

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Investigación sistemática literaria del tratamiento biológico de aguas residuales usando bacterias y microalgas.**

**Andrea Salomé Barbosa Costales**

**Ingeniería Química**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniera Química

Quito, 23 de Noviembre del 2020

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**HOJA DE CALIFICACIÓN**

**DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Investigación sistemática literaria del tratamiento biológico de aguas residuales usando bacterias y microalgas**

**Andrea Salomé Barbosa Costales**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Daniela Almeida Streitwieser, Dr. Ing.**

Quito, 23 de Noviembre del 2020

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Andrea Salomé Barbosa Costales

Código: 00130607

Cédula de identidad: 0503384463

Lugar y fecha: Quito, 23 de Noviembre del 2020

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

En el presente estudio, se realiza una revisión bibliográfica de las publicaciones más actuales en el ámbito del tratamiento de aguas residuales empleando bacterias y microalgas mediante un análisis de los artículos publicados en inglés de los últimos 5 años obtenidos de tres bases de datos bibliográficas: Science Direct, Taylor and Francis y Springer. Después de una revisión completa considerando las palabras claves y el objeto del estudio se encuentra un total de 71 artículos en los cuales se analizan la tendencia del uso de bacterias y microalgas en cuanto a las diferentes aplicaciones, las formas y condiciones de cultivo, y los resultados obtenidos. Adicionalmente, se determinaron los retos actuales y futuros de esta tecnología. Se obtuvo que los microorganismos más empleados son las microalgas donde se destacan los géneros *Chlorella* y *Scenedesmus*. Los sistemas más empleados son biorreactores de membrana con un tipo de cultivo en conjunto y condiciones de operación de pH neutro. Para sistemas abiertos una temperatura entre 24 y 40 °C. En el caso de los sistemas cerrados, las condiciones son una temperatura de 25 a 30 °C al añadir una fuente de luz con una intensidad promedio de 148  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Los rangos de remoción reportados en cuanto a los niveles de fósforo y nitrógeno son: Fósforo total (TP) 67- 99.8 % y Nitrógeno total (TN) 67.5 – 98 %. La tendencia actual son la limpieza de aguas y la producción de biomasa centrada específicamente en la producción de biocombustibles. Se ha identificado que los principales retos en la actualidad corresponden a la dificultad en la recopilación de información debido a que los artículos no presentan las condiciones del sistema de manera completa y los datos se reportan de maneras distintas. Mientras que los retos futuros son la estandarización de un sistema que logre el equilibrio en un sistema multidisciplinario empleando microalgas y bacterias que sea rentable y que abarque la producción de productos de valor a la par del tratamiento de aguas residuales.

**Palabras clave:** microalgas, bacterias, tratamiento de aguas residuales, reactor, revisión.

## ABSTRACT

In the present study, a literature review all publications written in English in the field of water treatment using bacteria and microalgae from the last 5 years are systematically analyzed from three bibliographic databases: Science Direct, Taylor and Francis and Springer. After definition of the key words and screening the articles of the topic of interest, a total of 71 articles were obtained. The trend of the use of bacteria and microalgae in this field of biological water treatment is analyzed according to the different applications, the forms and conditions of cultivation, and the results obtained in terms of removal percentages. Additionally, the current and future challenges of this technology were determined. The review showed that the most used microorganisms are microalgae with *Chlorella* and *Scenedesmus* as the most common genus. While the most widely used system are membrane bioreactors with only one type of culture attached under operating conditions of pH around 7. For open systems, a temperature of 24 to 40 °C. For closed systems, the conditions are a temperature of 25 to 30 °C by adding a light source with an average intensity of 148  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . The reported removal ranges in terms of phosphorus and nitrogen levels are: Total phosphorus (TP) 67 - 99.8 % and Total nitrogen (TN) 67.5 – 98 %. The current trend is the cleaning of waters and the production of biomass focused specifically on the production of biofuels. The challenges found during this review correspond to difficulties in collecting and comparing the information of the different articles, since the conditions of the system are not always provided and the results are calculated with diverse methods. While future challenges are the standardization of a profitable system using microalgae and bacteria with a multidisciplinary approach for the production of valuable products alongside with wastewater treatment.

**Key words:** microalgae, bacteria, wastewater treatment, reactors, review.

**TABLA DE CONTENIDO**

1. INTRODUCCIÓN .....	10
MÉTODOS .....	13
Criterios de elegibilidad .....	14
Fuentes de información y búsqueda.....	15
Proceso de extracción de datos .....	16
Riesgo de sesgo.....	16
Medidas de resumen, Síntesis de resultados y Análisis adicionales .....	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	17
Análisis de los artículos recopilados.....	17
Aplicaciones del tratamiento con microalgas y bacterias .....	18
Microorganismos estudiados para el tratamiento de aguas residuales .....	20
Biorreactores en el tratamiento de aguas .....	21
Remoción de metales .....	25
Remoción de fármacos.....	27
Desafíos actuales y futuros .....	28
CONCLUSIONES.....	29
RERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	32
ANEXOS .....	37

**INDICE DE TABLAS DE ANEXOS**

Tabla Anexos 1. Estadísticas de los artículos publicados en las diferentes revistas .....	37
Tabla Anexos 2. Recopilación de los resultados de los artículos de investigación de limpieza de aguas (25 artículos).....	38



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Resultados del número de artículos en las diferentes bases de datos con las palabras claves ["wastewater treatment" AND microalga?]. .....	15
Figura 2. Resultados del número de artículos en las diferentes bases de datos con las palabras claves ["wastewater treatment" AND microalga? AND biofilm AND reactor NOT anaerobic]. .....	15
Figura 3. Detalle del número de artículos publicados en el rango de tiempo 2015 – 2020. ....	18
Figura 4. Porcentajes de artículos que tratan las diferentes aplicaciones .....	19
Figura 5. a) Tipos de microorganismos empleados en el tratamiento de aguas. b) Descripción de los géneros de microalgas.....	20
Figura 6. Tipos de cultivo empleados en los reactores de los 25 artículos reportados de investigación empleados para el tratamiento de aguas.....	23
Figura 7. Remoción de metales investigados en este estudio.....	26

## 1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas es una prioridad debido a que la humanidad necesita disponer de este recurso básico de primera necesidad. Actualmente, existen varias tecnologías desarrolladas para diferentes tipos de aguas como residuales, grises y de pozos petrolíferos. Las tecnologías más comunes y maduras para el tratamiento de aguas residuales son biorreactores de lodos activados y de membrana conocidos como MBRs, por sus siglas en inglés (Membrane bioreactor) [1], [2]. Estos sistemas trabajan principalmente con bacterias, microalgas o sistemas combinados [3], [4].

Los sistemas de lodos o fangos activados radican en la degradación biológica de la materia orgánica presente en el agua residual empleando un biorreactor aeróbico. El lodo o fango activado y suspendido en el medio está conformado por bacterias que crecen en el reactor y que se sedimentan en el fondo debido a su agrupación. En la siguiente etapa, se separa la masa biológica del líquido empleando un tanque de clarificación, el agua tratada es extraída y los sólidos son recuperados en el fondo para su recirculación al biorreactor o para su disposición final [2].

Los sistemas de biorreactor de membrana son procesos que integran dos partes: el tratamiento de degradación biológica por lodos activados y la separación física de los lodos mediante una membrana que actúa como filtro. El módulo de membrana puede estar colocado externo al biorreactor como una etapa posterior o sumergido en el biorreactor. Este último es conocido como SMBR por sus siglas en inglés (submerged membrane bioreactor) y es comúnmente usado a gran escala en el tratamiento de aguas residuales municipales [1]. A diferencia de los tratamientos empleando únicamente lodos activados, los MBRs se han empleado con más frecuencia debido a las ventajas que traen consigo [5]. Algunas ventajas son la calidad excelente y constante del efluente, una pureza del permeado estable, control autónomo de tiempos de retención del agua y del sólido,

concentraciones superiores de sólidos en suspensión, además de una huella de carbono más pequeña, una producción menor de lodos y un menor volumen [6],[1].

El principal objetivo de todo sistema de tratamiento de aguas residuales es la degradación de materia orgánica, representada por la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Se regula el nitrógeno y el fósforo propios del medio para cumplir con las estrictas concentraciones de estos nutrientes en las aguas de descarga purificadas que son liberadas al medio ambiente [5]. Para esta tarea, ambas tecnologías previamente mencionadas emplean combinaciones de tanques anaeróbicos, anóxicos y aeróbicos, aunque también se puede optar por precipitación química para la eliminación de fósforo [7].

Estos sistemas requieren de muchos equipos que suelen representar entre el 60 y el 80% del consumo total de energía del proceso de tratamiento. Formas alternativas para reducir dichos esfuerzos son la utilización de dichos nutrientes para el cultivo de microalgas que además de purificar las aguas producen simultáneamente biomasa algal que puede ser empleada en múltiples aplicaciones. Es así, que la integración del cultivo de microalgas al tratamiento de aguas permite, además de la purificación de aguas, un ahorro de fertilizantes de nitrógeno y fósforo de alrededor del 15% del costo total del material en el cultivo de microalgas [8].

Una microalga es todo microorganismo que contiene clorofila (a) y otros pigmentos fotosintéticos que realizan fotosíntesis oxigénica. El término microalga, contiene organismos de dos tipos celulares, el primero son las cianobacterias, conocidas como algas o bacterias verde-azules que tienen una estructura celular procariota, [8] y el segundo son las microalgas restantes que tienen una estructura celular eucariota [9].

Las aplicaciones de las microalgas son muy diversas. Entre estas se encuentran la producción de compuestos de valor agregado como productos cosméticos y farmacéuticos, carotenoides y ácidos grasos poliinsaturados, biomasa completa de nutracéuticos y alimentos, eliminación de nanopartículas, biomasa procesada para la producción de biofertilizantes y biocombustibles, captura de dióxido de carbono, producción de bioenergía y recuperación de metales pesados [10], [11].

El sistema integrado consiste de un proceso de eliminación de carbono seguido de un fotobiorreactor para el cultivo de las microalgas. Esto se debe a que las microalgas, al ser sistemas foto-autótrofos, no son capaces de utilizar el carbono orgánico de las aguas residuales como fuente de carbono [12], [13]. La tecnología de eliminación de carbono puede ser la de lodos activados o la de biorreactores de membrana, mientras que la de cultivo de microalgas son los fotobiorreactores que pueden ser de tipo abierto o cerrado [14], [15].

Los biorreactores de membrana integran comúnmente un sistema de microalgas-bacterias conocido como MBS, por sus siglas en inglés (microalgal-bacterial system) [16]. Este sistema se basa en una relación simbiótica entre las microalgas y las bacterias que además es una de las mejores opciones para el tratamiento de aguas y la producción de biomasa. Las microalgas consumen dióxido de carbono, nutrientes y luz como fuente de carbono y energía, y son las encargadas de generar oxígeno y compuestos extracelulares que permiten la degradación de contaminantes por un aumento en su biodisponibilidad y la degradación heterotrófica aeróbica de la materia orgánica [3], [4]. Adicionalmente, la superficie celular de las microalgas proporciona un hábitat estable para el desarrollo de las bacterias, además de facilitar la degradación bacteriana mediante la adsorción enriquecida de contaminantes [17]. Mientras que las bacterias mejoran el

crecimiento de las microalgas mediante la liberación de factores promotores de crecimiento [18].

Es así que la integración de microalgas y bacterias en un solo sistema tiene más ventajas que un sistema individual por lo que este sistema actualmente tiene un gran campo de investigación [19]. La información disponible de la integración de microalgas a los sistemas de tratamiento es amplia y en especial ha sido estudiada a profundidad con respecto al enfoque de los biocombustibles de manera simultánea al tratamiento de aguas [20]. Adicionalmente, también hay literatura sobre sistemas que emplean solamente bacterias [21], [22].

El tema central de este estudio es investigar el estado actual de la ciencia sobre los beneficios que se encuentran al integrar microalgas y bacterias en un solo sistema conjunto para el tratamiento de las aguas residuales. Estos sistemas combinados han sido menos estudiados y empleados con respecto a los sistemas independientes. La motivación de la presente investigación literaria es el establecer los mejores parámetros para un sistema de tratamiento de aguas eficiente. El objetivo de la misma es abarcar las tendencias actuales y futuras en la línea de tiempo estudiada de estos microorganismos con respecto a las especies más empleadas y a los reactores más usados. Se busca determinar la cantidad de artículos que emplean estos microorganismos por separado y en conjunto además de las aplicaciones de los mismos y su número. Se determina también qué tipo de reactor ofrece mejores resultados de remoción y qué revistas hablan del tema.

## **MÉTODOS**

El presente estudio sigue la estructura de la propuesta PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) que se ha desarrollado en base a diversos aspectos novedosos metodológicos y conceptuales de revisiones

sistemáticas a la vanguardia. Esta brinda directrices para la publicación de estos artículos mediante una lista de 27 ítems que deben ser abarcados para un documento de calidad [23],[24], mismos que se presentan a continuación.

### **Criterios de elegibilidad**

Entre los criterios de elegibilidad definidos para la selección de los artículos se encuentran como primer alcance el tipo de artículo, el idioma y las bases de datos utilizadas. Los criterios se resumen en artículos de investigación y revisiones en inglés dentro de las bases de datos de Science Direct, Taylor & Francis y Springer. Para los términos de búsqueda se seleccionaron las palabras claves más empleadas en artículos sobre el tema principal: tratamiento biológico de aguas residuales usando microalgas y bacterias. La búsqueda exacta fue: ["wastewater treatment" AND microalga?] y su resultado se detalla en la Figura 1 que muestra un total de 3517 artículos. Debido a la gran cantidad de hallazgos, se delimitó la búsqueda con el fin de reducir su cantidad mediante el establecimiento del límite de tiempo de publicación de los artículos entre el año 2015 al año 2020. Se encontró con esta restricción un total de 2371 artículos, número todavía muy grande. Es así que se especializó el estudio en reactores aerobios para el tratamiento de aguas y se establece las siguientes palabras de búsqueda que adicionan este enfoque: ["wastewater treatment" AND microalga? AND biofilm AND reactor NOT anaerobic]. Se obtiene el resultado descrito en la Figura 2 que presenta un total de 106 artículos cuando no se restringe el límite de tiempo de publicación mientras que presenta un total de 73 artículos con el límite de tiempo como filtro. No obstante, de manera manual se descartan dos artículos de la base de datos de Springer debido a que los resultados de la búsqueda incluyeron dos artículos de conferencias pese a que se restringió el tipo de artículo. La fecha de búsqueda de los artículos se realizó el 23 de Septiembre del 2020.

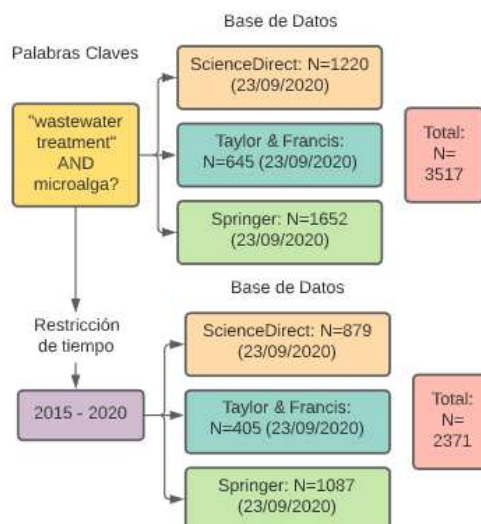


Figura 1. Resultados del número de artículos en las diferentes bases de datos con las palabras claves ["wastewater treatment" AND microalga?].

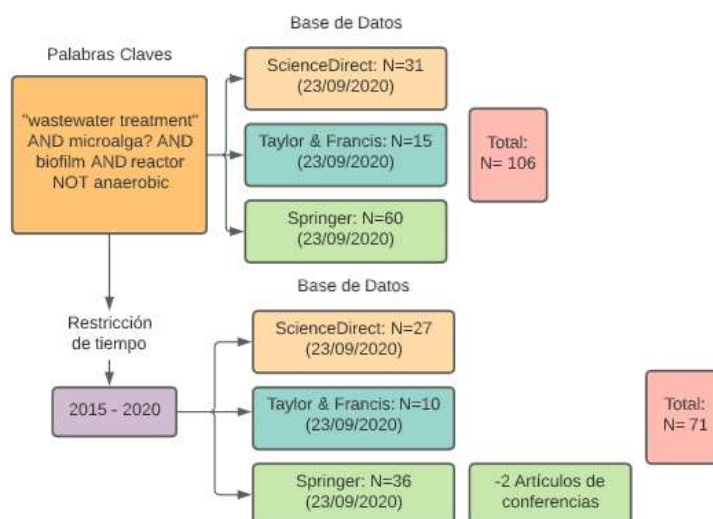


Figura 2. Resultados del número de artículos en las diferentes bases de datos con las palabras claves ["wastewater treatment" AND microalga? AND biofilm AND reactor NOT anaerobic].

### Fuentes de información y búsqueda

Las bases de datos Science Direct, Taylor & Francis y Springer fueron seleccionadas para esta revisión literaria sistemática, puesto que estas editoriales cuentan con más de 2500, 1300 y 2987 revistas, respectivamente. Estas se especializan en temas

de ingeniería, ciencias ambientales y tecnología. La búsqueda en estas bases de datos se llevó a cabo mediante una búsqueda avanzada ingresando los términos descritos y filtrando el tipo de artículo y el límite de tiempo descrito.

### **Proceso de extracción de datos**

Para la extracción de datos, se tabularon las especificaciones de los artículos, así como la información más relevante tratada en el artículo, como tipo de agua tratada, especie de microorganismo empleada y elemento que se buscaba remover con su respectivo porcentaje de remoción. Dicha tabla fue utilizada para la elaboración de las estadísticas y análisis de la revisión.

### **Riesgo de sesgo**

En cuanto a la evaluación del sesgo pueden existir más artículos del tema de investigación que no fueron considerados debido a que las palabras clave empleadas no se ajustan a las palabras empleadas por el editor o el autor de dichos artículos. Así mismo, pueden existir otros artículos que son excluidos por que no se encuentran publicados en las bases de datos bibliográficas seleccionadas o porque están escritos en otros idiomas.

### **Medidas de resumen, Síntesis de resultados y Análisis adicionales**

Para el análisis de datos, se emplea la información recopilada y se divide los temas principales tratados en subcategorías con el fin de poder realizar estadísticas de los resultados obtenidos. Adicionalmente, se realiza un análisis de otras aplicaciones de las microalgas y se determina la tendencia en la investigación con respecto a estas aplicaciones.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de los artículos recopilados

En la búsqueda literaria sistemática descrita en el capítulo anterior, se identificaron 106 artículos, de los cuales posterior al filtrado de tiempo y el filtrado manual se obtuvieron un total de 71 artículos para el estudio, proceso que se describe en el diagrama de flujo de la Figura 2. Adicionalmente, de los 71 artículos encontrados de la búsqueda, el 73% (52 artículos) fueron investigaciones mientras que el 27% (19 artículos) fueron revisiones literarias.

Para el análisis de los artículos en la base de datos, se clasificaron los 71 artículos de acuerdo a: buscador, revista, año de publicación, autores, título, palabras claves, resumen del artículo, tipo de agua tratada, especie de microorganismo utilizado y elemento a remover con su respectivo porcentaje de remoción. En cuanto a los buscadores, se encontraron un 48% de los artículos en Springer, un 38% en Science Direct y un 14% en Taylor & Francis. Estos artículos se distribuyeron en 43 revistas diferentes donde la revista “*Algal Research*” y “*Applied Biochemistry and Biotechnology*” tienen la mayor cantidad de artículos publicados con el 14% de todos los artículos recopilados (6 publicaciones cada una). La revista *Algal Research* de acuerdo a Garrido et al [10] que realizó una revisión bibliográfica desde 1970 hasta el 2017 también es una de las más empleadas para la publicación sobre microalgas con un 15,35% de los artículos publicados en el 2017. El detalle de las estadísticas de los artículos publicados en las diferentes revistas se encuentra descrito en la Tabla Anexos 1.

En cuanto a los años de publicación, se tiene que la distribución de artículos es la representada en la Figura 3 que muestra que del año 2015 al año 2016 se incrementó el número de artículos en 5, posterior a este año se mantuvo casi constante el número con 14 artículos por año hasta el año 2019. Hasta la fecha de esta búsqueda el número de

artículos publicados en el 2020 se encontraba en 7, pero se espera que este número siga la tendencia de 14 artículos por año. Sin embargo, este número pudo verse afectado debido a la pandemia de COVID 19 que atraviesa el mundo.

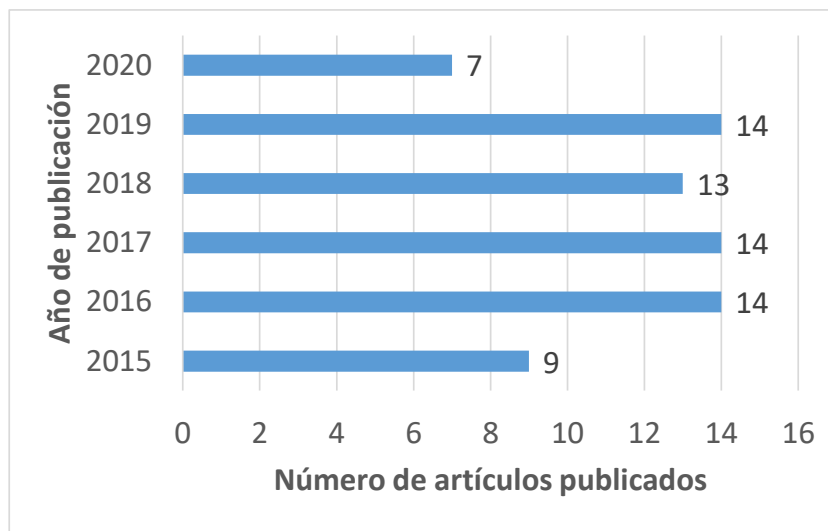


Figura 3. Detalle del número de artículos publicados en el rango de tiempo 2015 – septiembre 2020.

Finalmente, los resultados del presente estudio se catalogaron con un sesgo bajo mientras que, la selección de las palabras claves con un sesgo medio debido a que estas se escogieron por preferencias de la autora.

### **Aplicaciones del tratamiento con microalgas y bacterias**

La búsqueda final realizada incluía las palabras claves “wastewater treatment”, misma que obtuvo 71 artículos. A pesar de esto, solo el 91% de los artículos encontrados se especializaban en agua residual, mientras que el resto incluía aguas de lagos, grises, de lluvia y de reposición.

De los 71 artículos recopilados en la búsqueda literaria sistemática, 52 hablan de aplicaciones de microorganismos y 19 de otros temas como inmovilización y crecimiento de los microorganismos, parámetros que influyen en los fotobiorreactores y diferentes

métodos de cultivo. Las aplicaciones más estudiadas en conjunto con las estadísticas de los artículos que hablan de cada aplicación se muestran a continuación en la Figura 4.

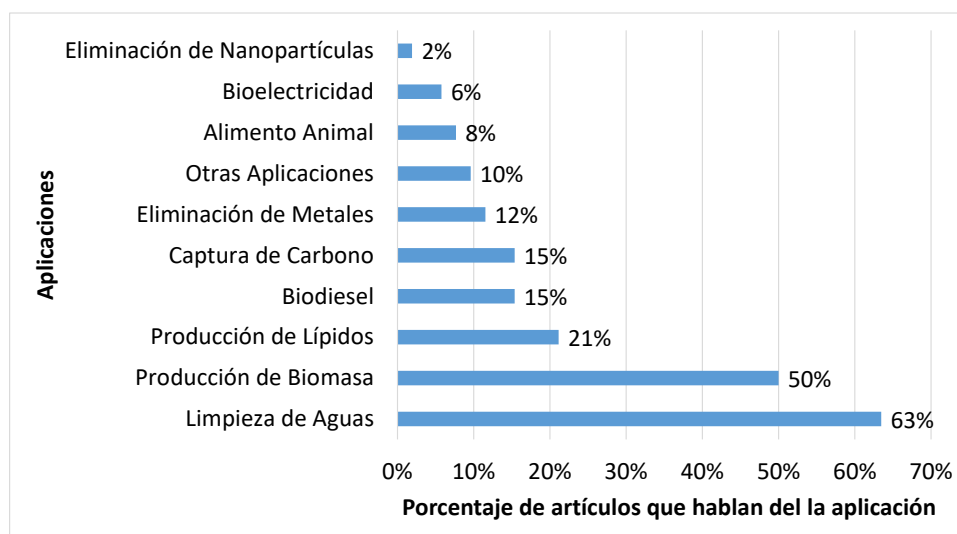


Figura 4. Porcentajes de artículos que tratan las diferentes aplicaciones

Las aplicaciones más estudiadas en los 52 artículos son la limpieza de aguas con 63% (33), la producción de biomasa con 50% (26) y la producción de lípidos con 21% (11); mientras que, las aplicaciones menos estudiadas son la remoción de nanopartículas y bioelectricidad que corresponde a la generación de electricidad mediante pilas de combustible microbianas [25]. Entre las otras aplicaciones reportadas se tiene aplicaciones de producción de compuestos de valor agregado como pigmentos, productos cosméticos y farmacéuticos como hidrocoloides que son apósitos para el tratamiento de heridas, enzimas, ácidos grasos poliinsaturados y proteínas [26]. Resultados que muestran que actualmente hay una tendencia en investigación hacia la limpieza de aguas y la producción de biomasa que se centra también en la producción de biocombustibles.

Adicionalmente, solo el 73% de los 33 artículos que hablan de limpieza de aguas reportan resultados concretos en cuanto a la reducción de nitrógeno y solo el 61% en cuanto a la reducción de fósforo. Estos elementos sirven de nutrientes para los microorganismos y están presentes en las aguas residuales. Por otra parte, el 39% de los

33 artículos previamente mencionados usan como referencia del nivel de contaminación de las aguas a parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) o la Demanda Biológica de Oxígeno, siendo el primero el más empleado con un 85%.

### **Microorganismos estudiados para el tratamiento de aguas residuales**

Con respecto a las especies de microorganismos que se emplean para el tratamiento de las aguas, la Figura 5 muestra que un 54.5% (18) y un 12.1% (4) emplean como microorganismos de limpieza únicamente a las microalgas o a las bacterias, respectivamente. Adicionalmente, un 12,1% (4) de los artículos presentan sistemas de microalgas y bacterias combinados. Mientras que, hay un 9.1% (3) de los artículos que emplean hierbas acuáticas, un 9.1% (3) que no especifican el tipo de microorganismo que emplean y hay 6.1% (2) que solo detalla que no usan microalgas.

De acuerdo a Zheng y Chang [18] un sistema compuesto por microalgas y bacterias en conjunto es una mejor opción ya que integra los beneficios del uso de ambos sistemas además de que entre microorganismos se ayudan mutuamente para su desarrollo y es así que se encuentra que este campo de estudio necesita más desarrollo.

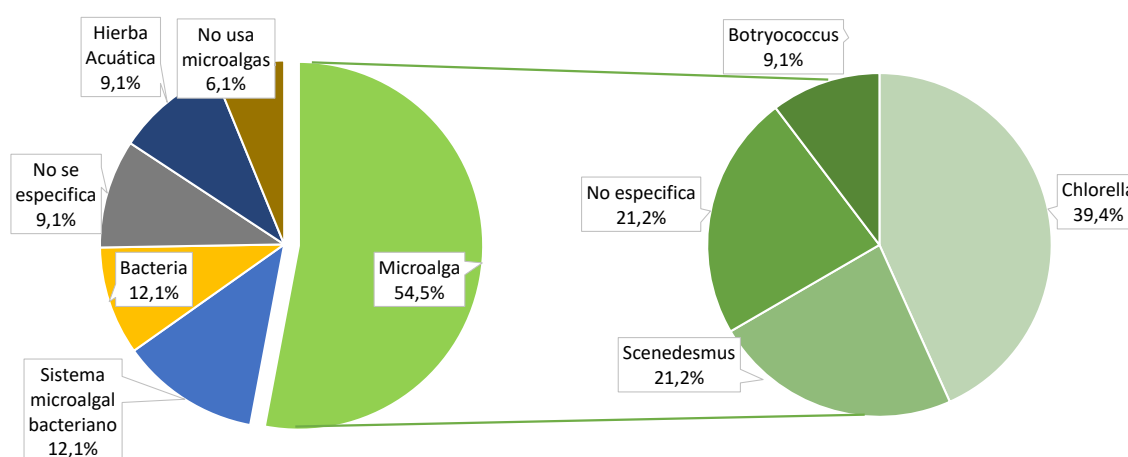


Figura 5. a) Tipos de microorganismos empleados en el tratamiento de aguas. b)

Descripción de los géneros de microalgas.

Como se observa en la Figura 5 b, de los 33 artículos que abarcan el tratamiento de aguas, se encontró que el género más empleado de microalgas es el *Chlorella* y el *Scenedesmus* con un 39.4% (13) y un 21.2% (7), respectivamente, donde manera específica sobresale la especie *Chlorella vulgaris*. Estos resultados concuerdan con los reportados por Hernández [20], Zhuang [27] y Garrido et al [10].

Los artículos de investigación de limpieza de aguas recopilados son 26 (se excluye a las revisiones bibliográficas). Un resumen de la recopilación de los resultados de los mismos se presenta en Tabla Anexos 2, se muestra el reactor empleado, el tipo de cultivo, las microalgas y bacterias utilizadas, el tipo de agua tratada y el porcentaje de remoción obtenido. La tabla completa con las condiciones de operación se muestra en la Tabla Anexos 3.

### **Biorreactores en el tratamiento de aguas**

Los reactores empleados fueron diferentes en la mayoría de los casos, tanto en tamaño como tipo de reactor, sin embargo el 23% (6) de los artículos emplean fotobiorreactores de membrana. En cuanto a las condiciones de operación, estas difirieron en todos los artículos, con respecto a la temperatura, en el caso de reactores a temperatura ambiente los rangos reportados fueron de 25 a 40 °C mientras que para reactores con temperatura controlada los rangos reportados fueron de 24 a 30 °C. Con respecto al pH y la intensidad de luz, los valores promedio fueron de 7.7 y 148  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y los rangos reportados fueron de 6.6 – 10.6 y 87 – 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

La temperatura, el pH y la intensidad son factores de diseño de los reactores clave puesto que influyen directamente en el crecimiento y productividad de los microorganismos. La temperatura tiene una relación proporcional con la productividad del cultivo hasta llegar a la temperatura óptima de la especie. Sobre esta temperatura, se

tiene un incremento en la respiración y en consecuencia la fotorrespiración reduce la productividad global del sistema [20].

El pH por otro lado, es un factor que influye tanto en el crecimiento de las células microbianas como en la capacidad de remover nitrógeno y se ve influenciado por el suministro de CO<sub>2</sub>, la productividad de los microorganismos, su actividad autotrófica y heterotrófica, la alcalinidad y composición iónica, y la respiración del cultivo. Al igual que otros factores, el rango de pH varía con la especie de microorganismo cultivada, cada especie tiene valores óptimos, para las especies dulceacuícolas el más indicado es 8. Si se tiene valores superiores o inferiores se afecta la productividad del sistema. Las formas de control es el uso de un sistema automatizado de inyección de CO<sub>2</sub>, o de ser necesario, el uso de ácidos o bases [16]. El suministro de luz por su parte, influye también en el crecimiento de los microorganismos. Una cantidad insuficiente afecta a su crecimiento mientras que una cantidad excesiva prolongada provoca fotoinhibición que inactiva y daña los procesos de transporte celular de los fotosistemas del microorganismo [22], [46].

Los resultados del tipo de cultivo que emplean los reactores se describen a



continuación. La

Figura 6 muestra que 15 de los artículos emplean cultivo adjunto y 13 emplean cultivo en suspensión. Cabe recalcar que 2 artículos reportan resultados con ambos tipos de cultivo.

El tipo de cultivo de las microalgas y bacterias es un factor determinante en la eficiencia del tratamiento de aguas y en la producción de biomasa. Existen dos tipos, el cultivo adjunto y el cultivo en suspensión. Este último era el más empleado hasta el año 2000. Sin embargo, el uso del cultivo adjunto ha crecido en las últimas décadas debido a sus múltiples ventajas, una mayor capacidad de tratamiento de agua, una recolección más rápida de biomasa y un menor consumo de energía que economiza costos [27]. A diferencia del sistema en suspensión el sistema en conjunto no tiene problemas de inanición con las capas de microorganismos inferiores y problemas de saturación en las capas superiores. El cultivo en suspensión es un método donde los microorganismos se encuentran dispersos en el medio de cultivo y su crecimiento no depende de ningún anclaje [39], [47].



Figura 6. Tipos de cultivo empleados en los reactores de los 26 artículos reportados de investigación empleados para el tratamiento de aguas.

El cultivo adjunto, cultivo en monocapa o cultivo de microorganismos adheridos es un método que permite que los microorganismos crezcan como una biopelícula mediante la adherencia de estos a la superficie de un medio de soporte. La adhesión se produce por interacciones hidrofóbicas, interacciones ácido-base u otras de los microorganismos y el medio de soporte [39].

Una biopelícula es un conjunto de células que se adhieren a un sustrato que es incrustado en una matriz autoproducida de sustancias poliméricas extracelulares. Para un adecuado desarrollo de la biopelícula se requiere de un sustrato adecuado que cumpla los siguientes requerimientos: no ser tóxico, ser estable y tener capacidad para la retención de biomasa [29].

Los medios de soporte empleados en el cultivo adjunto pueden ser de diversos materiales como cobre, vidrio, polimetacrilato de metilo, poliestireno, cloruro de polivinilo, acero inoxidable AISI316 y otros, materiales donde las células son inmovilizadas [30]. Los materiales que cubren diferentes beneficios además de ser ampliamente usados en el tratamiento de aguas residuales son el cobre, el cual cuenta con una superficie de control por su toxicidad celular, así como el cloruro de polivinilo y el acero inoxidable, materiales que son muy usados en aplicaciones a nivel industrial. El vidrio, el polimetacrilato de metilo y el poliestireno por su parte, al ser superficies transparentes facilitan el crecimiento de organismos fotosintéticos dado que permiten la penetración de luz al sistema. El polimetacrilato de metilo y el cloruro de polivinilo son ampliamente usados como sistemas de adhesión de biopelículas en el tratamiento de aguas residuales [9].

Barros et al en su estudio sobre el crecimiento de biopelículas de microalgas y bacterias sobre superficies analiza sus propiedades fisicoquímicas y obtiene que el acero inoxidable es hidrofílico, mientras que el cobre, el vidrio, el polimetacrilato de metilo, el



poliestireno y el cloruro de polivinilo son superficies hidrófobas. En cuanto al crecimiento de las biopelículas, los materiales mencionados muestran densidades mayores de biopelículas después de 7 días en orden descendente acero inoxidable, poliestireno, vidrio, cloruro de polivinilo, polimetacrilato de metilo y cobre [9].

Para una adecuada adhesión microbiana al sustrato se requieren factores biológicos, propiedades fisicoquímicas y condiciones ambientales favorecedoras. Los factores biológicos afectan la adhesión microbiana mediante estructuras externas como fimbrinas, prótesis y flagelos que promueven el contacto entre los microorganismos y el sustrato. Las propiedades fisicoquímicas de las superficies de adhesión afectan a la unión microbiana. Mientras que las condiciones ambientales, como la luz, el pH, las condiciones hidrodinámicas, la calidad y cantidad de nutrientes, la fuente de carbono y la temperatura, influyen en la formación de la biopelícula. El tipo de especie microbiana que se desarrolle en el sistema también influye en la unión de microalgas / bacterias a una superficie y en general en el crecimiento de la biopelícula ya que las condiciones de cultivo difieren de acuerdo a la especie. Una forma de mejorar la adhesión microbiana es la exposición de los microorganismos a un estrés nutricional controlado [48].

Con respecto a los resultados reportados en la Tabla Anexos 2 de la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales, los rangos de remoción de la Demanda Química de Oxígeno son de 70.8 – 97.32 % mientras que los rangos de remociones de Fósforo total (TP) y Nitrógeno total (TN) están entre 67 - 99.8 % y 67.5 – 98 %, respectivamente. Los mejores resultados de remoción reportados son: 97.32% para demanda química de oxígeno (DQO) empleando *Spirulina platensis* en un bioreactor de membrana en cultivo en suspensión, 99.8% para fósforo total (TP) empleando *Chlorella Vulgaris* en un reactor de biopelícula de sustrato poroso (PSBR) en cultivo adjunto y hasta el 98% para nitrógeno total (TN) empleando Consortium C. en un fotobiorreactor tubular

vertical (PBR) en cultivo en suspensión. Los valores promedio reportados son DQO: 77.8%, TP: 79.2 % y TN: 78.7%.

Por otro lado, una parte importante de la limpieza de aguas, es el campo de la limpieza enfocada en la remoción de metales y de fármacos. A continuación, se describen estas aplicaciones:

### **Remoción de metales**

La remoción de metales es una aplicación de gran importancia debido a que gran número de cuerpos de agua se encuentran contaminados por su liberación de manera antropogénica en actividades industriales como la minería, la producción de metales, la fabricación de vidrio, las curtidurías y la corrosión de tuberías; o también, de actividades naturales como la erosión de rocas y la meteorización que es la descomposición de minerales y rocas [49].

La importancia de la remoción de metales no degradables, se debe a su persistencia en la naturaleza y acumulación en el medio ambiente, afectando la flora y fauna con efectos nocivos y tóxicos. Además, al sobrepasar las concentraciones máximas, afectan a la salud humana. Los efectos negativos son: indigestión, diarrea, náuseas, alergia cutánea, fluorosis de los dientes e incluso cáncer. Efectos que también pueden ser asma, daño hepático, renal y neuronal, trastornos cardiovasculares, mutaciones, y trastornos congénitos como parálisis cerebral y afecciones al desarrollo cerebral [50].

De los 52 artículos recopilados de aplicaciones, solo el 12% (6) hablan de remoción de metales, los más reportados son el cadmio, el cromo, el cobre y el zinc con un 67% como se muestra en la Figura 7. De estos un 66.6% (4) usan solo microalgas, un 33.3% (2) usan solo bacterias, y un 16, 7% (1) corresponde a una planta acuática. Cabe

recalcar que un mismo artículo de revisión emplea la utilización de solo microalgas y de solo bacterias por separado [19].

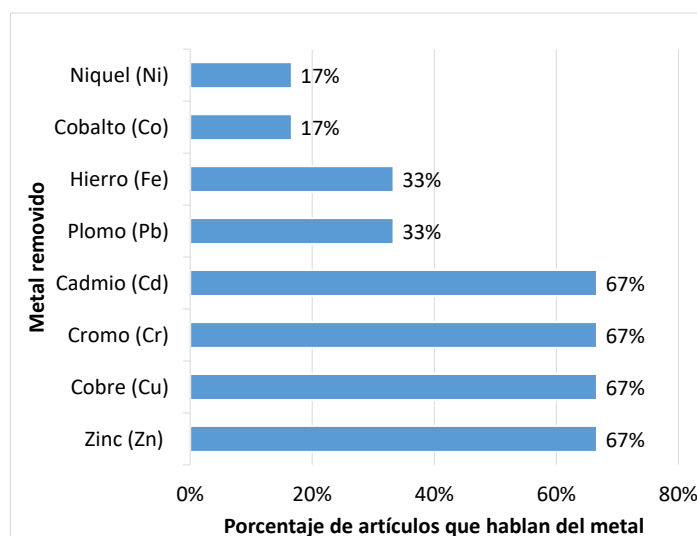


Figura 7. Remoción de metales investigados en este estudio

Los porcentajes de remoción reportados más altos son de Cd 100%, Cr 91%, Cu 100% y Zn 79.65% con las microalgas *S. Obliquus*, *S. incrassatulus*, *Scenedesmus sp* y *Scenedesmus sp*, respectivamente [51].

### Remoción de fármacos

La remoción de fármacos es un requerimiento de primera necesidad, ya que al igual que los metales afectan a la flora y fauna, y se encuentran presentes en el agua. Fármacos de uso común como la ciprofloxacina tienen el potencial de romper la replicación y la transcripción del ADN mientras que otros como la sulfadiazina alteran la comunidad microbiana hasta en concentraciones de ng/L. El diclofenaco en concentraciones de 50 µg/L ha provocado daños en branquias, hígado y riñones de peces trucha marrón. Para la remoción de fármacos, el escoger el tipo de microorganismo depende también del fármaco que se busca remover puesto que estos muchas veces inhiben a los microorganismos. Es así que, el ibuprofeno por su parte, en concentraciones

de 1 mg/L, inhibe el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* y redujo su contenido de clorofila, o incluso en concentraciones de 1 µg / L ha demostrado la inhibición del crecimiento de la microalga *S.rubescens* [39], [45].

De los 52 artículos recopilados de aplicaciones, solo tres (6%) hablan de la remoción de fármacos presentes en cuerpos de agua. Los diferentes fármacos reportados se encuentran en la Tabla Anexos 2 con sus respectivas remociones alcanzadas. Para el caso del Diclofenaco y el Ibuprofeno se emplearon lodos activados mientras que para la Sulfadiazina, la Sulfametazina y la Sulfametoxazol se empleó *Chlorella vulgaris* y *Chlamydomonas* para la Ciprofloxacina. Los fármacos recopilados son los actualmente más estudiados puesto que son los más vendidos a nivel mundial, además de que hay estudios que muestran que estos no se eliminan completamente en las plantas de tratamientos de aguas residuales [41].

### **Desafíos actuales y futuros**

El tratamiento de aguas residuales empleando microalgas y bacterias es un campo en desarrollo que presenta grandes desafíos. Entre las dificultades encontradas en el presente estudio se encuentra la presentación incompleta de resultados de los diferentes artículos, muchos de los cuales no muestran el tipo de microorganismo o el tipo de reactor que emplean ni las condiciones del mismo. Si todos los artículos presentaran todos estos parámetros, las investigaciones futuras tendrían una visión más clara de las pruebas que ya se están llevando a cabo como punto de partida para sus respectivas investigaciones.

También se ha identificado la necesidad de aumentar la investigación de sistemas que trabajen en conjunto con microalgas y bacterias, pues solo un 12.1% de los artículos que describen la aplicación del tratamiento de aguas emplean este tipo de sistemas que según literatura presentan más beneficios que sistemas independientes. Adicionalmente,

campos de suma importancia en el tratamiento de aguas como la remoción de metales o de fármacos requieren de investigación a profundidad, prueba de esto es que solo el 12% y el 6% de los artículos de aplicaciones recopilados hablan de estos temas, respectivamente.

Los desafíos futuros que presenta el campo del tratamiento de aguas residuales son encontrar el equilibrio en un sistema multidisciplinario empleando microalgas y bacterias que sea rentable y que abarque la producción de productos de valor a la par del tratamiento de aguas residuales. Adicionalmente, la estandarización de dicho sistema es otro gran desafío. Actualmente hay muchas propuestas, pero con condiciones de operación diferentes tanto en los microorganismos, el reactor empleado y los diferentes parámetros influyentes como mezcla, pH, y temperatura.

Con respecto a la rentabilidad del sistema, ninguno de los artículos recopilados presenta información al respecto, probablemente debido a que en el los términos de búsqueda no se incluyó ningún término al respecto. No obstante, esta debe estudiarse desde diferentes ámbitos, primero únicamente desde un sistema enfocado solo como un método de tratamiento de aguas mediante un contraste con sistemas comunes como el de lodos activados y, posteriormente, incluyendo el beneficio de la producción de productos de valor agregado como biodiesel. Por otro lado, las áreas de la remoción de metales y de fármacos son cruciales por lo que un desafío futuro es la recuperación de estos elementos, no solo su remoción.

## **CONCLUSIONES**

En esta revisión sistemática literaria se analizó el número de publicaciones de los últimos cinco años (2015-2020) sobre el tratamiento de aguas residuales empleando microalgas y bacterias. Se observa que los microorganismos más empleados son las

microalgas de los géneros *Chlorella* y el *Scenedesmus*. El sistema más empleado son biorreactores de membrana con un tipo de cultivo en conjunto y condiciones de operación de pH promedio de 7.7. Para sistemas abiertos una temperatura entre 24 y 40 °C mientras que para los sistemas cerrados, más comunes, las condiciones se pueden controlar mejor, manteniendo una de temperatura de 25 a 30 °C al añadir una fuente de luz con una intensidad promedio de 148  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Es así que, la tendencia actual son sistemas con las características descritas previamente, sin embargo la tendencia futura incluye también bacterias como microorganismos debido a los beneficios adicionales que estos microorganismos aportan al sistema.

Los rangos de remoción reportados como muestra de la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales para la Demanda Química de Oxígeno, la remoción de Fósforo total (TP) y Nitrógeno total (TN) son de 70.8 – 97.32 %, 67 - 99.8 % y 67.5 – 98 %, respectivamente. Los mejores resultados de remoción reportados son: 97.32% para demanda química de oxígeno (DQO) empleando *Spirulina platensis* en un bioreactor de membrana en cultivo en suspensión, 99.8% para fósforo total (TP) empleando *Chlorella Vulgaris* en un reactor de biopelícula de sustrato poroso (PSBR) en cultivo adjunto y hasta el 98% para nitrógeno total (TN) empleando Consortium C. en un fotobiorreactor tubular vertical (PBR) en cultivo en suspensión.

La remoción de metales y de fármacos son campos del tratamiento de aguas de suma relevancia que aún no se han estudiado ampliamente. Sin embargo, se observa un incremento en sus investigaciones, por lo que se establece que estos campos serán las tendencias futuras de investigación. Actualmente, la remoción de metales se centra en: Cd, Cr, Cu y Zn con remociones máximas alcanzadas de 100%, 91%, 100% y 79.65% respectivamente. La remoción de fármacos, por su parte se centra en Diclofenaco, Ibuprofeno, Ciprofloxacina, Sulfadiazina Sulfametazina y Sulfametoxazol con

remociones máximas alcanzadas de 66.01%, 37.33%, 100%, 79.2%, 76.7% y 82.1% respectivamente. Se espera que las futuras investigaciones abarquen más metales y más fármacos.

Con respecto a las aplicaciones de los artículos recopilados se tiene que las tendencias actuales son la limpieza de aguas y la producción de biomasa centrada específicamente en la producción de biocombustibles. Las interrogantes del estudio se centran en la factibilidad de sistemas rentables capaces de tratar agua mientras son empleados para la producción de productos de valor.

Así también, como recomendaciones a futuras publicaciones se establece la presentación completa de parámetros del sistema con respecto al tipo de microorganismo empleado, el tipo de reactor usado y sus condiciones de operación. Adicionalmente, la investigación de los ciclos de luz y oscuridad como parámetro influyente en las condiciones de operación del sistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. I. Ibrahim, “Improving energy efficiency and fouling mitigation for membrane bioreactor in Al-Rustamiyah sewage treatment plant based on hydrodynamics,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 11, pp. 2369–2380, 2018, doi: 10.1007/s13762-017-1605-7.
- [2] X. Zhang *et al.*, “Performance and microbial community analysis of bioaugmented activated sludge for nitrogen-containing organic pollutants removal,” *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 101, pp. 373–381, 2021, doi: 10.1016/j.jes.2020.09.002.
- [3] M. Wang, L. Schideman, H. Lu, Y. Zhang, B. Li, and W. Cao, “Zeolite-amended microalgal-bacterial system in a membrane photobioreactor for promoting system stability, biomass production, and wastewater treatment efficiency to realize Environmental-Enhancing Energy paradigm,” *J. Appl. Phycol.*, vol. 31, no. 1, pp. 335–344, 2019, doi: 10.1007/s10811-018-1505-3.
- [4] A. G. Orfanos and I. D. Manariotis, “Algal biofilm ponds for polishing secondary effluent and resource recovery,” *J. Appl. Phycol.*, vol. 31, no. 3, pp. 1765–1772, 2019, doi: 10.1007/s10811-018-1731-8.
- [5] L. Vera, I. Ruigomez, E. González, P. Bodelón, and J. Rodríguez, “Biorreactores de membrana anaerobios para tratamiento de aguas residuales domesticas. Estudio preliminar,” *Av. en Ciencias e Ing. -*, vol. 5, no. 4, pp. 1–15, 2014.
- [6] A. N. L. Ng and A. S. Kim, “A mini-review of modeling studies on membrane bioreactor (MBR) treatment for municipal wastewaters,” *Desalination*, vol. 212, no. 1–3, pp. 261–281, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.10.013.
- [7] H. Lee, J. Han, and Z. Yun, “Biological nitrogen and phosphorus removal in UCT-type MBR process,” *Water Sci. Technol.*, vol. 59, no. 11, pp. 2093–2099, 2009, doi: 10.2166/wst.2009.242.
- [8] L. Gomez, “MICROALGAS: ASPECTOS ECOLÓGICOS Y BIOTECNOLÓGICOS,” *Rev. Cuba. Química*, 2007.
- [9] A. C. Barros, A. L. Gonçalves, and M. Simões, “Microalgal / cyanobacterial biofilm formation on selected surfaces : the effects of surface physicochemical properties and culture media composition,” 2018.
- [10] J. A. Garrido-Cardenas, F. Manzano-Agugliaro, F. G. Acien-Fernandez, and E. Molina-Grima, “Microalgae research worldwide,” *Algal Research*, vol. 35, pp. 50–60, 2018, doi: 10.1016/j.algal.2018.08.005.
- [11] Benavente, Montañez, Aguilar, Méndez, and Valdivia, “Tecnología De Cultivo De Microalgas En Fotobiorreactores,” *Rev. Científica la Univ. Autónoma Coahuila*, 2012.
- [12] N. Nordin, N. Yusof, S. Md Nadzir, M. Z. Mohd Yusoff, and M. A. Hassan, “Effect of photo-autotrophic cultural conditions on the biomass productivity and composition of *Chlorella vulgaris*,” *Biofuels*, vol. 0, no. 0, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1080/17597269.2019.1652787.
- [13] L. Martínez, M. Otero, A. Morán, and A. I. García, “Selection of native freshwater microalgae and cyanobacteria for CO<sub>2</sub> biofixation,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 34, no. 24, pp. 3137–3143, 2013, doi:



- 10.1080/09593330.2013.808238.
- [14] L. Marbelia *et al.*, “Membrane photobioreactors for integrated microalgae cultivation and nutrient remediation of membrane bioreactors effluent,” *Bioresour. Technol.*, vol. 163, pp. 228–235, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.04.012.
- [15] C. Contreras-Flores, J. M. Peña-Castro, L. B. Flores-Cotera, and R. O. Cañizares-Villanueva, “Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas,” *Interciencia*, 2003.
- [16] P. Praveen and K. Loh, “Nutrient removal in an algal membrane photobioreactor : effects of wastewater composition and light / dark cycle,” 2019.
- [17] J. González-Camejo, R. Barat, M. Pachés, M. Murgui, A. Seco, and J. Ferrer, “Wastewater nutrient removal in a mixed microalgae–bacteria culture: effect of light and temperature on the microalgae–bacteria competition,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 39, no. 4, pp. 503–515, 2018, doi: 10.1080/09593330.2017.1305001.
- [18] T. Zheng and C. wei Ke, “Treatment of oilfield wastewater using algal–bacterial fluidized bed reactor,” *Sep. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 13, pp. 2090–2097, 2017, doi: 10.1080/01496395.2017.1307853.
- [19] O. A. Ramírez Calderón, O. M. Abdeldayem, A. Pugazhendhi, and E. R. Rene, “Current Updates and Perspectives of Biosorption Technology: an Alternative for the Removal of Heavy Metals from Wastewater,” *Curr. Pollut. Reports*, vol. 6, no. 1, pp. 8–27, 2020, doi: 10.1007/s40726-020-00135-7.
- [20] A. Hernández-Pérez and J. I. Labbé, “Microalgas, cultivo y beneficios,” *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, vol. 49, no. 2, pp. 157–173, 2014, doi: 10.4067/S0718-19572014000200001.
- [21] A. Gismondi, F. Di Pippo, L. Bruno, S. Antonaroli, and R. Congestri, “Phosphorus removal coupled to bioenergy production by three cyanobacterial isolates in a biofilm dynamic growth system,” *Int. J. Phytoremediation*, vol. 18, no. 9, pp. 869–876, 2016, doi: 10.1080/15226514.2016.1156640.
- [22] L. G. Ramírez Mérida, E. Jacob-Lopes, and L. Queiroz Zepka, “FOTOBIORREACTOR: HERRAMIENTA PARA CULTIVO DE CIANOBACTERIAS,” *Cienc. y Tecnol.*, 2014, doi: 10.18779/cyt.v6i2.90.
- [23] G. Urrutia and X. Bonfill, “PRISMA\_Spanish.pdf,” *Medicina Clínica*, vol. 135, no. 11, pp. 507–511, 2010, [Online]. Available: [http://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/public/uploads/PRISMA\\_Spanish.pdf](http://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/public/uploads/PRISMA_Spanish.pdf).
- [24] D. Moher *et al.*, “Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement,” *PLoS Med.*, vol. 6, no. 7, 2009, doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
- [25] S. Kondaveeti, G. Mohanakrishna, R. Pagolu, I. W. Kim, V. C. Kalia, and J. K. Lee, “Bioelectrogenesis from Raw Algal Biomass Through Microbial Fuel Cells: Effect of Acetate as Co-substrate,” *Indian J. Microbiol.*, vol. 59, no. 1, pp. 22–26, 2019, doi: 10.1007/s12088-018-0769-2.
- [26] C. Gaignard *et al.*, “New horizons in culture and valorization of red microalgae,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 37, no. 1, pp. 193–222, 2019, doi:

- 10.1016/j.biotechadv.2018.11.014.
- [27] L. L. Zhuang *et al.*, “The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, no. May, pp. 1110–1119, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.06.006.
- [28] R. Tao *et al.*, “Low concentration of zeolite to enhance microalgal growth and ammonium removal efficiency in a membrane photobioreactor,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 0, no. 0, pp. 1–45, 2020, doi: 10.1080/09593330.2020.1752813.
- [29] O. Beji, N. Adouani, S. Poncin, M. Hamdi, and H. Z. Li, “Mineral pollutants removal through immobilized microalgae-bacterial flocs in a multitrophic microreactor,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 41, no. 15, pp. 1912–1922, 2020, doi: 10.1080/09593330.2018.1551939.
- [30] S. Sivasangari, T. VelRajan, and J. Nandhini, “A comparative study on the performance of conventional photobioreactors and ALGADISK in CO<sub>2</sub> sequestration—a review,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1080/15567036.2019.1607938.
- [31] Y. Shen, T. Yang, W. Zhu, and Y. Zhao, “Wastewater treatment and biofuel production through attached culture of *Chlorella vulgaris* in a porous substratum biofilm reactor,” *J. Appl. Phycol.*, vol. 29, no. 2, pp. 833–841, 2017, doi: 10.1007/s10811-016-0981-6.
- [32] J. H. Moreno Osorio, G. Pinto, A. Pollio, L. Frunzo, P. N. L. Lens, and G. Esposito, “Start-up of a nutrient removal system using *Scenedesmus vacuolatus* and *Chlorella vulgaris* biofilms,” *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–16, 2019, doi: 10.1186/s40643-019-0259-3.
- [33] M. Ghaderi, P. Asadi, and M. Kouhirostamkolaei, “Applying response surface methodology on the results of serial sequencing batch moving bed reactor,” *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 1, 2020, doi: 10.1007/s42452-019-1894-1.
- [34] K. Stauch-White, V. N. Srinivasan, W. Camilla Kuo-Dahab, C. Park, and C. S. Butler, “The role of inorganic nitrogen in successful formation of granular biofilms for wastewater treatment that support cyanobacteria and bacteria,” *AMB Express*, vol. 7, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s13568-017-0444-8.
- [35] R. M. Mohamed, A. A. Al-Gheethi, S. S. Aznin, A. H. Hasila, A. A. Wurochekke, and A. H. Kassim, “Removal of nutrients and organic pollutants from household greywater by phycoremediation for safe disposal,” *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 259–272, 2017, doi: 10.1007/s40095-017-0236-6.
- [36] I. Krustok *et al.*, “Effect of lake water on algal biomass and microbial community structure in municipal wastewater-based lab-scale photobioreactors,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 99, no. 15, pp. 6537–6549, 2015, doi: 10.1007/s00253-015-6580-7.
- [37] H. Chai *et al.*, “Long-term pollutant removal performance and mitigation of rainwater quality deterioration with ceramsite and *Cyperus alternifolius* in mountainous cities of China,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 32, pp. 32993–33003, 2019, doi: 10.1007/s11356-019-06328-y.
- [38] Y. ming Guo *et al.*, “Maintaining eco-health of urban waterscapes with imbedded

- integrating ecological entity: Experimental approach,” *J. Cent. South Univ.*, vol. 23, no. 11, pp. 2827–2837, 2016, doi: 10.1007/s11771-016-3346-z.
- [39] Y. Y. Peng *et al.*, “Simultaneous removal of nutrient and sulfonamides from marine aquaculture wastewater by concentrated and attached cultivation of *Chlorella vulgaris* in an algal biofilm membrane photobioreactor (BF-MPBR),” *Sci. Total Environ.*, vol. 725, p. 138524, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138524.
- [40] L. Gouveia *et al.*, “Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs. Scale-up considerations,” *Algal Res.*, vol. 16, pp. 167–176, 2016, doi: 10.1016/j.algal.2016.03.010.
- [41] M. Fatehifar, S. M. Borghei, and A. Ekhlasi Nia, “Application of moving bed biofilm reactor in the removal of pharmaceutical compounds (diclofenac and ibuprofen),” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 5530–5535, 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.08.029.
- [42] J. Hu, H. Liu, P. Shukla, W. Lin, and J. Luo, “Nitrogen and phosphorus removals by the agar-immobilized *Chlorella saccharophila* with long-term preservation at room temperature,” *Chemosphere*, vol. 251, p. 126406, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126406.
- [43] Z. Derakhshan, M. H. Ehrampoush, A. H. Mahvi, M. Dehghani, M. Faramarzian, and H. Eslami, “A comparative study of hybrid membrane photobioreactor and membrane photobioreactor for simultaneous biological removal of atrazine and CNP from wastewater: A performance analysis and modeling,” *Chem. Eng. J.*, vol. 355, no. January 2018, pp. 428–438, 2019, doi: 10.1016/j.cej.2018.08.155.
- [44] E. Sforza, M. Pastore, S. Santeufemia Sanchez, and A. Bertucco, “Bioaugmentation as a strategy to enhance nutrient removal: Symbiosis between *Chlorella protothecoides* and *Brevundimonas diminuta*,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 4, no. October, pp. 153–158, 2018, doi: 10.1016/j.biteb.2018.10.007.
- [45] P. Xie, C. Chen, C. Zhang, G. Su, N. Ren, and S. H. Ho, “Revealing the role of adsorption in ciprofloxacin and sulfadiazine elimination routes in microalgae,” *Water Res.*, vol. 172, p. 115475, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2020.115475.
- [46] P. L. Gupta, S. M. Lee, and H. J. Choi, “A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation,” *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 31, no. 9, pp. 1409–1417, 2015, doi: 10.1007/s11274-015-1892-4.
- [47] X. Q. Xu, J. H. Wang, T. Y. Zhang, G. H. Dao, G. X. Wu, and H. Y. Hu, “Attached microalgae cultivation and nutrients removal in a novel capillary-driven photo-biofilm reactor,” *Algal Res.*, vol. 27, no. August, pp. 198–205, 2017, doi: 10.1016/j.algal.2017.08.028.
- [48] Q. Liu, J. Wang, R. He, H. Hu, B. Wu, and H. Ren, “Bacterial assembly during the initial adhesion phase in wastewater treatment biofilms,” *Water Res.*, vol. 184, p. 116147, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2020.116147.
- [49] H. G. Hoang *et al.*, “Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 20, p. 101043, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.101043.
- [50] H. Hu *et al.*, *Synchrotron-based techniques for studying the environmental health*

*effects of heavy metals: Current status and future perspectives*, vol. 122. Elsevier B.V., 2020.

- [51] N. M. Jais, R. M. S. R. Mohamed, A. A. Al-Gheethi, and M. K. A. Hashim, "The dual roles of phycoremediation of wet market wastewater for nutrients and heavy metals removal and microalgae biomass production," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, no. 1, pp. 37–52, 2017, doi: 10.1007/s10098-016-1235-7.

## ANEXOS

Tabla Anexos 1. Estadísticas de los artículos publicados en las diferentes revistas

	Revistas	N° de artículos publicados	Porcentaje
1	Algal Research	6	14%
2	Applied Biochemistry and Biotechnology	6	14%
3	Journal of Applied Phycology	5	12%
4	Bioresource Technology	3	7%
5	Biotechnology Advances	3	7%
6	Environmental Technology	3	7%
7	Biochemical Engineering Journal	2	5%
8	Bioprocess and Biosystems Engineering	2	5%
9	Critical Reviews in Biotechnology	2	5%
10	Current Pollution Reports	2	5%
11	Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects	2	5%
12	Environmental Science and Pollution Research	2	5%
13	International Journal of Environmental Science and Technology	2	5%
14	Science of The Total Environment	2	5%
15	AMB Express	1	2%
16	Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research	1	2%
17	Bioresources and Bioprocessing	1	2%
18	Biotechnology for Biofuels	1	2%
19	Chemical Engineering Journal	1	2%
20	Chemosphere	1	2%
21	Clean Technologies and Environmental Policy	1	2%
22	Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms	1	2%
23	Environmental Chemistry Letters	1	2%
24	Enzyme and Microbial Technology	1	2%
25	Frontiers of Environmental Science & Engineering	1	2%
26	Heliyon	1	2%
27	IFAC-PapersOnLine	1	2%
28	Indian Journal of Microbiology	1	2%
29	International Journal of Energy and Environmental Engineering	1	2%
30	International Journal of Phytoremediation	1	2%
31	Journal of Biological Engineering	1	2%
32	Journal of Bioscience and Bioengineering	1	2%
33	Journal of Central South University	1	2%
34	Journal of Environmental Chemical Engineering	1	2%
35	Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences	1	2%
36	Process Biochemistry	1	2%
37	Renewable and Sustainable Energy Reviews	1	2%
38	Science China Materials	1	2%
39	Separation Science and Technology	1	2%
40	SN Applied Sciences	1	2%
41	Waste and Biomass Valorization	1	2%
42	Water Research	1	2%
43	World Journal of Microbiology and Biotechnology	1	2%

Tabla Anexos 2. Recopilación de los resultados de los artículos de investigación de limpieza de aguas (25 artículos).

Reactor	Tipo de cultivo	Microalga/ bacteria	Tipo de Agua	Parámetros. Remoción máxima.	Referencias
Sistema de incubadora de carril	C. suspensión	Cianobacterias: Anabaena augstumalis, Calothrix sp. y Nostoc sp.	Agua residual sintética	TP: Calothrix 43% / A. augstumalis 28%/ Nostoc sp.23%	[21]
Fotobiorreactor de membrana (MPBR) + zeolita	C. adjunto	Chlorella vulgaris	Agua residual sintética	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 30%	[28]
Reactor multitrófico a microescala + perlas de PVA	C. adjunto	No especifica	Agua residual sintética	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 61%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 82 %	[29]
Reactores de lecho fluidizado (FBR) + alginato	C. adjunto	Bacterias (Micrococcus sp., Corynebacterium sp., Flavobacterium sp., Bacillus sp. y Pseudomonas sp). Microalga (Scenedesmus obliquus)	Agua residual de un campo petrolero	DQO: 70,8%, NH <sub>3</sub> : 61.2%, Aceite de petróleo: 84.2%	[18]
Fotobiorreactor de tubos	C. suspensión	Chlorella vulgaris	Agua residual láctea suplementada con CO <sub>2</sub> .	Fijación de C : 87.67mg/l/día, TN: 72.34%, TP: 67.45%	[30]
Algadisco	C. adjunto	Chlorella vulgaris	Agua residual láctea suplementada con CO <sub>2</sub> .	Fijación de C : 88.5 mg/l/día, TN: 72.34%, TP: 67.45%	[30]
Fotobiorreactor	C. suspensión	Mezcla de microorganismos 1	Agua residual de retorno (FWW)	TDS: 65%, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 100%, Bo: 95%	[26]
Fotobiorreactor de membrana (MPBR)+ Zeolitas	C. adjunto	Chlorella vulgaris, Spirulina sp., Scenedesmus sp. y Nannochloropsis oculata	Agua residual de licuefacción hidrotermal (HTLWW)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 99.5%	[3]
Reactor de biopelícula de sustrato poroso (PSBR)	C. adjunto	Chlorella vulgaris	Agua residual	NH <sub>3</sub> : 99.95%, TN: 96.05%, TP: 99.83%	[31]
Biobiorreactor de biopelícula (PBR)	C. adjunto	Scenedesmus vacuolatus y Chlorella vulgaris	Agua residual sintética	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 89%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 91%	[32]
Estanques abiertos + tejidos de algodón y lámina de polietileno.	C. adjunto	Chlorococcum sp.	Efluente secundario de Agua residual	TP: 97%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 93%, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 99%	[4]
Fotobiorreactor de membrana osmótica (OMPBR)	C. suspensión	Graesiella emersonii	Agua residual sintética	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 100%, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 99.8%	[16]
Reactor de lecho móvil por lotes de secuenciación en serie (SSBMBR).	C. suspensión	Microorganismos. No especifica	Agua residual hospitalaria	DQO: 91%	[33]
Reactor con fotogranulos oxigenados (OPG)	C. adjunto	Cianobacteria: Oscillatoria spp. y Genero: Geitlernema. Cyanobium	Agua residual	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : disminución	[34]

Reactor	Tipo de cultivo	Microalga/ bacteria	Tipo de Agua	Parámetros. Remoción máxima.	Referencias
Fotoreactores, tanque	C. suspensión	Botryococcus sp.	Aguas gris de baño	DBO5: 98%, COD: 85.47%, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 98%, NH <sub>3</sub> : 99, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 99.3%, K: 97%, Ca: 95%.	[35]
Reactores de cátodo de aire de cámara única (MFC) + Acetato.	C. adjunto	Microalgas. No especifica	Agua residual	TCOD: 86.6%, DQO: 8.5%	[25]
Fotobiorreactor	C. suspensión	Mezcla de microorganismos 2	Agua residual municipal y agua de grifo(Relación 70/30 v/v)	Co: 75.6+-2.2%. Zn: 63.6%+-22.7%.TN: 73%. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 99.9%. Cr, Ni, Cu, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : aumento de concentración. Cd, As, Pb: no cambios significativos	[36]
Fotobiorreactor	C. suspensión	Mezcla de microorganismos 3	Agua residual municipal y agua de lago (Relación 70/30 v/v)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 99.9%, Co: 56.5+-11.7%, Zn: 82.1+-3.9%, TN: 47%, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 99.9%. Ni: redujo concen . Cd, As, Pb Cr, Cu: no cambios significativos	[36]
Biorreactor de membrana MBR	C. suspensión	Spirulina platensis	Agua residual sintética	DQO: 97.32%, NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 79.68%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> :13%	[1]
Barril + ceramsita biológica (sustrato).	C. adjunto	Cyperus alternifolius (C. alternifolius)	Agua de Lluvia	DQO: 93.4%, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 71%, TN: 75%, TP: 76.5%	[37]
Entidad ecológica integradora incrustada (IIEE).	C. suspensión	Plantas acuáticas: Cyperus alternifolius Linn, Potamogeton crispus Linn,	Agua de reposición simulada (SRW) con alta concen. de nutrientes (SRW-I)	COD: 94.87%. Cr 84.05%. TN: 94.76%	[38]
Entidad ecológica integradora incrustada (IIEE).	C. suspensión	Plantas acuáticas: Cyperus alternifolius Linn, Potamogeton crispus Linn,	Agua de reposición simulada (SRW) con baja concen. de nutrientes (SRW-II)	COD: 52.62%, Cr: 90.05%, TN: 82.44%	[38]
Fotobiorreactor de membrana de biopelícula de microalgas (BF-MPBR) con portadores sólidos suspendidos y un módulo de membrana de microfiltración	C. adjunto	Chlorella vulgaris marina	Aguas residual de la acuicultura marina	DIN: 99.6%, DIP: 98.4%, Sufadiazina (SDZ): 79.2%, Sulfametazina (SMZ): 76.7%, Sulfametoxazol (SMX): 82.1%	[39]
Fotobiorreactor tubular vertical (PBR). Bubble column.	C. suspensión	Chlorella vulgaris (Cv), Scenedesmus obliquus (Sc) y Consortium C (ConsC).	Agua residual	TN: (Cv 84%, Sc 95%, ConsC 98%. COD: Cv 36%, Sc 63%, ConsC 64%), P: (Cv 95%, Sc 92%, ConsC 100%).	[40]

Reactor	Tipo de cultivo	Microalga/ bacteria	Tipo de Agua	Parámetros. Remoción máxima.	Referencias
Reactor de biofilm de lecho móvil (MBBR).	C. adjunto	Lodo Activado	Agua residual sintética	Diclofenaco (DFN): 66.01%, Ibuprofeno: 37.33%.	[41]
Fotobiorreactor de columna + Agar.	C. adjunto	Chlorella saccharophila	Agua residual	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> : 97.6%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> :96.1%	[42]
Fotobiorreactor de membrana microalgal-bacterial híbrido (HMPBR) con portadores de biopelícula sólida	C. adjunto	Microalgas. No especifica	Agua residual sintética	DQO: 99.64%, TN: 98.02%, TP: 98.13%, Atrazina: 95.39%	[43]
Fotobiorreactor de membrana microalgal-bacterial (MPBR) sin portadores de biopelícula.	C. suspensión	Microalgas. No especifica	Agua residual sintética	DQO: 91.59%, TN: 85.59%, TP: 90.37.51%, Atrazina 84.63%	[43]
Tanque	C. suspensión	Chlorella protothecoides, Brevundimonas diminuta.	Agua residual sintética y real	DQO: 92%. N: 80%. P:71%	[44]
Fotobiorreactor.	C. suspensión	Chlamydomonas sp	Agua residual sintética	Ciprofloxacina (CIP): 100%, Sulfadiazina (SDZ): 54.53%	[45]

\* Fósforo total (TP), nitrógeno total (TN), amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), concentración de nitrógeno (N), concentración de fósforo (P), fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), demanda química de oxígeno (COD), nitrógeno inorgánico disuelto (DIN), fósforo inorgánico disuelto (DIP), amoniaco (NH<sub>3</sub>), sólidos totales disueltos (TDS), demanda biológica de oxígeno que los microorganismos consumen durante 5 días a 20 °C de temperatura (DBO5),

Mezcla de microorganismos 1: (*Amphora coffeaformis*, *Tetraselmis striata*, *Aphanocapsa sp.*, *Geitlerinema amphibium*, *Geitlerinema carotinosum*, *Geitlerinema sp.*, *Phormidium keutzingianum*, *Pseudanabaena sp.*, *Pseudanabaena sp.*, *Pseudanabaena sp.*, *Picochlorum oklahomensis*, *Nitzschia sp.*, *Aphanotece sp.*). Mezcla de microorganismos 2: (*Chlorella vulgaris*, *Nitzschia frustulum*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Gomphonema afín* y *Micractinium pusillum*. Bacterias: phyla Proteobacterias y Bacteroidetes: *Sphingobacteriaceae*, *Cytophagaceae*, *Flavobacteriaceae*, *Comamonadaceae*, *Planctomycetaceae*, *Nocardiaceae* y *Nostocaceae*). Mezcla de microorganismos 3: (*Scenedesmus obliquus*, *Desmodesmus costato-granulatus*, *Scenedesmus acutus*, *Chlorella vulgaris* y *Pseudopediastrum kawraiskyi* con *Scenedesmus obliquus be-ing*. Cianobacterias: *Dolichospermum macrosporium*. Bacterias: phyla Proteobacterias y Bacteroidetes: *Sphingobacteriaceae*, *Cytophagaceae*, *Flavobacteriaceae*, *Comamonadaceae*, *Planctomycetaceae*, *Nocardiaceae* y *Nostocaceae*.



Tabla Anexos 3. Recopilación completa de los resultados de los artículos de investigación de limpieza de aguas (25 artículos).

Reactor	Tipo de cultivo	Condiciones del reactor	Microalga/ bacteria	Tipo de Agua	Parámetros. Remoción máxima.
Sistema de incubadora de carril	C. suspensión	D: 42 Portaobjetos (7.6cm*2.5cm), T: 25°C, L: 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , otras: Cuatro carriles de flujo separados	Cianobacterias: Anabaena augstumalis, Calothrix s p. y Nostoc sp.	Agua residual sintética	TP: Calothrix 43% / A. augstumalis 28%/ Nostoc sp.23%
Fotobiorreactor de membrana (MPBR) + zeolita	C. adjunto	D: Vol 2.25 L,T: 24°C, L: 144 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , pH: 7.4-8.1, otras: A: 0.8 Lmin <sup>-1</sup> , HRT: 24 H, Zeolita clinoptilolita	Chlorella vulgaris	Agua residual sintética	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 30%
Reactor multitrófico a microescala + perlas de PVA	C. adjunto	D: Vol: 5 mL, T:27 °C, Potencia lumínica: 1050 lm, pH: 7.3, otras: No suministro de O <sub>2</sub> , Lotes: 6 días.	No especifica	Agua residual sintética	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 61%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 82 %
Reactores de lecho fluidizado (FBR) + alginato	C. adjunto	D: Tubos de 3cm*20cm, pH: 7, otras: HTR:16h, Perlas de alginato 350 mL (porción de llenado 50%).	Bacterias (Micrococcus sp., Corynebacterium sp., Flavobacterium sp., Bacillus sp. y Pseudomonas sp). Microalga (Scenedesmus obliquus)	Agua residual de un campo petrolero	DQO: 70,8%, NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 61.2%, Aceite de petróleo: 84.2%
Fotobiorreactor de tubos	C. suspensión	D: Tubos de 40mm*500mm, T: 25°C, pH: 7.05, L: 3000 lux, otras: Tiempo: 2 semanas	Chlorella vulgaris	Agua residual láctea suplementada con CO <sub>2</sub> .	Fijación de C : 87.67mg/l/día, TN: 72.34%, TP: 67.45%
Algadisco	C. adjunto	D: Contactador biológico giratorio RBC, Eje común 30 cm, 15 discos de 12cm de diámetro, 40% de inmersión, Eje gira a 5 rpm, T: 25°C, pH: 7.05, L: 3000 lux, otras: Tiempo: 2 semanas	Chlorella vulgaris	Agua residual láctea suplementada con CO <sub>2</sub> .	Fijación de C : 88.5 mg/l/día, TN: 72.34%, TP: 67.45%

Reactor	Tipo de cultivo	Condiciones del reactor	Microalga/ bacteria	Tipo de Agua	Parámetros. Remoción máxima.
Fotobiorreactor	C. suspensión	D: Vol 2L, L: 85+4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , pH: <8, otras: A: 20 mL min <sup>-1</sup> , Tiempo: 30 días.	*Mezcla de microorganismos 1	Agua residual de retorno (FWW)	TDS: 65%, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 100%, Bo: 95%
Fotobiorreactor de membrana (MPBR)+ Zeolitas	C. adjunto	D: Vol 10 L, L: 200-250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , T: ambiente, otras: Vel: 4Lmin <sup>-1</sup> .	Chlorella vulgaris, Spirulina sp., Scenedesmus sp. y Nannochloropsis oculata	Agua residual de licuefacción hidrotermal (HTLWW)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 99.5%
Reactor de biopelícula de sustrato poroso (PSBR)	C. adjunto	D: Vol 4.5 L, T: 26°C-42°C (Luz solar), otras: Velocidad 4 rpm, Tiempo: 5 días.	Chlorella vulgaris	Aguas residuales	NH <sub>3</sub> : 99.95%, TN: 96.05%, TP: 99.83%
Biobiorreactor de biopelícula (PBR)	C. adjunto	T: ambiente 25+3 °C, L: 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , pH: 10-10.5, otras: Semilote y semicontinuo por 41 días, Vel: 4.45 mL min <sup>-1</sup> , sin insuflación de aire	Scenedesmus vacuolatus y Chlorella vulgaris	Agua residual sintética	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 89%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 91%
Estanques abiertos + tejidos de algodón y lámina de polietileno.	C. adjunto	D: Vol 50 L, T: ambiente 20+-0.5°C, L: 120 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , otras: A: 3.2 Lmin <sup>-1</sup> , Lotes. 56 días.	Chlorococcum sp.	Efluente secundario de Agua residual	TP: 97%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 93%, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 99%
Fotobiorreactor de membrana osmótica (OMPBR)	C. suspensión	D: Vol 2L, L: 7000 a 8000 lx, pH: 7.5, otras: Continuo por 12-18 días, HRT: 1.5 días.	Graesiella emersonii	Agua residual sintética	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 100%, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 99.8%
Reactor de lecho móvil por lotes de secuenciación en serie (SSBMBR).	C. suspensión	D: 7 MBBR de Volumen 5.7 L, otras: A: 33.3 Lmin <sup>-1</sup> , HRT: 37.5 H	Microorganismos. No especifica	Agua residual hospitalaria	DQO 91%
Reactor con fotogranulos oxigenados (OPG)	C. adjunto	No especifica	Cianobacteria: Oscillatoria spp. y Genero: Geitlernema. Cyanobium	Agua residual	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : disminución
Fotoreactores, tanque	C. suspensión	D: Vol 5 L, T: ambiente 25-29 °C (Luz solar), pH: 7-10, otras: Tiempo: 21 días.	Botryococcus sp.	Aguas gris de baño	DBO <sub>5</sub> 98%, COD: 85.47%, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 98%, NH <sub>3</sub> : 99, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 99.3%, K: 97%, Ca: 95%.

Reactor	Tipo de cultivo	Condiciones del reactor	Microalga/ bacteria	Tipo de Agua	Parámetros. Remoción máxima.
Reactores de cátodo de aire de cámara única (MFC) + Acetato.	C. adjunto	D: Vol 28 mL, pH: 6.6.	Microalgas. No específica	Agua residual	TCOD 86.6%. DQO 8.5%
Fotobiorreactor	C. suspensión	D: Vol 20 L, T: 23±0.5°C, L: 16 de 24 horas: 10000lux (aprox 135 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ), pH grifo: 7.4-6.8, otras: Tiempo: 16 días, A: 270 rpm, 3 L/min.	*Mezcla de microorganismos 2	Agua residual municipal y agua de grifo (Relación 70/30 v/v)	Co: 75.6±2.2%. Zn: 63.6%±22.7%. TN: 73%. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 99.9%. Cr, Ni, Cu, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : aumento de concentración. Cd, As, Pb: no cambios significativos
Fotobiorreactor	C. suspensión	D: Vol 20 L, T: 23±0.5°C, L: 16 de 24 horas: 10000lux (aprox 135 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ), pH-Lago: 7.4-10.6, otras: Tiempo: 16 días, A: 270 rpm, 3 L/min.	*Mezcla de microorganismos 3	Agua residual municipal y agua de lago (Relación 70/30 v/v)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 99.9%, Co: 56.5±11.7%, Zn: 82.1±3.9%, TN: 47%, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 99.9%. Cr, Cu no cambios signific. Ni: redujo concentración. Cd, As, Pb: no cambios significativos
Biorreactor de membrana MBR	C. suspensión	D: Vol 5 L, T: 21°C, pH: 9.7, otras: A: 5 L/min, HTR: 6 días.	Spirulina platensis	Agua residual sintética	DQO: 97.32%, NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> : 79.68%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : 13%
Barril + ceramsita biológica (sustrato).	C. adjunto	D: Vol 20 L, T: 18.4 °C, otras: Tiempo: 240 días.	Cyperus alternifolius (C. alternifolius)	Agua de Lluvia	DQO: 93.4%, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 71%, TN: 75%, TP: 76.5%
Entidad ecológica integradora incrustada (IIEE).	C. suspensión	T: ambiente 28 °C prom, otras: Tiempo: 15 días.	Plantas acuáticas: Cyperus alternifolius Linn, Potamogeton crispus Linn,	Agua de reposición simulada (SRW) con alta concen. de nutrientes (SRW-I)	COD: 94.87%. Cr 84.05%. TN: 94.76%
Entidad ecológica integradora incrustada (IIEE).	C. suspensión	T: ambiente 28 °C prom, otras: Tiempo: 15 días.	Plantas acuáticas: Cyperus alternifolius Linn, Potamogeton crispus Linn,	Agua de reposición simulada (SRW) con baja concen. de nutrientes (SRW-II)	COD: 52.62%, Cr: 90.05%, TN: 82.44%

Reactor	Tipo de cultivo	Condiciones del reactor	Microalga/ bacteria	Tipo de Agua	Parámetros. Remoción máxima.
Fotobiorreactor de membrana de biopelícula de microalgas (BF-MPBR) con portadores sólidos suspendidos y un módulo de membrana de microfiltración	C. adjunto	D: Vol 1 L, T: 30 °C, L: 101.5-112.3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , pH: 7.75 $\pm$ 0.29, otras: A: 0.5 Lmin <sup>-1</sup> , HRT: 1-2 días	Chlorella vulgaris marina	Aguas residual de la acuicultura marina	DIN: 99.6%, DIP: 98.4%, Sufadiazina (SDZ): 79.2%, Sulfametazina (SMZ): 76.7%, Sulfametoxazol (SMX): 82.1%
Fotobiorreactor tubular vertical (PBR). Bubble column.	C. suspensión	D: Vol 150 L, T: 17 °C prom, pH: 8.20, otras: A: 1 v/v/min.	Chlorella vulgaris (Cv), Scenedesmus obliquus (Sc) y Consortium C (ConsC).	Agua residual	TN: (Cv 84%, Sc 95%, ConsC 98%. COD: Cv 36%, Sc 63%, ConsC 64%), P: (Cv 95%, Sc 92%, ConsC 100%).
Reactor de biofilm de lecho móvil (MBBR).	C. adjunto	D: Vol 8.5 L, T: 37 °C, pH: 7, otras: HTR: 10 H, aeróbico, relación de llenado de empaquetadura Kaldnes: 40%	Lodo Activado	Agua residual sintética	Diclofenaco (DFN): 66.01%, Ibuprofeno: 37.33%.
Fotobiorreactor de columna + Agar.	C. adjunto	T: 30 °C, L: 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , pH 7.3, otras: Luz/oscuro: 12h/12h, HTR: 72 H.	Chlorella saccharophila	Agua residual	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> : 97.6%, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> :96.1%
Fotobiorreactor de membrana microalgal-bacterial híbrido (HMPBR) con portadores de biopelícula sólida	C. adjunto	D: Vol 5 L, L: 8500 $\pm$ 10.3 Lux, otras: A: 4-5L/h. HRT: 12 H, En el HMPBR con portadores sólidos (fibras de kenaf) 60% vol total.	Microalgas. No especifica	Agua residual sintética	DQO: 99.64%, TN: 98.02%, TP: 98.13%, Atrazina: 95.39%
Fotobiorreactor de membrana microalgal-bacterial (MPBR) sin portadores de biopelícula.	C. suspensión	D: Vol 5 L, L: 8500 $\pm$ 10.3 Lux, otras: A: 4-5L/h. HRT: 12 H, En el HMPBR con portadores sólidos (fibras de kenaf) 60% vol total.	Microalgas. No especifica	Agua residual sintética	DQO: 91.59%, TN: 85.59%, TP: 90.37.51%, Atrazina 84.63%
Tanque	C. suspensión	D: Vol 300 mL, T: 24 °C, L: 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .	Chlorella protothecoides, Brevundimonas diminuta.	Agua residual sintética y real	DQO: 92%. N: 80%. P:71%
Fotobiorreactor.	C. suspensión	D: Vol 0.5 L, T: 20-40 °C, L: 150-450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , otras: Tiempo: 9 días	Chlamydomonas sp	Agua Residual Sintética	Ciprofloxacina (CIP): 100%, Sulfadiazina (SDZ): 54.53%

\* *Dimensión (D), Temperatura (T), Intensidad de luz (L), Tiempo de retención hidráulico (HTR), Aireación (A), Velocidad (V), Fósforo total (TP), nitrógeno total (TN), amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), concentración de nitrógeno (N), concentración de fósforo (P), fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), demanda química de oxígeno (COD), nitrógeno inorgánico disuelto (DIN), fósforo inorgánico disuelto (DIP), amoniaco (NH<sub>3</sub>), sólidos totales disueltos (TDS), demanda biológica de oxígeno que los microorganismos consumen durante 5 días a 20 °C de temperatura (DBO5), Mezcla de microorganismos 1: (Amphora coffeaformis, Tetraselmis striata, Aphanocapsa sp., Geitlerinema amphibium, Geitlerinema carotinosum, Geitlerinema sp., Phormidium keutzingianum, Pseudanabaena sp., Pseudanabaena sp., Pseudanabaena sp., Picochlorum oklahomensis, Nitzschia sp., Aphanotece sp.). Mezcla de microorganismos 2: (Chlorella vulgaris , Nitzschia frustulum ,Phaeodactylum tricornutum , Gomphonema afín yMicractinium pusillum . Bacterias: phylaProteobacterias y Bacteroidetes: Sphingobacteriaceae,Cytophagaceae , Flavobacteriaceae , Comamonadaceae ,Planctomycetaceae , Nocardiaceae y Nostocaceae). Mezcla de microorganismos 3: (Scenedesmus obliquus , Desmodesmus costato-granulatus , Scenedesmus acutus , Chlorella vulgaris yPseudopediastrum kawraiskyi con Scenedesmus obliquus be-ing. Cianobacterias: Dolichospermum macrosporum. Bacterias: phylaProteobacterias y Bacteroidetes: Sphingobacteriaceae,Cytophagaceae , Flavobacteriaceae , Comamonadaceae ,Planctomycetaceae , Nocardiaceae y Nostocaceae.*