photodegradation of methyl orange», *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. C, n.º 298, pp. 49-54, 2015, doi: 10.1016/j.jphotochem.2014.10.012.
- [13] B. A. Kairdolf, X. Qian, y S. Nie, «Bioconjugated Nanoparticles for Biosensing, in Vivo Imaging, and Medical Diagnostics», *Anal. Chem.*, vol. 89, n.º 2, pp. 1015-1031, ene. 2017, doi: 10.1021/acs.analchem.6b04873.
- [14] F. Valverde, F. J. Romero-Campero, R. León, M. G. Guerrero, y A. Serrano, «New challenges in microalgae biotechnology», *Eur J Protistol*, vol. 55, n.º Pt A, pp. 95-101, ago. 2016, doi: 10.1016/j.ejop.2016.03.002.
- [15] X.-H. Wang, X. Wang, G. Huppel, R. Heijungs, y N.-Q. Ren, «Environmental implications of increasingly stringent sewage discharge standards in municipal wastewater treatment plants: case study of a cool area of China», *Journal of Cleaner Production*, vol. 94, pp. 278-283, may 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.007.
- [16] X. Liu, G. Chen, Y. Tao, y J. Wang, «Application of effluent from WWTP in cultivation of four microalgae for nutrients removal and lipid production under the supply of CO₂», *Renewable Energy*, vol. 149, pp. 708-715, abr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.12.092.
- [17] H. S. Kusuma, N. Illiyanasafa, D. E. C. Jaya, H. Darmokoesoemo, y N. R. Putra, «Utilization of the microalga *Chlorella vulgaris* for mercury bioremediation from wastewater and biomass production», *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 37, p. 101346, feb. 2024, doi: 10.1016/j.scp.2023.101346.
- [18] R. K. Oruganti, K. Katam, P. L. Show, V. Gadhamshetty, V. K. K. Upadhyayula, y D. Bhattacharyya, «A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal», *Bioengineered*, vol. 13, n.º 4, pp. 10412-10453, abr. 2022, doi: 10.1080/21655979.2022.2056823.
- [19] H. Li, S. Chen, K. Liao, Q. Lu, y W. Zhou, «Microalgae biotechnology as a promising pathway to ecofriendly aquaculture: a state-of-the-art review», *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 96, n.º 4, pp. 837-852, 2021, doi: 10.1002/jctb.6624.
- [20] Q. Lu y Y. Lu, «Microalga- and yeast-based astaxanthin production via nutrient recovery from wastewater for aquaculture practice: an emerging technology for sustainable development», *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 97, n.º 11, pp. 3035-3048, 2022, doi: 10.1002/jctb.7164.
- [21] Q. Lu y Y. Xiao, «From manure to high-value fertilizer: The employment of microalgae as a nutrient carrier for sustainable agriculture», *Algal Research*, vol. 67, p. 102855, sep. 2022, doi: 10.1016/j.algal.2022.102855.
- [22] S. A. Vaz, S. M. Badenes, H. M. Pinheiro, y R. C. Martins, «Recent reports on domestic wastewater treatment using microalgae cultivation: Towards a circular economy», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 30, p. 103107, may 2023, doi: 10.1016/j.eti.2023.103107.
- [23] M. Newman y D. Gough, «Systematic Reviews in Educational Research: Methodology, Perspectives and Application», en *Systematic Reviews in Educational Research: Methodology, Perspectives and Application*, O. Zawacki-Richter, M. Kerres, S. Bedenlier, M. Bond, y K. Buntins, Eds., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2020, pp. 3-22, doi: 10.1007/978-3-658-27602-7_1.
- [24] M. M. Albhirat *et al.*, «The PRISMA statement in enviropreneurship study: A systematic literature and a research agenda», *Cleaner Engineering and Technology*, p. 100721, ene. 2024, doi: 10.1016/j.clet.2024.100721.
- [25] F. Chen, Y. Xiao, X. Wu, Y. Zhong, Q. Lu, y W. Zhou, «Replacement of feed by fresh microalgae as a novel technology to alleviate water deterioration in aquaculture», *RSC Adv.*, vol. 10, n.º 35, pp. 20794-20800, may 2020, doi: 10.1039/D0RA03090B.
- [26] A. Madkour, H. Ibrahim, W. El-Sayed, y K. El-Moselhy, «Bioflocculation technique for microalgal harvesting and wastewater nutrient recovery», *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, vol. 19, n.º 4, pp. 1780-1794, jul. 2020, doi: 10.22092/ijfs.2018.117674.
- [27] H. A. Hasan *et al.*, «Revolutionizing wastewater treatment with microalgae: Unveiling resource recovery, mechanisms, challenges, and future possibilities», *Ecological Engineering*, vol. 197, p. 107117, dic. 2023, doi: 10.1016/j.ecoleng.2023.107117.
- [28] M. M. Maroneze, J. S. Barin, C. R. de Menezes, M. I. Queiroz, L. Q. Zepka, y E. Jacob-Lopes, «Treatment of cattle-slaughterhouse wastewater and the reuse of sludge for biodiesel production by microalgal heterotrophic bioreactors», *Sci. agric. (Piracicaba,*

- Braz.*), vol. 71, pp. 521-524, dic. 2014, doi: 10.1590/0103-9016-2014-0092.
- [29] T.-Y. Zhang, Y.-H. Wu, y H.-Y. Hu, «Domestic wastewater treatment and biofuel production by using microalga *Scenedesmus* sp. ZTY1», *Water Science and Technology*, vol. 69, n.º 12, pp. 2492-2496, abr. 2014, doi: 10.2166/wst.2014.160.
- [30] M. Abu Jayyab y S. Al-Zuhair, «Use of Microalgae for Simultaneous Industrial Wastewater Treatment and Biodiesel Production», *Int J Environ Res*, vol. 14, n.º 3, pp. 311-322, jun. 2020, doi: 10.1007/s41742-020-00259-0.
- [31] C. Liu, S. Subashchandrabose, H. Ming, B. Xiao, R. Naidu, y M. Megharaj, «Phycoremediation of dairy and winery wastewater using *Diplosphaera* sp. MM1», *J Appl Phycol*, vol. 28, n.º 6, pp. 3331-3341, dic. 2016, doi: 10.1007/s10811-016-0894-4.
- [32] H. Hadiyanto, M. Christwardana, D. Indah Pratiwi, S. Silviana, M. Syarifudin, y A. Khoironi, «Rubber wastewater treatment using UV, ozone, and UV/ozone and its effluent potency for microalgae *Spirulina platensis* cultivation medium», *Cogent Engineering*, vol. 7, n.º 1, p. 1797980, ene. 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1797980.
- [33] M. O. Bauenova *et al.*, «Potential of microalgae *Parachlorella kessleri* Bh-2 as bioremediation agent of heavy metals cadmium and chromium», *Algal Research*, vol. 59, p. 102463, nov. 2021, doi: 10.1016/j.algal.2021.102463.
- [34] Ahmad Imran, Abdullah Norhayati, Iwamoto Koji, y Yuzir Ali, «The Contribution of Microalgae in Biorefinery and Resource Recovery: A Sustainable Approach leading to Circular Bioeconomy», *Chemical Engineering Transactions*, vol. 89, pp. 391-396, dic. 2021, doi: 10.3303/CET2189066.
- [35] S. Goyal *et al.*, «Modern Advancement in Biotechnological Applications for Wastewater Treatment through Microalgae: a Review», *Water Air Soil Pollut*, vol. 234, n.º 7, p. 417, jun. 2023, doi: 10.1007/s11270-023-06409-2.
- [36] S. Bolognesi, D. Cecconet, A. Callegari, y A. G. Capodaglio, «Combined microalgal photobioreactor/microbial fuel cell system: Performance analysis under different process conditions», *Environmental Research*, vol. 192, p. 110263, ene. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2020.110263.
- [37] L. T. Arashiro, I. Josa, I. Ferrer, S. W. H. Van Hulle, D. P. L. Rousseau, y M. Garfi, «Life cycle assessment of microalgae systems for wastewater treatment and bioproducts recovery: Natural pigments, biofertilizer and biogas», *Science of The Total Environment*, vol. 847, p. 157615, nov. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157615.
- [38] S. Kandasamy, M. Narayanan, R. Raja, K. Devarayan, y R. Kavitha, «The current state of algae in wastewater treatment and energy conversion: a critical review», *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 33, p. 100469, jun. 2023, doi: 10.1016/j.coesh.2023.100469.
- [39] H. Saidu, J. Mohammed Ndejiko, N. Abdullahi, A. Bello Mahmoud, y S. Eva Mohamad, «Microalgae: a cheap tool for wastewater abatement and biomass recovery», *Environmental Technology Reviews*, vol. 11, n.º 1, pp. 202-225, dic. 2022, doi: 10.1080/21622515.2022.2147453.
- [40] G. Flores-Salgado, F. Thalasso, G. Buitrón, M. Vital-Jácome, y G. Quijano, «Kinetic characterization of microalgal-bacterial systems: Contributions of microalgae and heterotrophic bacteria to the oxygen balance in wastewater treatment», *Biochemical Engineering Journal*, vol. 165, p. 107819, ene. 2021, doi: 10.1016/j.bej.2020.107819.
- [41] W. S. Chai, W. G. Tan, H. S. Halimatul Munawaroh, V. K. Gupta, S.-H. Ho, y P. L. Show, «Multifaceted roles of microalgae in the application of wastewater biotreatment: A review», *Environmental Pollution*, vol. 269, p. 116236, ene. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116236.
- [42] S. R. Chia *et al.*, «Analysis of Economic and Environmental Aspects of Microalgae Biorefinery for Biofuels Production: A Review», *Biotechnology Journal*, vol. 13, n.º 6, p. 1700618, 2018, doi: 10.1002/biot.201700618.
- [43] H. El Bakraoui, M. Slaoui, J. Mabrouki, D. Hmouni, y C. Laroche, «Applied Sciences | Free Full-Text | Recent Trends on Domestic, Agricultural and Industrial Wastewaters Treatment Using Microalgae Biorefinery System». Accedido: 27 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/1/68>
- [44] A. Abdelfattah *et al.*, «Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects», *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 13, p. 100205, ene. 2023, doi: 10.1016/j.ese.2022.100205.