

Use of photosynthetic microorganisms in wastewater treatment: a systematic review on nutrient removal

Jesus D. Huachopoma¹ ; Nerio D. Martinez² 

^{1,2} Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería en Seguridad Laboral y Ambiental, Lima - Perú,
U21321099@utp.edu.pe, U21207633@utp.edu.pe

Abstracts– The accumulation of nitrogen and phosphorus in water bodies is one of the main drivers of eutrophication and environmental degradation, a problem that conventional treatments do not always solve due to their high costs and energy requirements. In this context, this review analyzes the potential of microalgae and cyanobacteria as a sustainable alternative for wastewater purification. A systematic search was conducted in SCOPUS up to September 2025, following the PICO methodology and the PRISMA flow diagram, identifying 235 studies, of which 36 met the inclusion criteria as original research published between 2020 and 2025 with experimental data on nutrient removal. The findings show that these microorganisms can remove more than 90% of nitrogen and phosphorus, with species such as (*Chlorella*) and (*Scenedesmus*) standing out. Additionally, microalgae–bacteria consortia outperform single cultures due to their metabolic cooperation. Optimal operational conditions reported include pH between 7–8.5, temperatures of 22–28 °C, and minimum photoperiods of 12 hours. Although the technology is promising, challenges remain, such as the lack of methodological standardization, scale limitations since most studies are conducted at laboratory level, and the costs associated with biomass recovery.

Keywords– Microalgae; Wastewater; Nutrient removal; Bioremediation; Microbial consortia

Uso de microorganismos fotosintéticos en el tratamiento de aguas residuales: revisión sistemática sobre la eliminación de nutrientes

Resumen– La acumulación de nitrógeno y fósforo en los cuerpos de agua es una de las principales causas de eutrofización y deterioro ambiental, un problema que los tratamientos convencionales no siempre solucionan por sus altos costos y su demanda energética. Frente a ello, esta revisión analiza el potencial de las microalgas y cianobacterias como una alternativa sostenible para depurar aguas residuales. La búsqueda sistemática fue realizada en SCOPUS hasta septiembre de 2025, siguiendo la metodología PICO y el diagrama PRISMA, identificó 235 estudios, de los cuales 36 cumplieron los criterios al ser investigaciones originales publicadas entre 2020 y 2025 con datos experimentales de remoción de nutrientes. Los hallazgos muestran que estos microorganismos pueden eliminar más del 90% de nitrógeno y fósforo, destacando especies como *Chlorella* y *Scenedesmus*. Además, los consorcios microalga-bacteria superan a los cultivos individuales gracias a su cooperación metabólica. Las condiciones óptimas reportadas incluyen pH entre 7–8.5, temperaturas de 22–28 °C y fotoperíodos mínimos de 12 horas. Aunque la tecnología es prometedora, aún existen retos, como la falta de estandarización, las limitaciones de escala (la mayoría de estudios son de laboratorio) y los costos asociados a la recuperación de biomasa.

Palabras clave– Microalgas; Aguas residuales; Remoción de nutrientes; Biorremediación; Consorcios microbianos

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la acumulación de nutrientes como nitrógeno y fósforo en cuerpos de agua se ha convertido en una de las principales problemáticas ambientales asociadas a las aguas residuales domésticas e industriales. Este exceso de nutrientes provoca procesos de eutrofización que deterioran la calidad del agua, reducen la biodiversidad y generan limitaciones en su uso agrícola, industrial y de consumo humano [1]. A pesar de los esfuerzos realizados con tecnologías convencionales de tratamiento, estas suelen ser costosas, demandar altos niveles de energía y mostrar dificultades de adaptación a condiciones ambientales variables [2].

Ante esta situación, los microorganismos fotosintéticos, en particular microalgas y cianobacterias, han emergido como una alternativa biotecnológica prometedora para la eliminación de nutrientes en aguas residuales. Estos organismos no sólo asimilan nitrógeno y fósforo, sino que también generan biomasa aprovechable en biocombustibles, biofertilizantes y otros productos de interés industrial [3].

Diversos estudios han reportado que la eficiencia de remoción de nutrientes depende de factores ambientales como la disponibilidad de carbono, la intensidad lumínica, el pH y la temperatura, así como de la especie utilizada [2], [4]. Algunos microorganismos muestran mayor afinidad por compuestos específicos, lo que abre la posibilidad de diseñar sistemas especializados según el tipo de agua residual a tratar. Estas características permiten vislumbrar un camino hacia

tecnologías más adaptables, sostenibles y de menor impacto energético frente a los tratamientos convencionales [3].

A la actualidad se han identificado cinco revisiones que abordan la evaluación de los microorganismos fotosintéticos en el tratamiento de aguas residuales, destacando sus beneficios en la remoción de nutrientes y en la valorización de la biomasa [1], [3]. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se han enfocado en contextos específicos ya sea en condiciones de laboratorio, en el análisis de consorcios microalga-bacteria o en tipos particulares de efluente lo que limita su aplicabilidad a escenarios más amplios [2], [4]. Además, persiste una marcada heterogeneidad metodológica en la evaluación de eficiencias, lo que genera resultados difíciles de comparar y reduce la posibilidad de establecer criterios unificados [3], [5]. Frente a estos vacíos, se justifica la necesidad de una revisión sistemática de literatura (RSL) que integre los hallazgos recientes, contraste enfoques tecnológicos y ofrezca una visión crítica que permita proyectar la aplicación de estas biotecnologías hacia sistemas más robustos y sostenibles.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar y sintetizar la evidencia científica reciente sobre el uso de microalgas, cianobacterias y consorcios fotosintéticos para la remoción de nitrógeno y fósforo en aguas residuales, evaluando su eficiencia, las condiciones operacionales que favorecen su rendimiento y los desafíos que aún limitan su aplicación a gran escala.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló como una Revisión Sistemática de Literatura (RSL). La selección de palabras clave para la cadena de búsqueda siguió la metodología PICO con el fin de utilizar una estrategia de búsqueda efectiva en la base de datos SCOPUS. Así mismo el diseño metodológico siguió las recomendaciones de la guía PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), ampliamente utilizada para garantizar transparencia, trazabilidad y reproducibilidad en este tipo de trabajos.

A. Metodología PICO

En el presente estudio, se utilizó la metodología PICO (Población/Problema, Intervención, Comparación y Resultados) para poder realizar la búsqueda de artículos en SCOPUS. Además, se formuló una pregunta de revisión general, que luego se dividió en preguntas según cada componente del PICO

- RQ: ¿Cuál es el potencial de aplicabilidad de microorganismos fotosintéticos como algas y bacterias para la eliminación eficaz de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales?
- RQ1: ¿Cuáles son los niveles de eficiencia máxima de remoción de nitrógeno y fósforo reportados al usar microorganismos fotosintéticos?
- RQ2: ¿Cuáles son las especies de algas o combinaciones microbianas que presentan los mejores resultados en términos de eficiencia?
- RQ3: ¿Cuáles son las condiciones operacionales que se asocian a la mayor eficiencia de remoción de nutrientes?
- RQ4: ¿Qué limitaciones metodológicas se reportan con mayor frecuencia?

Este proceso inicial permitió asegurar que la revisión estuviera bien delimitada y enfocada en los objetivos principales, evitando dispersión temática. Tras la formulación de las preguntas de investigación, se identificaron las palabras claves que se asocian a cada componente. En la tabla I presenta el “Problema”, que se define como aguas residuales ya sean domésticas, industriales o sintéticas. La “Intervención” que describe el uso de microorganismos fotosintéticos específicamente algas, microalgas y bacterias fototróficas. Por último, el “Resultado” que describe el impacto que va a tener la utilización de los microorganismos en las aguas residuales en la “Recuperación de nutrientes” como el fósforo o nitrógeno. La Tabla I muestra los componentes de la metodología “PICO” y las palabras claves identificadas.

TABLA I
METODOLOGÍA PICO

P	Aguas residuales domésticas, industriales o sintéticas (ricas en nutrientes o alta concentración de nutrientes)	("wastewater" OR "effluent")
I	Microorganismos fotosintéticos específicamente algas, microalgas y bacterias fototróficas	("photosynthetic microorganism" OR "microalgae" OR "microalgae" OR "cyanobacteria" OR "Prochlorococcus" OR "algae" OR "photoautotrophic bacteria")
C	No considerado	
O	Eliminación o extracción de nutrientes	("nutrient removal" OR "nutrient recovery" OR "pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "bioprocessing")

Finalmente, con base en estos términos, se construyó la cadena de búsqueda utilizada en la base de datos Scopus, la cual fue la siguiente:

("wastewater treatment" OR "sewage treatment" OR "effluent treatment" OR "water purification") AND ("photosynthetic microorganism" OR "microalgae" OR "cyanobacteria" OR "algae") AND ("nutrient removal" OR "nutrient recovery" OR "nutrient uptake" OR "eutrophication") AND ("pollutant degradation" OR "contaminant removal" OR "toxicant degradation" OR "bioremediation")

Esta ecuación de búsqueda fue aplicada en SCOPUS, la búsqueda y descarga de documentos se realizó el 29/09/2025.

B. PRISMA

El proceso de identificación, cribado y selección de artículos se llevó a cabo siguiendo las directrices establecidas por la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el propósito de garantizar transparencia y trazabilidad metodológica. Es por ello que se definieron criterios de inclusión y exclusión para poder realizar la selección de literatura encontrada, los cuales serán aplicados en las etapas de análisis y poder asegurar la pertinencia de los estudios incluidos. A continuación, en la Tabla II, se detallan los criterios de inclusión y exclusión definidos para los artículos originales.

TABLA II
CRITERIO DE PARA LA SELECCIÓN DE ARTÍCULOS ORIGINALES DE INVESTIGACIÓN

Criterios de inclusión		Criterios de exclusión	
CI1	Se consideraron únicamente artículos científicos originales publicados recientemente (entre 2020 y 2025)	CE1	Se descartaron documentos que se basen en una revisión de literatura
CI2	Se incluyeron estudios que evaluaran de manera directa el uso de microalgas, cianobacterias o consorcios fotosintéticos aplicados al tratamiento de aguas residuales.	CE2	Se excluyeron investigaciones centradas en microorganismos distintos como hongos o virus.

CI3	Solo se seleccionaron artículos disponibles en texto completo y redactados en inglés o español para garantizar una revisión exhaustiva del contenido.	CE3	Se eliminaron publicaciones a las que no se pudo acceder íntegramente o que estuvieran escritas en otros idiomas sin traducción accesible.
CI4	Se aceptaron investigaciones realizadas en distintos efluentes o aguas residuales de fuente domésticas industriales o municipales	CE4	Se excluyeron estudios enfocados exclusivamente en la generación de biomasa o biocombustibles si no analizaron la remoción de nutrientes.

La base de datos seleccionada para la búsqueda y selección de estudios pertinentes fue Scopus, debido a extensa disponibilidad de información científica en el área de ingeniería y ciencias relevantes para el estudio. La búsqueda se llevó a cabo utilizando la cadena de búsqueda diseñada a partir de los componentes de la metodología PICO. En la etapa inicial de búsqueda se consideraron exclusivamente artículos originales, publicados entre 2020 y 2025, redactados en inglés. Como resultado del proceso de búsqueda, se logró identificar un total de 235 artículos de la base SCOPUS. La selección de documentos se realizó mediante la metodología PRISMA. Inicialmente, se descartó los artículos duplicados encontrados de la cual se encontraron 0 artículos. En segundo lugar, se aplicaron los criterios CI1, CI2 y el CE2, mediante los cuales se eliminaron 137 artículos. En tercer lugar, con los resultados recuperados se descartaron 47 artículos por no estar disponibles para su descarga completa, según lo indicado en el CE3, y así mismo, por no tratarse de estudios realizados en efluentes o aguas residuales domésticas, industriales o municipales, según lo señalado en el CI4. En cuarto lugar, de los 54 registros evaluados para su elegibilidad se aplicó el CE4 y CI3, para poder incluir sólo investigaciones relacionadas al tema. Finalmente, luego de obtener los resultados que cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión, se incluyeron 36 registros que se relacionan con los objetivos de la revisión (ver Figura 1).

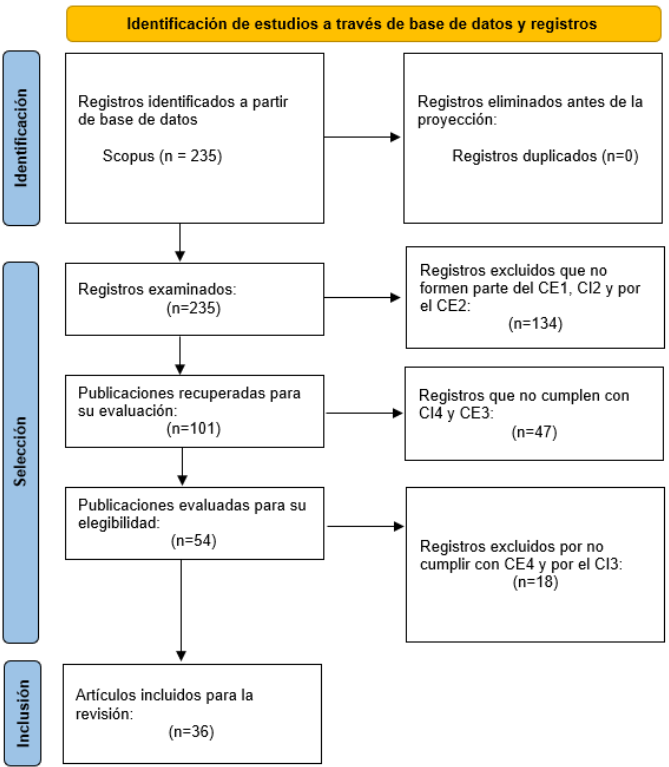


Fig. 1 Diagrama PRISMA
Nota detalla el proceso de identificación, cribado, selección e inclusión de los artículos analizados en la revisión sistemática.

III. RESULTADOS

En los resultados de esta revisión sistemática, se obtuvieron 36 artículos que corresponden a un periodo dentro de los años 2020-2025

RQ1: ¿Cuáles son los niveles de eficiencia de remoción de nitrógeno (N) y fósforo (P) reportados al usar microorganismos fotosintéticos?

En la Tabla III, se muestra que los microorganismos fotosintéticos alcanzan altas eficiencias de remoción de nutrientes en aguas residuales. La eliminación de nitrógeno y fósforo suele situarse entre 90% y 100%. Así, especies como *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Parachlorella* destacan por su desempeño, confirmando que los sistemas microalgales representan una alternativa eficaz y sostenible para la depuración biológica de aguas residuales. En la Tabla III se presentan los principales artículos que reportan elevados porcentajes de eficiencia para la remoción de nitrógeno y fósforo.

TABLA III
ESTUDIOS CON MAYORES EFICIENCIAS DE REMOCIÓN

Nutriente Removido	Rango de Remoción	Referencias
--------------------	-------------------	-------------

Fósforo (P)	>90%	[6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20]
Nitrógeno (N)	>90%	[6], [7], [9], [10], [11], [12], [14], [15], [16], [17], [19], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]

RQ2: ¿Cuáles son las especies de algas o combinaciones microbianas que presentan los mejores resultados en términos de eficiencia?

El análisis de los estudios incluidos en esta revisión demuestra que las especies de microalgas con mayor eficiencia en la remoción de nutrientes, así como las combinaciones microbianas más efectivas, pertenecen principalmente a los géneros *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Chlamydomonas*. Entre ellas, *Chlorella vulgaris* destaca de forma consistente como la microalga más eficiente en monocultivo, alcanzando valores de remoción superiores al 96% para fósforo y entre 99.5% y 100% para nitrógeno [6], [10], [12]. Asimismo, *Chlamydomonas reinhardtii* presenta un desempeño sobresaliente, especialmente en la eliminación de fósforo, con una remoción completa 100%, y eficiencias cercanas al 97% para nitrógeno [7].

Sin embargo, el sistema más eficiente identificado corresponde al consorcio microalga–cianobacteria, integrada por *Scenedesmus sp.* y *Limnothrix sp.*, que alcanzó valores de remoción de 99.1% para fósforo y 99.98% para nitrógeno [16], evidenciando una marcada sinergia metabólica entre ambas especies. Otros consorcios microalga–bacteria nativa, también mostraron altos niveles de eficiencia, entre 94% y 96% para fósforo y entre 91% y 95% para nitrógeno, y se distinguen por su estabilidad y adaptación en aguas residuales complejas, incluidas matrices urbanas e hipersalinas [9], [11], [13],[14].

En la Tabla IV se presentan las especies y consorcios (microalga/bacteria) con las mayores eficiencias de remoción de nutrientes, reportados en la literatura.

TABLA IV
ESPECIES Y COMBINACIONES MÁS EFICIENTES

Autores	Especie de Microalga (s)	Especie de Bacteria
[6], [10], [12]	<i>Chlorella vulgaris</i>	-
[7]	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> <i>Scenedesmus dimorphus</i>	-

[26]	<i>Chlorella pyrenoidosa</i> NCU-12	<i>Acinetobacter y Rhizobia</i>
[9]	<i>Cyanophyceae, Chlorophyceae, Bacillariophyceae</i>	Bacterias nativas
[11]	<i>Chaetoceros muelleri</i>	Bacterias indígenas (<i>Halomonas, Marinobacter</i>)
[13]	<i>Desmodesmus sp. (mutante AT151)</i>	<i>Brevundimonas balnearis, Synechocystis sp.</i>
[14]	<i>Scytonema hyalinum</i>	Bacterias indígenas (principalmente <i>Proteobacteria</i>)
[15]	<i>Chlorococcum sp.</i>	-
[16]	<i>Scenedesmus sp. DDVG I</i>	<i>Limnothrix sp. DDVG II</i>

RQ3: ¿Cuáles son las condiciones operacionales que se asocian a la mayor eficiencia de remoción de nutrientes?

Las condiciones operacionales asociadas a las mayores eficiencias de remoción de nitrógeno y fósforo incluyen pH neutro a ligeramente alcalino, temperaturas templadas y regímenes de iluminación continua o con fotoperíodos prolongados. El nivel de pH que se asocia con una mayor remoción se mantuvo en rangos de 6.8 a 8, condiciones que favorecen tanto la estabilidad metabólica de *Chlorella vulgaris* como la disponibilidad química del fósforo [6], [26], [9], [10], [11], [12].

La temperatura óptima se encuentra entre 18–28°C, siendo 25°C la temperatura más recurrente en estudios con alta eficiencia [7], [11], [12], [20], seguida por 18°C y 22°C en 2 artículos cada uno respectivamente. Temperaturas más bajas de 16–18°C aún permiten la biorremediación aunque probablemente con menor velocidad, mientras que 30°C demuestra que el proceso tolera temperaturas moderadamente altas.

El fotoperíodo muestra mayor variabilidad según el sistema por ejemplo la iluminación continua (24 horas) aparece con mayor frecuencia en los estudios revisados [6], [9], [10], [19], [26]. Sin embargo, los ciclos de 12:12 horas (luz:oscuridad) son menos comunes y efectivos para aguas municipales y domésticas [7]. El fotoperíodo de 16:8 y 14:10 horas también funciona bien en cuanto a la remoción de fósforo y nitrógeno en aguas residuales [11],[20]. En la Tabla V se muestran las condiciones de pH, temperatura y fotoperíodo utilizadas en cada estudio.

En la Tabla V, se presentan las condiciones operacionales óptimas para la remoción de nutrientes.

TABLA V
CONDICIONES OPERACIONALES ÓPTIMAS REPORTADAS PARA
MAXIMIZAR LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES

Autores	Parámetro de operación
7.2 [6], 7 [26], 8.5 [9], 7.1 [10], 7.5 [11], 6.8 [12]	Nivel de pH
22 [9], [10], 25 [7], [11], [12], [20], 28 [26], 18[9], [10]	Temperatura (°C)
24 h luz continua [6], [9], [10], [19], [26], 12L:12D [7], 16h luz / 8h oscuridad [11], 14 h luz/ 10 h oscuridad [20]	Fotoperiodo

RQ4: ¿Qué limitaciones metodológicas o técnicas se reportan con mayor frecuencia?

Las limitaciones operacionales constituyeron el factor reportado con mayor frecuencia, abarcando diez estudios. En esta categoría se incluyen factores como el control insuficiente de parámetros ambientales (pH, temperatura, iluminación y suministro de CO₂), la alta variabilidad en las características del efluente, la turbidez elevada y la dependencia de tratamientos previos o posteriores [11], [14], [17], [21], [24], [28], [31], [32], [33], [34], [9], [16], [23], [24], [35], [36]. Estas limitaciones afectan directamente la estabilidad del cultivo y la eficiencia de remoción de nutrientes, evidenciando la necesidad de mejorar los sistemas de control y automatización en condiciones reales de operación.

Las limitaciones biológicas estuvieron vinculadas a características propias de los microorganismos utilizados, como la inhibición por altas concentraciones de amonio o salinidad, la presencia de organismos depredadores (p. ej., zooplancton), dificultades replicabilidad del estudio y el limitado control sobre las condiciones para ciertas especies nativas [9], [16], [23], [24], [35], [36]. Este conjunto de restricciones destaca la importancia de seleccionar o adaptar cepas tolerantes a condiciones variables y propias de los efluentes reales.

Las limitaciones metodológicas, una de las categorías más amplias. Incluye problemas relacionados con diseños experimentales poco representativos de condiciones operativas reales, escalas de laboratorio que no permiten extrapolación confiable, falta de replicación o de controles adecuados, ausencia de datos operacionales críticos y modelos matemáticos con alta variabilidad o insuficiente validación [7], [8], [10], [13], [15], [18], [19], [20], [25], [27], [29], [30], [37], [38]. Estas limitaciones ponen de manifiesto la necesidad de estandarizar protocolos y aumentar la calidad metodológica para mejorar la comparabilidad entre estudios.

Las limitaciones económicas se basaron principalmente en la falta de análisis tecno-económicos, los costos elevados asociados a infraestructura especializada y la necesidad de evaluar la sostenibilidad financiera del escalado [21], [22], [26], [33]. Aunque estos aspectos suelen quedar fuera del alcance

experimental, su ausencia limita la aplicabilidad práctica de los hallazgos. Por su parte, las limitaciones técnicas del proceso se relacionaron con condiciones del efluente o del sistema que reducen la eficiencia de remoción, como relaciones N:P desfavorables, parámetros de demanda química o bioquímica fuera de rangos óptimos o deficiencias del tipo de reactor o configuración empleada [17], [39], [40]. En la Tabla VI, se presentan las limitaciones frecuente mente reportadas en la literatura sobre el uso de microalgas y bacterias en la remoción de nutrientes en efluentes.

TABLA VI
LIMITACIONES REPORTADAS EN LOS ESTUDIOS

Tipo de Limitación	Autores	Descripción de la Limitación
Operacionales	[11], [14], [17], [21], [24], [28], [31], [32], [33], [34], [9], [16], [23], [24], [35], [36]	Problemas relacionados con control insuficiente de pH, temperatura, luz o CO ₂ ; turbidez elevada; variabilidad ambiental; necesidad de pre/posttratamiento; inhibición por condiciones externas.
Biológicas	[9], [16], [23], [24], [35], [36]	Problemas derivados del diseño experimental: escala pequeña, falta de replicaciones, condiciones demasiado controladas, ausencia de datos operacionales, modelos con alta desviación.
Metodológicas	[7], [8], [10], [13], [15], [18], [19], [20], [25], [27], [29], [30], [37], [38].	Estudios piloto realizados en condiciones ambientales reales (exteriores), expuestos a variaciones climáticas naturales para evaluar la robustez del sistema en condiciones no controladas.
Económicas	[21], [22], [26], [33].	Costos elevados, necesidad de análisis tecno-económico, inversión en infraestructura o tecnología.
Técnicas del proceso	[17], [39], [40]	Ineficiencias del proceso: relación N:P desfavorable, parámetros como COD/BOD por debajo de estándares, problemas de rendimiento inherentes al sistema.
Sin limitaciones reportadas	[12], [41]	Estudios que no describen explícitamente limitaciones.

La gran mayoría de estudios reportan escala de laboratorio, demostrando que la tecnología está en etapa de investigación básica y optimización de parámetros, con limitada validación a escala piloto (solo 4 estudios) y escasos datos en condiciones ambientales reales (solo 2 estudios en exterior)

IV. DISCUSIÓN

Esta revisión sistemática demuestra que los microorganismos fotosintéticos, particularmente microalgas y cianobacterias, representan una alternativa efectiva para eliminar nutrientes de aguas residuales. Los hallazgos revelan que estos sistemas pueden remover nitrógeno y fósforo mientras generan biomasa aprovechable, ofreciendo una solución sostenible frente a tratamientos convencionales de alto consumo energético. El análisis de eficiencias de remoción mostrado en la Tabla III muestra que estos microorganismos alcanzan tasas superiores al 90% tanto para nitrógeno como para fósforo, resultados que concuerdan con estudios previos [3], [33]. Esta alta eficiencia se explica porque las microalgas necesitan nitrógeno para crecer y sintetizar proteínas, mientras que acumulan fósforo como reserva energética [25], [33]. Sin embargo, algunas especies requieren un periodo de adaptación inicial para alcanzar su máximo rendimiento, especialmente cuando la relación N:P no es la óptima [28], [34].

Respecto a las especies más eficientes reportadas en la Tabla IV, encontramos que *Chlorella vulgaris* es la más efectiva individualmente, mientras que *Scenedesmus/Desmodesmus* destaca en sistemas con bajo carbono disponible [1], [18]. Lo más interesante es que los consorcios de microalgas con bacterias superan claramente a los cultivos puros. Esto ocurre porque las microalgas generan oxígeno que las bacterias utilizan para degradar materia orgánica, estableciendo una cooperación beneficiosa para ambos [3], [25]. Estos consorcios han demostrado funcionar incluso en condiciones extremas como aguas muy saladas [34], [44].

En cuanto a las condiciones operacionales mostradas en la Tabla V, los mejores resultados se obtienen con pH entre 7 y 8.5 y temperaturas de 22-28°C, siendo 25°C la más común en estudios exitosos [1], [10], [35]. Para la iluminación, tanto la luz continua como los ciclos de 12 horas luz/oscuridad funcionan bien, dependiendo del objetivo del sistema [10], [26]. Lo importante es garantizar al menos 12 horas diarias de luz para mantener activa la fotosíntesis [34].

Las limitaciones más importantes (Tabla VI) están relacionadas con la escala de trabajo. El 67.4% de los estudios solo alcanzó escala de laboratorio, con apenas seis en escala piloto y dos en condiciones reales [25], [33]. Además, muchos experimentos fueron muy cortos (menos de 30 días) y más de la mitad no reportó datos básicos como pH y temperatura, dificultando reproducir los resultados [33]. A nivel técnico, persisten desafíos en la cosecha y recuperación de biomasa, problemas de contaminación en sistemas abiertos y

dependencia de agregar CO₂, lo que cuestiona su viabilidad económica a gran escala [18], [34].

V. CONCLUSIÓN

El análisis realizado de los 36 estudios que fueron seleccionados permitió identificar y recopilar información científica respecto al uso de microorganismos fotosintéticos para la eliminación eficaz de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales. Los estudios que se revisaron confirman que utilizar microalgas y cianobacterias se asocia a eficiencias de remoción superiores al 90% tanto para nitrógeno como para fósforo. Los microorganismos fotosintéticos demuestran capacidad para trabajar con distintos tipos de aguas residuales ya sean domésticas, municipales o industriales; estos organismos incluyen principalmente especies del género *Chlorella* y *Scenedesmus* que destacan por su desempeño, además de consorcios microalga-bacteria que presentan mejores resultados comparados con monocultivos debido a las interacciones simbióticas que se establecen entre ambos grupos. Respecto a las condiciones operacionales más favorables, se identificaron rangos de pH entre 7 y 8.5, temperaturas de 22 a 28°C y fotoperiodos de al menos 12 horas de luz diaria como los parámetros óptimos. Sin embargo, también se detectaron limitaciones importantes como la predominancia de estudios a escala de laboratorio que representan el 67% del total revisado, mientras que solo 6 trabajos alcanzaron escala piloto y únicamente 2 se realizaron en condiciones exteriores. La falta de uniformidad metodológica dificulta la comparación entre estudios, además persisten desafíos técnicos relacionados con los altos costos de recuperación de biomasa, contaminación por organismos indeseados y dependencia de suplementación con CO₂; por lo que se requiere continuar investigando para estandarizar protocolos, evaluar viabilidad económica y desarrollar sistemas robustos que puedan implementarse a gran escala para una gestión sostenible del recurso hídrico.

Agradecimiento.

expresamos nuestro más profundo agradecimiento a la Universidad Tecnológica del Perú (UTP) por el respaldo institucional y académico fundamental para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, dedicamos este trabajo con inmensa gratitud a nuestros padres y familias, por ser el pilar fundamental de nuestra formación y perseverancia. Su apoyo incondicional, comprensión y aliento han sido la mayor fuente de energía y motivación para culminar con éxito este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Md. A. Alam *et al.*, "Microalgae binary culture for higher biomass production, nutrients recycling, and efficient harvesting: a review", *Environ. Chem. Lett.*, vol. 20, núm. 2, pp. 1153–1168, abr. 2022, doi: 10.1007/s10311-021-01363-z.
- [2] F. Marazzi, M. Bellucci, T. Fantasia, E. Ficara, y V. Mezzanotte, "Interactions between Microalgae and Bacteria in the Treatment of Wastewater from Milk Whey Processing", *Water*, vol. 12, núm. 1, p. 297, ene. 2020, doi: 10.3390/w12010297.
- [3] 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, núm. 4, pp. 10412–10453, abr. 2022, doi: 10.1080/21655979.2022.2056823.
- [4] J. Satiro *et al.*, “The Role of the Microalgae–Bacteria Consortium in Biomass Formation and Its Application in Wastewater Treatment Systems: A Comprehensive Review”, *Appl. Sci.*, vol. 14, núm. 14, p. 6083, ene. 2024, doi: 10.3390/app14146083.
 - [5] C. A. Sepúlveda-Muñoz, I. de Godos, y R. Muñoz, “Wastewater Treatment Using Photosynthetic Microorganisms”, *Symmetry*, vol. 15, núm. 2, p. 525, feb. 2023, doi: 10.3390/sym15020525.
 - [6] S. A. Sousa *et al.*, “Microalgae-based wastewater remediation: Linking N:P ratio and nitrogen sources to treatment performance by *Chlorella vulgaris* and biomass valorisation”, *Chem. Eng. J.*, vol. 518, p. 164701, ago. 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.164701.
 - [7] H. Yuan *et al.*, “Efficient wastewater treatment and biomass co-production using energy microalgae to fix C, N, and P”, *RSC Adv.*, vol. 15, núm. 18, pp. 14030–14041, 2025, doi: 10.1039/D5RA00281H.
 - [8] F. M. Ortega-Blas, J. C. Ramos-Saravia, y P. L. Cossío-Rodríguez, “Removal of Nitrogen and Phosphorus from Municipal Wastewater Through Cultivation of Microalgae *Chlorella* sp. in Consortium”, *Water*, vol. 17, núm. 8, p. 1160, abr. 2025, doi: 10.3390/w17081160.
 - [9] J. F. Sousa *et al.*, “Native Microalgae–Bacteria Consortia: A Sustainable Approach for Effective Urban Wastewater Bioremediation and Disinfection”, *Microorganisms*, vol. 12, núm. 7, p. 1421, jul. 2024, doi: 10.3390/microorganisms12071421.
 - [10] S. A. Sousa, A. F. Esteves, E. M. Salgado, y J. C. M. Pires, “Enhancing urban wastewater treatment: *Chlorella vulgaris* performance in tertiary treatment and the impact of anaerobic digestate addition”, *Environ. Technol. Innov.*, vol. 34, p. 103601, may 2024, doi: 10.1016/j.eti.2024.103601.
 - [11] K. Zhang *et al.*, “Phycoremediation and valorization of hypersaline pickled mustard wastewater via *Chaetoceros muelleri* and indigenous bacteria”, *Bioresour. Technol.*, vol. 393, p. 130172, feb. 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2023.130172.
 - [12] I. Ahmad *et al.*, “Batch cultivation of *Chlorella vulgaris* and simultaneous treatment of restaurant wastewater”, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 177, p. 105815, dic. 2025, doi: 10.1016/j.jtice.2024.105815.
 - [13] P. Li, T. Zou, X. Sun, X. Liu, H. Wan, y Y. Zhang, “Bioremediation of domestic wastewaters integrated with enhanced biodiesel production using *Desmodesmus* sp. mutated by atmospheric and room temperature plasma”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 11, núm. 5, p. 110957, oct. 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.110957.
 - [14] L. Wu *et al.*, “Performance of a biocrust cyanobacteria-indigenous bacteria (BCIB) co-culture system for nutrient capture and transfer in municipal wastewater”, *Sci. Total Environ.*, vol. 888, p. 164236, ago. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164236.
 - [15] H. H. Morsi *et al.*, “Screening the Pollution-Tolerant *Chlorococcum* sp. (Chlorophyceae) Grown in Municipal Wastewater for Simultaneous Nutrient Removal and Biodiesel Production”, *Water*, vol. 15, núm. 9, p. 1723, abr. 2023, doi: 10.3390/w15091723.
 - [16] N. Debeni Devi, X. Sun, B. Hu, y V. V. Goud, “Bioremediation of domestic wastewater with microalgae–cyanobacteria co-culture by nutritional balance approach and its feasibility for biodiesel and animal feed production”, *Chem. Eng. J.*, vol. 454, p. 140197, feb. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.140197.
 - [17] M. O. Faruque, M. M. Hossain, W. Farooq, y S. A. Razzak, “Phototrophic Bioremediation of Municipal Tertiary Wastewater Coupling with Lipid Biosynthesis Using *Scenedesmus dimorphus*: Effect of Nitrogen to Phosphorous Ratio with/without CO₂ Supplementation”, *Sustainability*, vol. 15, núm. 2, p. 1409, ene. 2023, doi: 10.3390/su15021409.
 - [18] D. L. Sutherland y A. Bramucci, “Dissolved organic phosphorus bioremediation from food-waste concentrate using microalgae”, *J. Environ. Manage.*, vol. 313, p. 115018, jul. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115018.
 - [19] H. M. Mustafa y G. Hayder, “Cultivation of *S. molesta* plants for phytoremediation of secondary treated domestic wastewater”, *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, núm. 3, pp. 2585–2592, sep. 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.11.028.
 - [20] R. Chaudhary, Y. W. Tong, y A. K. Dikshit, “Kinetic study of nutrients removal from municipal wastewater by *Chlorella vulgaris* in photobioreactor supplied with CO₂-enriched air”, *Environ. Technol.*, vol. 41, núm. 5, pp. 617–626, feb. 2020, doi: 10.1080/09593330.2018.1508250.
 - [21] K.-Y. Li *et al.*, “Signal molecule-mediated algae–bacteria interactions and membrane-enabled separation synergize wastewater bioremediation”, *Chem. Eng. J.*, vol. 523, p. 168368, nov. 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.168368.
 - [22] M. G. K. Galang, J. Chen, K. Cobb, T. Zarra, y R. Ruan, “Reduction of biogenic CO₂ emissions, COD and nutrients in municipal wastewater via mixotrophic co-cultivation of *Chlorella vulgaris* – aerobic-activated sludge consortium”, *Environ. Technol.*, vol. 46, núm. 17, pp. 3348–3362, jul. 2025, doi: 10.1080/09593330.2025.2463696.
 - [23] L. Sablii, V. Zhukova, y J. Drewnowski, “The strategies of nutrient removal compounds from wastewater by using aquatic plants in the Green deal implementation”, *Desalination Water Treat.*, vol. 321, p. 100954, ene. 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100954.
 - [24] S. Aparicio, L. Borrás-Falomir, A. Jiménez-Benítez, A. Seco, y Á. Robles, “Urban wastewater treatment at ambient conditions using microalgae–bacteria consortia in a membrane high-rate algal pond (MHRAP): The effect of hydraulic retention time and influent strength”, *Environ. Technol. Innov.*, vol. 36, p. 103846, nov. 2024, doi: 10.1016/j.eti.2024.103846.
 - [25] S. Serrano-Blanco, R. Zan, A. P. Harvey, y S. B. Velasquez-Orta, “Intensified microalgae production and development of microbial communities on suspended carriers and municipal wastewater”, *J. Environ. Manage.*, vol. 370, p. 122717, nov. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122717.
 - [26] Z. Hu, J. Li, J. Qian, J. Liu, y W. Zhou, “Efficacy and mechanisms of rotating algal biofilm system in remediation of soy sauce wastewater”, *Bioresour. Technol.*, vol. 406, p. 131047, ago. 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.131047.
 - [27] R. Sarfraz, M. Taneez, S. Sardar, L. Danish, y A. Hameed, “Evaluation of *Desmodesmus subspicatus* for the treatment of wastewater”, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, vol. 103, núm. 15, pp. 3575–3586, dic. 2023, doi: 10.1080/03067319.2021.1910681.
 - [28] A. Morillas-España *et al.*, “Improvement of wastewater treatment capacity using the microalga *Scenedesmus* sp. and membrane bioreactors”, *Algal Res.*, vol. 60, p. 102516, dic. 2021, doi: 10.1016/j.algal.2021.102516.
 - [29] V. C. F. Carvalho, M. Kessler, J. C. Fradinho, A. Oehmen, y M. A. M. Reis, “Achieving nitrogen and phosphorus removal at low C/N ratios without aeration through a novel phototrophic process”, *Sci. Total Environ.*, vol. 793, p. 148501, nov. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148501.
 - [30] T. Aketo *et al.*, “Selection and characterization of microalgae with potential for nutrient removal from municipal wastewater and simultaneous lipid production”, *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 129, núm. 5, pp. 565–572, may 2020, doi: 10.1016/j.jbiosc.2019.12.004.
 - [31] A. G. Tekbaba, N. Kutlu, A. B. Semerci, S. Atik, y T. O. Sevidik, “Nutrient Removal and Biochemical Content Yield of *Chloroidium ellipsoideum* Cultivation in Domestic Wastewater Environment”, *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 236, núm. 5, p. 303, may 2025, doi: 10.1007/s11270-025-07912-4.
 - [32] S. Psatlou *et al.*, “Bioremediation and toxic removal efficiency of raw pharmaceutical wastewaters treated with a cyanobacteria-based system coupled with valuable biomass”, *J. Water Process Eng.*, vol. 58, p. 104895, feb. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.104895.
 - [33] S. Rossi *et al.*, “Microalgal cultivation on digestate: Process efficiency and economics”, *Chem. Eng. J.*, vol. 460, p. 141753, mar. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.141753.
 - [34] B. Porto *et al.*, “Microalgal Growth in Paper Industry Effluent: Coupling Biomass Production with Nutrients Removal”, *Appl. Sci.*, vol. 10, núm. 9, p. 3009, abr. 2020, doi: 10.3390/app10093009.
 - [35] E. Balaji, D. Swaminathan, y V. Sudarshana Deepa, “Assessment of Nutrient Removal Efficiency of Marine Microalgae *Dunaliella salina* in Saline Food Industry Wastewater”, *J. Environ. Nanotechnol.*, vol. 13, núm. 2, pp. 46–51, jul. 2024, doi: 10.13074/jent.2024.06.242598.
 - [36] J. Han *et al.*, “Treating wastewater by indigenous microalgae strain in pilot platform located inside a municipal wastewater treatment plant”,

- Environ. Technol.*, vol. 41, núm. 25, pp. 3261–3271, nov. 2020, doi: 10.1080/09593330.2019.1604816.
- [37] G. Sisman-Aydin y K. Simsek, “Municipal Wastewater Effects on the Performance of Nutrient Removal, and Lipid, Carbohydrate, and Protein Productivity of Blue-Green Algae *Chroococcus turgidus*”, *Sustainability*, vol. 14, núm. 24, p. 17021, dic. 2022, doi: 10.3390/su142417021.
 - [38] E. M. Salgado, A. L. Gonçalves, F. Sánchez-Soberón, N. Ratola, y J. C. M. Pires, “Microalgal Cultures for the Bioremediation of Urban Wastewaters in the Presence of Siloxanes”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, núm. 5, p. 2634, feb. 2022, doi: 10.3390/ijerph19052634.
 - [39] R. A. Martins, E. M. Salgado, A. L. Gonçalves, A. F. Esteves, y J. C. M. Pires, “Microalgae-Based Remediation of Real Textile Wastewater: Assessing Pollutant Removal and Biomass Valorisation”, *Bioengineering*, vol. 11, núm. 1, p. 44, ene. 2024, doi: 10.3390/bioengineering11010044.
 - [40] S. Lima, V. Villanova, F. Grisafi, G. Caputo, A. Brucato, y F. Scargiali, “Autochthonous microalgae grown in municipal wastewaters as a tool for effectively removing nitrogen and phosphorous”, *J. Water Process Eng.*, vol. 38, p. 101647, dic. 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101647.
 - [41] A. Mohseni, M. Kube, L. Fan, y F. A. Roddick, “Potential of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis salina* for nutrient and organic matter removal from municipal wastewater reverse osmosis concentrate”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, núm. 21, pp. 26905–26914, jul. 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09103-6.