UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TEMA:

MICROALGAS COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA. UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

AUTORES:

ELSY MARISOL CASCO HEREDIA

JOSSELYN CAROLINA CONTENTO MALDONADO

DIRECTOR DEL PROYECTO/TRABAJO:

MSc. KAREL DIÉGUEZ SANTANA

PASTAZA – ECUADOR

2021

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Quien/es suscribe/n Elsy Marisol Casco Heredia con C.I. 2200517031; Josselyn Carolina Contento Maldonado con C.I. 2200505432, hace constar que es autor/a del Proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado:

"Microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas y producción de bioenergía. Una revisión sistemática", el cual constituye una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del Tutor de dicho trabajo,

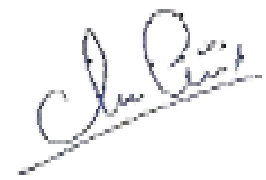
Dr/Msc. Karel Diéguez Santana. En tal sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo como interpretación de datos y elaboración de conclusiones dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

En el cantón Pastaza, a los 7 días del mes de julio del 2021.



Casco Heredia Elsy Marisol

CI: 2200517031



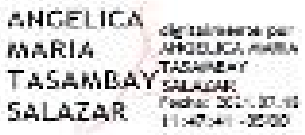
Contento Maldonado Josselyn Carolina

CI: 2200505432

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

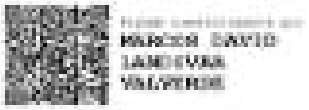
El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado:

"Microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas y producción de bioenergía. Una revisión sistemática"



Dr/Msc. Tasambay Salazar Angelica María

Presidente del Tribunal



Dr/Msc. Landivar Valverde Marcos David

Miembro del Tribunal



Dr/Msc. Peñafiel Arcos Pedro Andrés

Miembro del Tribunal

CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD OBTENIDO EN EL SISTEMA ANTI PLAGIO

Quien suscribe el presente Dr/Msc Karel Diéguez Santana con CI: 1756444129, certifica que el Proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado: "Microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas y producción de bioenergía. Una revisión sistemática", ha sido examinado a través del sistema Anti plagio URKUND y presenta un porcentaje de similitud de 0 %.

En el cantón Pastaza, a los 15 días del mes de julio del 2021.



_____

Dr/Msc: Karel Diéguez Santana

Director del Proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular

Derechos de Autor Copyright

©2021, Elsy Marisol Casco Heredia; Josselyn Carolina Contento Maldonado

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Declaración de Autenticidad

Yo, Elsy Marisol Casco Heredia, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular.



ELSY MARISOL CASCO HEREDIA

No. Cédula: 2200517031

Declaración de Autenticidad

Yo, Josselyn Carolina Contento Maldonado, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular.



JOSSELYN CAROLINA CONTENTO MALDONADO

No. Cédula: 2200505432

DEDICATORIA

Con infinito amor y agradecimiento quiero dedicarles este proyecto a mis queridos padres Fidel Casco y Rosa Heredia, quienes con su amor, esfuerzo y paciencia me han apoyado en el transcurso de toda la carrera universitaria y a lo largo de mi vida.

A mis hermanas Jenny, Liliana y Fernanda, por su cariño, alegría y apoyo incondicional han sabido motivarme para seguir avanzando sin dejarme vencer ante las adversidades.

Con mucho cariño a mis queridos sobrinos Sebastián y Sophia, quienes invaden de felicidad la vida de toda la familia.

Elsy Marisol Casco Heredia

DEDICATORIA

Con profundo amor dedico el presente proyecto a Dios, que bajo sus dones me ha permitido desarrollar este trabajo de la mejor manera. A mis padres, Rubén y Yobania quienes depositaron en mí su confianza, y son ellos quienes con sus valores y enseñanzas me han forjado e instruido para cumplir con cada una de mis metas. A mis hermanos, Kerly y Dennis por acompañarme en este camino con sus consejos y sabiduría.

Josselyn Carolina Contento Maldonado

AGRADECIMIENTO

Expreso mi infinita gratitud a Dios por ser el pilar fundamental en mi vida, quien con su bendición me ha permitido alcanzar mis anhelos.

A mi familia por ser mi fortaleza, gracias por haber confiado en mí y apoyado incondicionalmente en todo momento, a través de sus consejos, oraciones y palabras de aliento, me motivaron a ser una mejor versión de mí y esforzarme por lo mis sueños.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al MSc. Karel Diéguez, tutor del proyecto de investigación, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza, paciencia y colaboración fue posible el desarrollo del presente trabajo.

Finalmente expreso mi agradecimiento a mi compañera de trabajo Josselyn Contento, quien ha sido una fuente de apoyo y motivación en el transcurso del desarrollo del trabajo de titulación. También quiero agradecer a mis compañeros y amigos por su amistad y ayuda en el transcurso de toda la carrera universitaria.

El apoyo de cada uno de ustedes me ha permitido obtener este triunfo.

Elsy Marisol Casco Heredia

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más grande gratitud a Dios y a mi Madre del cielo, quienes en los momentos más difíciles me han ayudado a seguir en pie de lucha, a lo largo de mi carrera universitaria.

Agradezco a mi familia por su apoyo a lo largo de mi carrera aniversaria. Por siempre estar presentes en los momentos de goce y en los momentos de dificultad. Por ser mi motor, mi impulso de salir adelante, y quienes me han instruido valores para enfrentar cada adversidad que se me ha presentado en el camino.

De la misma manera mi más profundo agradecimiento al MSc. Karel Diéguez, tutor del proyecto, quién a través de su sabiduría, tiempo, y confianza nos ha sabido guiar de la mejor manera en la realización del trabajo.

Asimismo, agradezco a mi compañera y amiga de proyecto, Elsy Casco. Quien con su esfuerzo y dedicación ha permitido que el desarrollo del trabajo sea llevadero y fructuoso.

Y por último, pero no menos importante, agradezco a mis amigos y compañeros que la vida universitaria ha puesto en mi camino, que han sido de gran apoyo para el cumplimiento de esta gran meta.

Josselyn Carolina Contento Maldonado

RESUMEN

La contaminación de los recursos hídricos y la preocupación ambiental por tratar las aguas residuales domésticas está motivando la mejora de los tratamientos convencionales. El presente trabajo tiene por objetivo analizar los sistemas de cultivo de microalgas integrados al tratamiento de aguas residuales domésticas y los procesos de conversión de bioenergía para la obtención de biocombustibles. El desarrollo de la investigación se realizó de forma exploratoria cualitativa documental, mediante la recuperación de información a través de varias herramientas bibliométricas, y criterios de elegibilidad, se llevó a cabo la búsqueda de información en la base de datos Scopus. Los sistemas de cultivo de microalgas pueden ser abiertos o cerrados. Los estanques de canalización abierta son los sistemas más empleados a gran escala. Las microalgas son capaces de remover los contaminantes presentes en las aguas residuales especialmente los nutrientes como nitrógeno y fósforo, que aprovechan para la producción de biomasa. Esta biomasa a través de los diferentes procesos de conversión de bioenergía puede convertirse en biocombustibles como biocrudo, gas de síntesis, bioetanol, biodiesel, biogás, entre otros. Aún existen varias limitantes para la producción de biocombustibles debido a que los métodos de cosecha, secado y extracción de lípidos resultan deficientes y costosos.

Palabras Clave: Microalgas, Aguas Residuales Domésticas, Bioenergía, Biocombustibles, Fotobiorreactores, Estanques de Canalización Abierta.

ABSTRACT

The contamination of water resources and the environmental concern for treating domestic wastewater is motivating the improvement of conventional treatments. The objective of this work is to analyze microalgae cultivation systems integrated to domestic wastewater treatment and bioenergy conversion processes to obtain biofuels. The development of the research was carried out in a qualitative documentary exploratory way, by retrieving information through various bibliometric tools and eligibility criteria, the search for information was carried out in the Scopus database. Microalgae culture systems can be open or closed. Open channel ponds are the most used large-scale systems. Microalgae can remove pollutants present in wastewater, especially nutrients such as nitrogen and phosphorus, which they use to produce biomass. This biomass, through different bioenergy conversion processes, can be converted into biofuels such as biocrude oil, synthesis gas, bioethanol, biodiesel, biogas, among others. There are still several limitations to produce biofuels because the methods of harvesting, drying and extraction of lipids are deficient and costly.

Keywords: Microalgae, Domestic Wastewater, Bioenergy, Biofuels, Photobioreactors, Open Channel Ponds.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN xii
ABSTRACT xiii
1 CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 18
1.1 Planteamiento del problema 19
1.2 Objetivos 20
1.2.1 Objetivo general 20
1.2.2 Objetivos específicos 20
1.3 Justificación 20
2 CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 22
2.1 Aguas Residuales Clasificación 22
2.1.1 Aguas Residuales Domésticas 22
2.1.2 Aguas Residuales Municipales 22
2.1.3 Aguas residuales Farmacéuticas 23
2.1.4 Aguas residuales de Industrias Lácteas 23
2.1.5 Aguas residuales de Industria textil 23
2.1.6 Aguas residuales Porcina y Acuícola 24
2.2 Microalgas 24
2.3 Especies de microalgas más frecuentes 25
2.4 Sistemas de microalgas 26
2.4.1 Sistema de cultivo abierto 27
2.4.2 Sistema de cultivo cerrado 27
2.5 Vías de conversión de biomasa de microalgas en biocombustibles 29
2.5.1 Conversión bioquímica 29
2.5.2 Conversión química 30
2.5.3 Conversión termoquímica 30
2.6 Principales biocombustibles que pueden obtenerse de microalgas 31
2.6.1 Bioetanol 31
2.6.2 Biobutanol 32
2.6.3 Biodiesel 32
2.6.4 Biogás 32
2.6.5 Biohidrógeno 32
2.6.6 Gas de síntesis/Electricidad 33
2.6.7 Biochar 33

3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 34
3.1 Tipo de Investigación 34
3.2 Métodos de Investigación 34
4 CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS 38
4.1 Análisis de la información relevante sobre la aplicación de microalgas en el tratamiento de aguas residual domésticas. 38
4.2 Revisión de los diferentes sistemas de microalgas de aguas residuales domésticas y los procesos de conversión de bioenergía. 43
4.3 Métodos de recolección de biomasa algal 48
4.4 Técnicas de secado 53
4.5 Técnicas de extracción de lípidos 54
4.6 Procesos de conversión de bioenergía 56
4.7 Potencialidades de los procesos de tratamiento basados en microalgas con fines de obtención de bioenergía a partir de los recursos de las aguas residuales 62
4.7.1 Viabilidad técnica 62
4.7.2 Viabilidad ambiental 63
4.7.3 Viabilidad económica 63
5 CONCLUSIONES 65
6 RECOMENDACIONES 66
7 REFERENCIAS 67
8 APÉNDICES 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Especies de microalgas, sus aplicaciones y valores de productividad..... 25
Tabla 2-4: Tabla comparativa de los sistemas de cultivo abierto y producción de biomasa..... 43
Tabla 3-4: Tabla comparativa de los sistemas de cultivo cerrado y producción de biomasa..... 44
Tabla 4-4: Eficiencia de los métodos de recolección de biomasa algal 52
Tabla 5-4: Parámetros de operación y productos que se obtienen de los procesos de conversión termoquímica 58
Tabla 6-4: Potencial de los diferentes procesos para la producción de biocombustibles 61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1-3. Pasos para la revisión de la literatura y definición de los antecedentes teóricos abordados en la literatura científica a consultar 35
Figura 2-4. Número de artículos anuales relacionados con la investigación 38
Figura 3-4. Número de artículos por áreas temáticas de la investigación 39
Figura 4-4. Número de artículos por tipo de publicación 40
Figura 5-4. Distribución de artículos por idiomas 40
Figura 6-4. Agrupación de artículos por continentes o áreas geográficas 41
Figura 7-4. Número de artículos por países con al menos 50 investigaciones del tema 42
Figura 8-4. Procesos unitarios previos a la conversión de bioenergía 48
Figura 9-4. Diferentes métodos para la producción de biocombustible a partir de microalgas 57
Figura 10-4. Proceso de conversión termoquímico 57
Figura 11-4. Procesos de conversión química 59
Figura 12-4. Proceso de conversión Bioquímica para la producción de biogás y bioetanol 61

1 CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de la generación de aguas residuales a raíz de las diferentes fuentes, como son, domésticas, municipales, agrícolas, e industriales, no solo es responsable de la contaminación del agua ya sea esta superficial o subterránea, sino también es responsable de un elevado costo energético convencional para su tratamiento que lleva consigo la liberación de gases de efecto invernadero (Jaiswal, et al., 2020). Lodos activados, filtro por goteo y filtro de membrana son algunos de los métodos convencionales aplicados al tratamiento de aguas residuales, los cuales en términos energéticos son ineficaces. La deficiencia en el suministro de recursos energéticos no renovables y el aumento de las necesidades energéticas mundiales han creado una crisis energética mundial junto con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y el deterioro ambiental (Hoh, Watson, y Kan, 2016).

En la actualidad, los problemas de seguridad energética asociados con el uso de combustibles fósiles convencionales junto con las consecuencias ambientales han llevado a un cambio de paradigma hacia los combustibles renovables. Las fuentes renovables como la biomasa se popularizan cada vez más, debido a los menores riegos ambientales (Behera, Acharya, Gargey, Aly, y Paramasivan, 2019). Las microalgas como organismos fotosintéticos tienen la capacidad de fijar CO_2 ya sea ambiental o antropogénico junto con la liberación de O_2 al ambiente, absorben nutrientes y metales tóxicos. Además, poseen la capacidad de sobrevivir en condiciones ambientales diversas (Li, et al., 2019).

Es por ello que esta revisión sistemática se enfoca en evaluar las microalgas como una alternativa sustentable en el tratamiento de las aguas residuales domésticas y la producción de bioenergía utilizando la masa algal. Para ello se evalúan los diferentes sistemas de cultivos de microalgas, y los procesos de conversión de biomasa para la producción de bioproductos, entre ellos los biocombustibles. Por lo tanto, las microalgas tienen grandes ventajas entre ellas, su cultivo no requiere de grandes extensiones de terreno, poseen alta productividad de biomasa y un elevado contenido de lípidos en comparación con la materia prima utilizada para combustibles de primera y segunda generación (Drira, Piras, Rosa, Porcedda, y Dhaouadi, 2016). Su aplicación en el tratamiento de aguas residuales y su aprovechamiento en la producción de bioenergía resulta rentable y favorable para la contribución al desarrollo sostenible.

1.1 Planteamiento del problema

La urbanización y el desarrollo industrial han traído un aumento de la generación de aguas residuales urbanas (Hernández-García, et al., 2019). Según Bhatnagar, Bhatnagar, Chinnasamy, y Das (2010) los seres humanos generan ~3 mil millones de toneladas de aguas residuales domésticas. Informes de las Naciones, (WWAP, 2017) mencionan que alrededor del 80% de las aguas residuales se vierten en cuerpos de agua sin un tratamiento adecuado (Guo, Lei, Wang, y Wei, 2019). Por otra parte, Sun et al. (2016) menciona que, en el año 2030, cerca del 40% del mundo se enfrentará a una crisis del agua, lo que representa un grave desafío social y económico para los próximos años. En el Ecuador más del 90% de los municipios no tratan sus aguas servidas (Ramos, 2020). Los tratamientos convencionales de aguas residuales permiten reducir la cantidad de nutrientes (Kumar y Pal, 2015). Sin embargo, estos métodos no son económicos y sostenibles (Gurung, Tang, y Sillanpää , 2018).

Una posible solución para tratar las aguas residuales domésticas es la aplicación de microalgas en el tratamiento biológico de las mismas. Estas utilizan nutrientes de las aguas residuales para producir nueva biomasa (Rusten y Sahu, 2011), que puede utilizarse como materia prima para la generación de bioenergía y bioproductos de valor añadido, por lo que representaría una estrategia eficaz para un desarrollo socioeconómico sostenible que brinda un concepto de bioeconomía circular (Mishra, Roy, y Mohanty, 2019). Lo que permite reducir el uso de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural, que emiten aproximadamente 6 mil millones de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera (Mondal, et al., 2017).

¿Las microalgas podrían despertar el interés en los países en vía de desarrollo, en realizar un cambio en el actual sistema de tratamiento de aguas residuales y desarrollar bioproductos a partir de su biomasa?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar los sistemas de microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas y producción de bioenergía a partir de una revisión sistemática de literatura.

1.2.2 Objetivos específicos

- Seleccionar información relevante relacionada a la aplicación de microalgas en el tratamiento de aguas residual domésticas.
- Revisar los diferentes sistemas de microalgas de aguas residuales domésticas y los procesos de conversión de bioenergía.
- Identificar el potencial de los procesos de diversos sistemas de tratamiento basados en microalgas con fines de obtención de biocombustibles a partir de los recursos de las aguas residuales.

1.3 Justificación

El agua es uno de los recursos esenciales para la vida. En la actualidad el consumo de este recurso ha incrementado considerablemente, teniendo como resultado grandes cantidades de aguas residuales por ser tratadas, siendo estas, descargadas directamente en cuerpos de agua poniendo en peligro el bienestar de los seres humanos y de los ecosistemas acuáticos. La alteración de la composición natural de una fuente hídrica tiene serias repercusiones en la funcionalidad y servicios que provee este recurso.

Existen varios tipos y niveles de tratamiento de aguas residuales (WWAP, 2017). Los tratamientos convencionales de aguas residuales como la digestión anaeróbica, la sedimentación o coagulación, la desnitrificación y la nitrificación permiten reducir la cantidad de nutrientes en las aguas residuales (Kumar y Pal, 2015). Sin embargo, estos métodos no son económicos y sostenibles, debido a la baja eficiencia de eliminación de nutrientes (~10~93%) (Gurung, Tang, y Sillanpää , 2018), requieren un alto aporte de energía (4-391 kWh) (Ezugbe y Rathilal, 2020), requieren mucho tiempo (5-75 días) (Abdelgadir, et al., 2014) y generan grandes cantidades de lodos (Goswami, Mehariya, Verma, Lavecchina, y Zuorro, 2021).

Por ello surge la necesidad de investigar nuevas tecnologías que puedan ser usadas en el tratamiento de aguas residuales. En ese sentido algunos tratamientos biológicos de aguas residuales se han convertido en enfoques prometedores para la

recuperación de recursos valiosos de diferentes aguas residuales al reducir el consumo de recursos naturales y preservando el medio ambiente natural. Entre ellos, los tratamientos basados en microalgas han sido reportaos como muy beneficiosos debido a la eficiencia de bioacumulación significativa, la utilización de nutrientes y la alta tasa de productividad de la biomasa (Rawat I. , Ranjith Kumar, Mutanda, y Bux, 2013).

La Agenda 2030 en el objetivo 7 de las metas del desarrollo sostenible aborda las cuestiones relacionadas con la energía limpia y asequible (Mondal, et al., 2017). A pesar del avance de las alternativas de energía renovable en los últimos años, su uso es limitado en vista del potencial que presenta (Couto, Calijuri, y Assemany, 2020), y principalmente, ante la urgente necesidad de un cambio de paradigma en el sector.

En este contexto, el uso de microalgas para la producción de biocombustibles de tercera generación está ganando cada vez más atención (Vieira de Mendonça, et al., 2021). La biomasa de algas se puede utilizar para producir diferentes biocombustibles, como biodiésel, biogás, bioetanol y bioaceite, superando algunas de las principales dificultades de los biocombustibles de 1ª y 2ª generación (Chowdhury y Loganathan, 2019). Las microalgas tienen una alta tasa fotosintética en comparación con las plantas superiores (Chisti, 2013), lo que significa una alta productividad de la biomasa. Además, pueden desarrollarse en áreas no aptas para la agricultura (Savage y Hestekin, 2013), evitando conflictos relacionados con la seguridad alimentaria y pueden producirse durante el tratamiento de aguas residuales (Craggs, Sutherland, y Campbell, 2012; de Mendonça, Balbaud Ometto, Otenio, Ramos Marques, y Dos Reis, 2018; Tango, Calijuri, Assemany, y do Couto, 2018), considerado como un reciclaje de nutrientes, sin requerir agua potable para su cultivo.

Finalmente, aún queda mucho por investigar en los países en vías de desarrollo, para desarrollar tratamientos de aguas residuales domésticas a base de microalgas que permitan obtener diferentes formas de bioenergía, por lo que esta revisión sistemática se enfoca en realizar un análisis crítico y analizar las diferentes rutas de obtención de bioenergía de sistemas de microalgas alimentados por las cargas de nutrientes de las aguas residuales domésticas. Adicionalmente, investiga el potencial de los procesos de diversos sistemas de tratamiento basados en microalgas con fines de obtención de biocombustibles a partir de los recursos de las aguas residuales.

2 CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Aguas Residuales Clasificación

Las aguas residuales las podemos encontrar en diferentes tipos, dependiendo de ello varían su composición y estrategias de tratamiento aplicadas, son comúnmente ricas en nutrientes lo que permite la eutrofización del ecosistema, provocando afectaciones a la flora y fauna (Kant Bhatia, et al., 2021). En las aguas residuales podemos encontrar varios contaminantes de componentes patógenos y químicos. Algunas de las afectaciones por la exposición a aguas residuales sin un tratamiento previo a los seres humanos son la gastroenteritis, hepatitis A e infección cutánea (Cho, et al., 2013). En muchos de los países desarrollados los estados cuentan con un sistema de alcantarillado separado para los diferentes desechos, mientras que en casi todos los países en vías de desarrollo se descargan las aguas en un sistema combinado. Debido al crecimiento demográfico y la industrialización para satisfacer nuestras necesidades podemos clasificar las aguas residuales según su origen de tipo: municipal, farmacéutica, láctea, industrial textil, porcina y acuícola.

2.1.1 Aguas Residuales Domésticas

Se conoce como aguas residuales domésticas aquellas provenientes de actividades humanas en la rutina diaria, las cuales son depositadas en sistemas de alcantarillado o algunas veces vertidas directamente al ambiente. Las aguas residuales domésticas de conforman por aguas fecales, de lavado y aguas de limpieza. Y se caracterizan por contener gérmenes patógenos, materia orgánica, detergentes, nitrógeno, fósforo, sólidos, etc, (Carrillo-Barahona, Negrete-Costales, Loor-Lalvay, y Riera-Guachichullca, 2021).

2.1.2 Aguas Residuales Municipales

Las aguas residuales municipales se componen en su mayoría de actividades domésticas y aguas lluvia, donde gran cantidad de ellas se desechan en lagos y ríos sin un tratamiento anticipado (Kotoula, et al., 2020). Las aguas residuales se describen en función a numerosos factores fisicoquímicos como carga microbiana, nitrógeno total, fosfato, metales, potasio, pH, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales, y sólidos disueltos totales (Saranya y Shanthakumar, 2019). Las aguas residuales domésticas las tenemos de dos tipos, aguas grises y aguas negras. Las aguas grises son el resultado de actividades domésticas como, fregaderos de cocina, duchas y lavanderías. Mientras que las aguas negras se forman de los desechos de inodoros.

2.1.3 Aguas residuales Farmacéuticas

La producción farmacéutica ha tenido un elevado crecimiento económico en los últimos años y al mismo tiempo provoca una grave contaminación ambiental. Cabe mencionar que los desechos de estas industrias son diferentes ya que dependen de los procesos que en ellas se ejecuten. Sin embargo, las aguas residuales farmacéuticas en su mayoría están compuestas especialmente por esteroides, analgésicos, antibióticos, detergentes, metales pesados y antidepresivos (Nayak y Ghosh, 2019). Ciertamente las industrias farmacéuticas desarrollan estrategias para evitar afectaciones al medio ambiente y a la salud humana debido a su toxicidad, la mutagénica de los contaminantes y genotoxicidad aplicando métodos primarios, secundarios y terciarios a sus desechos.

2.1.4 Aguas residuales de Industrias Lácteas

A medida que aumenta exponencialmente la demanda de leche y productos derivados de la misma, aumenta consigo la producción de aguas residuales de estas industrias. El informe mundial de leche en el 2016 informó que se realizó una producción aproximada de 818 toneladas a nivel mundial (Kant Bhatia, et al., 2021). Generalmente las aguas residuales lácteas requieren de productos químicos pata mantener el pH ya que posee una baja alcalinidad. Debido a esto se requiere de un tratamiento previo de las aguas residuales derivadas de productos lácteos, ya que su descarga directa a efluentes naturales puede causar el agotamiento del oxígeno disuelto y la liberación de compuestos tóxicos volátiles (Gramegna, et al., 2020). Por ello se aplican métodos biológicos para tratar las aguas residuales de este tipo mediante reactores de manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente, filtros percoladores, filtros anaeróbicos y lodos activados.

2.1.5 Aguas residuales de Industria textil

La industria textil es una de las más grandes a nivel mundial y produce alrededor de 1 billón de dólares en ventas al año y contribuye hasta el 7% de las exportaciones globales. Estas industrias tienden a utilizar más agua en comparación con otras. Se estima que una industria textil de tamaño medio consume aproximadamente 200 L de agua por kg de tejido y la amplia aplicación de tintes sintéticos genera grandes cantidades de aguas residuales coloreadas, donde su principal composición es de ácidos, jabón, metal, tensioactivos, y tintes (Lin, et al., 2017). Cabe mencionar que la composición de las aguas residuales de origen industrial textil depende también de los procesos que se lleven a cabo como desapretado, blanqueo, mercerización, teñido, estampado y acabado.

En cada uno de los procesos aplicados se requiere de ciertos componentes indispensables para su ejecución, en el proceso de clasificación se aplica un tratamiento con ácido mineral diluido para eliminar los restos de almidón, lo que provoca que los efluentes tengan valores elevados en la demanda biológica de oxígeno oscilando entre 300 y 450 ppm (Gupta, Pawar, y Pandey, 2019). En el blanqueamiento se aplican químicos como los ácidos peracéticos, H_2O_2. En la mercerización para impartir brillo a la tela se aplica NaOH (18-24%), para impartir colores a las telas se utilizan una gran variedad de tientes con grupos cromóforos como azo (-N =N-), carbonilo (-C = O), nitro (-N = O), quinoide y varios auxocromos (Jaiswal, et al., 2020). Una de las afectaciones de las aguas residuales textiles sobre los ecosistemas acuáticos es que infieren con la función fotosintética de las plantas, dificultan la penetración de la luz y disminuyen la actividad de los microbios.

2.1.6 Aguas residuales Porcina y Acuícola

La población mundial crece de manera exponencial y para satisfacer las necesidades alimenticias es necesario el aumento de los recursos alimentarios y proteicos, ha habido un fuerte aumento en las granjas porcinas a nivel mundial. Según un informe, había alrededor de 769,05 millones de cerdos y en 2018 se registró una producción mundial de 118,8 millones de toneladas métricas de carne de cerdo, y para su producción se requiere de antibióticos veterinarios y de hormonas esteroides para aumentar la producción y disminuir la mortalidad (Miyawaki, et al., 2021). Se estima que una concentración habitual de los componentes de las aguas residuales de la industria porcina es 0.2–2.0 g/L nitrógeno total, 0.11–1.65 g/L NH_4–N, 2–30 g/L DBO, y 0.1–0.62 g/L fósforo total.

2.2 Microalgas

Organismos fotosintéticos verdes del planeta, es lo que se conoce como microalgas. Se caracterizan por sus elevadas tasas de crecimiento y menor espacio que las plantas. A pesar de su menor espacio las microalgas tienen mayor capacidad reductora de CO_2 que las plantas, y una obtención mejorada de biomasa (Arun, et al., 2020). Las microalgas requieren de fosfato, agua, nitrógeno, CO_2 y luz solar para un crecimiento prometedor, por lo tanto, las hace óptimas para el secuestro de dióxido de carbono como una fuente eficaz para la mitigación de gases de efecto invernadero.

2.3 Especies de microalgas más frecuentes

"Varios estudios han demostrado que las especies de *Chlamydomonas*, *Chlorella y Scenedesmus* se pueden emplear para una absorción eficiente de nutrientes (N, P) y la eliminación de contaminantes tóxicos y metales pesados de aguas residuales" (Jiménez Barreto y Montalván Cobos, 2018). "Se ha demostrado que el *Ankistrodesmus* junto con *Scenedesmus* y *Chlorella* degradan los contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales de la industria del papel y de las fábricas de aceite" (Candela Orduz, 2016). "Del mismo modo, *Scenedesmus*sp, representó una mayor eficiencia de utilización del 98,2%, 97,1% y 95,2% para butirato, propionato y acetato, respectivamente, con una tasa de crecimiento de 0,53 g/día cuando se cultivó en aguas residuales de desacoplamiento de textiles" (Hernández Pérez y Labbé, 2014). "Las microalgas de agua dulce, incluidas *Cladophora Glomerata* y *Oedogonium Westii*, pueden eliminar metales pesados de las aguas residuales industriales y mostraron 80% de cadmio y 66% de acumulación de níquel, respectivamente" (Devia Torres, Cáceres Sepúlveda, Roa, Suárez Gelvez, y Urbina Suárez, 2017). "Además, *Botryococcus* rico en lípidos, eliminó 59,9% de nitrógeno, 36,8% de fosfato y 54,5% de carbono orgánico junto con la producción del 72,5% del contenido de petróleo crudo, cuando se cultivó en aguas residuales domésticas" (Barreiro Vescovo, 2019). Sin embargo, se requiere de la aplicación de estudios arduamente detallados sobre la aplicación de las microalgas y los beneficios que éstas aportan en sistemas de cultivo de aguas residuales. La tabla 1-2 muestra las diferentes especies de microalgas, sus aplicaciones y productividad de biomasa y contenido de metabolitos.

Tabla 1-2: Especies de microalgas, sus aplicaciones y valores de productividad

Microalgas	Aguas residuales	Estrés derivad de las aguas residuales	Eliminación de nutrientes			Productividad de biomasa (mg/Ld)	Metabolitos (%)		
			NT	FT	DQO		Lípidos	Proteína	Carbohidratos / otros
Desmodesmus sp.	Refinería de petróleo (Diluir)	Grasas ácidas, con alto contenido de DQO y fosfato	-	53	82	270	22	-	-
Tetraselmis suecica	Lechería	Alto contenido de nutrientes, pH variable	83	100	-	42,5	-	-	11,7 mg/L (Chl-a)

Tribonema menos	Suero de tofu	Alto contenido de nutrientes y DQO	92,8	72	86,7	431,6	37	15,5	31
C. vulgaris	Estiércol de cerdo	Alto contenido de sólidos y amonio	71	54	78,7	157	17,4	58,8	9.1
C. pyrenoidosa	Molino de aceite de oliva	Alto contenido de materia orgánica	-	97	96,2	1,25	23	11	75
Coelastrum sp.	Granja de ganado	Altos nutrientes	80	100	42	281	50,7	-	-
Scenedesmus sp.	Mercado de carne	N y P altos	90	85	-	98,5	23,2	41,2	-
Chlorella sp.	Procesamiento de soja (diluida)	Nitratos moderados	85	97	70,5	-	7.22 mg/Ld	-	2,86 mg/Ld
Ascochloris sp.	Lácteos crudos	N y P altos	80	97	96	94–98	33,4	-	-
Dunaliella tertiolecta	Lixiviados de alimentos diluidos	Altos nutrientes	> 80	80	-	200	37 (SFA)	-	-
Dunaliella salina	Municipal tratado terciario	Nitrato y P moderados	57,5	69	52	28.25	-	-	-
C. sorokiniana	Municipal e industrial diluido	Alto contenido de nitratos y fosfato	84,2	47	-	1524	62,4 mg / g (FAME)	388,2 mg / g	11,82 mg / g (clorofila)
C. vulgaris	Acuicultura y pulpa	Alto contenido de carbono y nutrientes	76,5	92,7	75,5	187	9.07	47,5	19.09
Chlorella sp. *(*ISTLA)	Planta de tratamiento doméstico	Altos nutrientes	82 (Zn), 80 (Mn), 56 (Cu)			50	43,8	-	-
Tetraselmis chuii	Acuicultura	Alos nutrientes	54	-	-	3,25x10 ^{5} células / ml	17,6	33	12
Parachlorella kessleri	Agro-residuos	Altos nutrientes	> 98	59	39	62	23,8 (FA)	-	-
Asterarcys quadricellulare	Planta de tratamiento de aguas residuales municipales	Nutrientes	48	50	-	65	21,9	-	5

Fuente: (Shahid, et al., 2020).
NT: nitrógeno total, FT: fósforo total, (Chl-a): concentración de clorofila A en aguas superficiales, SFA: ácidos grasos saturados, FAME: fracción de éster metílico de ácidos grasos, FA: ácido graso.

2.4 Sistemas de microalgas

El cultivo de microalgas al no requerir de agua dulce, tierra fértil, pesticidas o herbicidas, resulta ventajoso en comparación a otros cultivos. Una metodología fácil de

aplicar es utilizando las fuentes de aguas residuales, sin embargo, el cultivo de microalgas tiene sus limitaciones como la recolección de biomasa algal y el crecimiento de baja densidad (Mata, Martins, y Caetano, 2010). A lo largo del tiempo se ha venido desarrollando diferentes tecnologías para un mejor rendimiento y producción de microalgas en las aguas residuales, un sistema ideal debe tener la luz adecuada, bajo riesgo de contaminación y económico de construir (Fernández, Reis, Wijffels, y Barbosa, 2021).

2.4.1 Sistema de cultivo abierto

Este sistema de cultivo es uno de los más antiguos y económicos, su ventaja es que su construcción y sistema operativo son sencillos, y requiere de poca energía para su funcionamiento. Este sistema de cultivo se lo puedo operar mediante cuerpos de agua diseñados artificialmente, estanques y lagos naturales (Javed, et al., 2019). Para evitar la sedimentación de la masa se ha diseñado un estanque circular donde se incorpora en él un agitador giratorio que permite una mezcla adecuada, proporcionando la recirculación del cultivo con cantidades de CO_2 adecuada, siendo este el primer estanque artificial para este sistema de cultivo abierto, sin embargo, se necesita de áreas grandes para su construcción siendo esta una limitante en el sistema, dado que provoca una mayor resistencia al agua produciendo una tensión mecánica en el agitador. “Estudios del cultivo de *Chlorella pyrenoidosa* en un estanque de canalización abierta utilizando aguas residuales domésticas ha logrado la producción de biomasa de 1.71 g/L con reducciones de DQO (78%), nitrógeno total (95%) y fósforo total (81%)” (Kant Bhatia, et al., 2021, p. 5). Sin embargo, se presenta inconvenientes, ya que por ser un sistema abierto se ve afectado por la contaminación de protozoos, baterías, condiciones climáticas y microorganismos incorporados por aves.

2.4.2 Sistema de cultivo cerrado

Los sistemas de cultivo cerrados como los fotobiorreactores (PBR), son más eficientes para el cultivo de microalgas por su facilidad al manejar las condiciones (fototróficas, heterótrofas y mixotróficas) adecuadas y necesarias para una buena producción de biomasa (Cho, et al., 2013). Además, también se puede añadir una fuente externa de carbono para un mejor crecimiento de las algas. Cabe mencionar que en estos sistemas los riesgos de contaminación son menores y las vías metabólicas pueden ser ajustadas acorde al tipo de algas cultivada.

Los PBR cerrados existen algunas dificultades relacionadas con la bioincrustación y la limpieza e implican costos de capital muy altos en diseño y operación. Sin embargo, los PBR cerrados se pueden clasificar en diferentes tipos en función de su geometría, forma y materiales utilizados para la construcción, como columna de burbujas, placa plana, PBR de estructura blanda, tubulares e híbridos (Kant Bhatia, et al., 2021, p. 5).

Los sistemas PBR pueden ser de columna de burbujas y de transporte aéreo que son principalmente utilizadas en industrias grades, y los PBR tubulares horizontales que son los más comunes en el cultivo de microalgas por su gran productividad de biomasa. Sin embargo, su mayor limitante es el alto costo en la construcción y mantenimiento (Gupta, Pawar, y Pandey, 2019).

- *Fotobiorreactores*

Los fotobiorreactores, son sistemas cerrados que maximizan la producción de microalgas. En general estos son sistemas de operación controlados como: disponibilidad de nutrientes, pH, luz. Estas condiciones reducen al mínimo la posible contaminación y pérdida de CO_2 en el cultivo. Sin embargo, al estar cerrados, requieren sistemas de refrigeración e intercambio de gases, para evitar el sobrecalentamiento y concentraciones de oxígeno disuelto demasiado elevadas. Estas características se reflejan en elevados costos de construcción, operación y mantenimiento (Assunção y Malcata, 2020).

Según Zhan, Rong, y Wang, (2017), aseguran que el fotobiorreactor de placa, el fotobiorreactor tubular y el fotobiorreactor de columna vertical son los tres sistemas principales de cultivo con un fotobiorreactor cerrado y proponen que el fotobiorreactor tubular podría ser más adecuado para el cultivo a gran escala debido a su mayor relación superficie/volumen. Sin embargo, los costos de los sistemas cerrados son sustancialmente más altos que los de los sistemas de estanques abiertos.

- *Depurador de césped de algas*

El depurador de césped de algas (DCA) consiste en una comunidad de algas adherida, que se reproduce en una cuenca poco profunda, por medio de la cual bombea agua continuamente con el objetivo de que las algas crezcan eliminando los nutrientes del efluente y produzcan oxígeno para posteriormente regresar el agua a un cuerpo de agua.

En el sistema DCA, las algas tratan las aguas residuales tomando compuestos orgánicos e inorgánicos y liberando oxígeno a través de la fotosíntesis. Los nutrientes extraídos de las aguas residuales permanecen dentro de la biomasa de algas y se pueden recolectar fácilmente. El sistema de cultivo de DCA ofrece un rápido crecimiento de algas y una mayor eficiencia de eliminación de nutrientes y produce O_2 a un ritmo elevado (Kant Bhatia, et al., 2021, p. 7).

Este tipo de sistemas también se los puede emplear para la recuperación de los recursos partiendo de aguas residuales de granjas, acuicultura, arroyos y aguas residuales terciarias. Estudios han demostrado que la aplicación de este sistema en la remediación de aguas residuales con niveles altos de nitratos es de suma importancia, dado que ayuda a aumentar el crecimiento de biomasa realizando una recolección más frecuente (Peng, Fu, Chu, Wang, y Qi, 2020).

- *Sistema de cultivo híbrido*

Este sistema hace referencia a la combinación de dos o más sistemas de cultivo para la remediación de los recursos de las aguas residuales. Estos pueden ser sistemas pequeños y cerrados con gran facilidad de integrarse a estanques abiertos y a depuradores de césped de algas. Kant Bhatia et al. (2021) afirman: "que el sistema híbrido acoplado con fotobiorreactores tubulares de transporte aéreo que utilizan estanques de canalización en un proceso de dos etapas logra una mayor producción de biomasa y lípidos" (p.5). Este método nos ayuda a la disminución de los costos de producción por cada kilogramo de biomasa por su eficiencia en el cultivo de microalgas en las aguas residuales.

2.5 Vías de conversión de biomasa de microalgas en biocombustibles

2.5.1 Conversión bioquímica

En este proceso, la biomasa se transforma por acciones de agentes biológicos. Las transformaciones pueden ser: La fermentación (utilizada para la producción de combustibles) y la digestión anaeróbica (utilizada para la producción de biogás, una mezcla de principalmente metano, dióxido de carbono y otros gases en pequeñas cantidades) (Rúa Orozco, Escobar Palacio, Lora, Venturini, y Barros, 2015).

Según Javed et al. (2019) en el proceso de digestión anaeróbica, la materia orgánica se convierte en gas y contenido energético. El proceso de digestión anaeróbica (DA) es uno de los métodos más eficaces para una alimentación con mayor humedad y es el más adecuado para la biomasa húmeda de algas. Este proceso se divide en tres

etapas: hidrólisis, fermentación y metanogénesis. En lo eferente a la fermentación el almidón o la celulosa se convierten en alcoholes como el bioetanol en la fermentación. Sobre todo, la levadura se utiliza para convertir azúcares en etanol. La destilación es necesaria para la separación de productos y la purificación de alcoholes. Las microalgas como *Chlorella vulgaris* son las especies más comunes para producir etanol debido a su alto contenido de almidón.

2.5.2 Conversión química

En la conversión química se encuentra el proceso de transesterificación, un grupo alcoxi de un éster se sustituye por alcohol. La reacción es de naturaleza reversible en la que los triglicéridos y el metanol reaccionan en presencia de un catalizador para producir biodiésel (Javed, et al., 2019). La transesterificación es catalizada convencionalmente por catalizadores químicos, como el ácido, álcali, catalizador sólido y enzimas lipasa como biocatalizadores (Tran, Yeh, Chen, y Chang, 2012).

2.5.3 Conversión termoquímica

En este proceso, la biomasa se descompone térmicamente para producir productos combustibles. Las transformaciones incluyen: combustión, gasificación, licuefacción y pirólisis principalmente. La pirólisis utiliza la biomasa de algas para producir diversos productos, como biocarbón, bioaceite y gas de síntesis en ausencia de aire a 350–700 °C. La pirólisis instantánea que se produce a 500 ° C, es una de las técnicas más importantes para la futura sustitución del petróleo por biocombustibles líquidos. Ya que puede lograr una alta proporción de biomasa a líquido de casi el 95,5% (Javed, et al., 2019).

En el proceso de licuefacción, la biomasa de algas húmedas se utiliza para producir combustible líquido. Generalmente, este proceso produce aceites de alta viscosidad y requiere biomasa, solventes y gases como H_2 o CO además de catalizadores. Por otro lado, en el proceso de gasificación, los hidrocarburos se convierten con un suministro limitado de oxígeno para producir una mezcla gaseosa combustible (gas de síntesis. Puede quemarse directamente o usarse como combustible para motores de gas. Se han reportado varios estudios para convertir biomasa de microalgas en biocombustible mediante gasificación. En todos los procesos termoquímicos, la combustión es una de las formas más fáciles de producir energía. El combustible se quema, típicamente, en un exceso de aire en el que el combustible reacciona en presencia de aire conocido como ardor. Los productos principales son CO_2, H_2O y liberación de calor. La combustión

suele producirse a temperaturas superiores a 800 °C. Suele ocurrir en la caldera, hornos donde se genera vapor para producir electricidad (Javed, et al., 2019).

2.6 Principales biocombustibles que pueden obtenerse de microalgas

Los biocombustibles son alternativas para reemplazar las crecientes demandas de combustibles fósiles (Vuppaladadiyam, Prinsen, Raheem, Luque, y Zhao, 2018). Se pueden producir mediante la utilización de diferentes tipos de materia prima, como cultivos alimentarios, biomasa lignocelulósica y biomasa de organismos fotosintéticos. En el caso de especies u organismos fotosintéticos como plantas, macroalgas, microalgas y cianobacterias se emplean como materia prima para producir biocombustible (Bhagea, Bhoyroo, y Puchooa, 2019); (Peng, et al., 2020). Las microalgas se consideran como sustratos adecuados para producir biocombustible debido a la presencia de gran cantidad de lípidos y carbohidratos en la biomasa. Las microalgas pueden producir una amplia categoría de biocombustible, como el biodiésel a partir de lípidos, y los carbohidratos se utilizan para la producción de bioetanol, bio-butanol, biogás y biohidrógeno (da Silva, Gouveia, y Reis, 2014).

Según Goswami, et al., (2021), los principales beneficios del empleo de ellas como materia prima para la producción de biocombustibles son que: (i) no requiere tierra arable para el cultivo masivo, (ii) tiene una alta actividad de fotosíntesis y una alta tasa de productividad de la biomasa en comparación con otros organismos, y (iii) no compite con los cultivos alimentarios y, por lo tanto, también reduce el problema de la futura crisis alimentaria, (iv) no requiere nutrientes adicionales, (v) fija el dióxido de carbono atmosférico para la producción de biomasa.

2.6.1 Bioetanol

El bioetanol se produce mediante la fermentación de sustratos de carbohidratos. En el caso de las células de microalgas estas contienen biomasa rica en carbohidratos (glucosa, almidón y celulosa). La presencia de carbohidratos altos (más del 50%) lo convierte en una materia prima valiosa para producir bioetanol (Singh y Olsen, 2011). Entre las ventajas de la biomasa de microalgas es que no contiene lignina en su pared celular y, por lo tanto, no se requiere un pretratamiento avanzado en el proceso (Simas-Rodrigues, et al., 2015). Requiere de la extracción de los carbohidratos de la biomasa de microalgas en azúcar fermentable simple para ello se pueden emplear diferentes métodos (químicos, físicos y biológicos) y los azúcares fermentables se convierten en bioetanol

mediante fermentación microbiana a través de *Saccharomyces cerevisiae* (Bhattacharya y Goswami, 2020).

2.6.2 Biobutanol

El biobutanol es un biocombustible que contiene cuatro carbonos y se produce mediante la fermentación de la biomasa (glucosa, glicerol). En el caso de las microalgas puede obtenerse luego de la extracción de aceite de la biomasa de microalgas. La producción de biobutanol es un proceso de fermentación de dos etapas que se logra mediante el uso de *Clostridia.sp*. La primera etapa es la acidogénesis, donde los carbohidratos que contienen biomasa de microalgas se convierten en ácidos orgánicos simples como el ácido acético o el ácido butírico. Mientras la segunda etapa es la fase solventogénica, donde el ácido orgánico se convierte en biobutanol (Goswami, et al., 2021).

2.6.3 Biodiesel

El biodiesel es una importante fuente de bioenergía que se utiliza principalmente en el sector del transporte. Tradicionalmente, el biodiesel es producido por microorganismos lípidos, grasas animales y vegetales a través del proceso de transesterificación (Singh y Olsen, 2011). La reacción de transesterificación se logra mediante la adición de alcohol (metanol) con lípidos y el proceso es catalizado por ácido, alcalino o solvente y enzimas (Rangel-Basto, et al, 2018).

2.6.4 Biogás

Compuesto principalmente por CH_4 y CO_2 y pequeñas cantidades de H_2S, se obtiene mediante el proceso digestión anaeróbica de biomasa. En el caso de las algas, almacenan cantidades de lípidos, proteínas, carbohidratos y otros compuestos procedentes de la actividad fotosintética y de la conversión los nutrientes disponibles en las aguas y CO_2 en presencia de luz. La digestión anaeróbica es un proceso complejo que involucra varios pasos como la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis llevada a cabo por diferentes grupos de microorganismos (Bhatia, et al, 2021).

2.6.5 Biohidrógeno

El biohidrógeno es considerado como un biocombustible renovable natural, limpio y ecológico. En el caso de las microalgas es producido naturalmente por microalgas verdes mediante fotólisis directa e indirecta. Además, también puede producirse mediante procesos de fermentación oscura y de foto fermentación (Show, et al, 2018).

2.6.6 Gas de síntesis/Electricidad

El gas de síntesis es una mezcla de gases producida por proceso de combustión termoquímica; por combustión directa, gasificación supercrítica y gasificación hidrotermal o por pirólisis de biomasa de microalgas. El gas de síntesis es una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano (Mathimani, et al, 2019).

2.6.7 Biochar

Se obtiene mediante el proceso de conversión de biomasa húmeda en presencia de oxígeno y temperatura moderados mediante licuefacción hidrotermal o calentamiento asistido por microondas. Sus principales usos son almacenamiento de carbono y biofertilizantes, los biocarbones obtenidos mediante pirólisis pueden emplearse para generar electricidad. Además, estos biocarbones contienen una gran cantidad de grupos funcionales, que pueden utilizarse para la eliminación de varios tipos de contaminantes, y compuestos tóxicos de las aguas residuales y del suelo (Jaiswal K. , et al, 2020).

3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de Investigación

El presente proyecto se realizó de forma exploratoria cualitativa documental. En este caso, la investigación se llevó a cabo de manera descriptiva según la revisión de las variables que intervienen en los procesos de tratamientos de aguas residuales domésticas con sistemas de microalgas. Además, se buscaron estudios de investigación aplicada de procesos de conversión de bioenergía a base de microalgas. Mientras que, el análisis de estos resultados permitió organizar información sobre tratamientos de aguas residuales domésticas a base de microalgas y producción de bioenergía a partir de los nutrientes presentes, a la vez que se generó nuevos conocimientos a partir de la búsqueda bibliográfica.

3.2 Métodos de Investigación

El principal método empleado en la investigación sistemática se basó en recopilar información empírica mediante varias herramientas bibliométricas. Este método permite ajustar los criterios de elegibilidad, realizar una búsqueda bibliográfica de los diferentes artículos sobre las microalgas y obtener información sobre los procesos de conversión de bioenergía, identificar criterios de las diferentes rutas de obtención de bioenergía de sistemas de microalgas alimentados por las cargas de nutrientes de las aguas residuales domésticas aplicados al contexto de los países en desarrollo. Se elaboraron registros de selección y exclusión de artículos, esto permitió validar los datos incluidos para el estudio y minimizar los sesgos, desarrollar una presentación sistemática que proporcione confiabilidad, entendimiento y una explicación concreta que pueda ser útil para la toma de decisiones.

Este tipo de estudio permitió comprender el estado del arte de la obtención de bioenergía de sistemas de microalgas alimentados por las cargas de nutrientes de las aguas residuales domésticas e identificar los vacíos en la literatura científica, por lo que la investigación planteada, tiene un potencial significativo para contribuir en el campo y permite analizar el comportamiento bibliográfico.

Como revisión sistemática de la literatura se puede considerar como “un medio para evaluar e interpretar toda la investigación disponible relevante para una pregunta de investigación particular o área temática o fenómeno de interés" según plantean (Kitchenham, Dybå, y Jørgensen, 2004).

Mientras, Brereton, Kitchenham, Budgen, Turner, y Khalil (2007), menciona que los trabajos de investigación resumidos en la revisión se denominan estudios primarios, mientras que la revisión en sí es estudios secundarios. La acumulación de evidencia a través de estudios secundarios puede ser muy valiosa para ofrecer nuevas ideas o para identificar dónde se podría aclarar un problema mediante estudios primarios adicionales. Para realizar la revisión sistemática de la literatura se siguió algunos pasos que se ilustran en la figura 1-3.

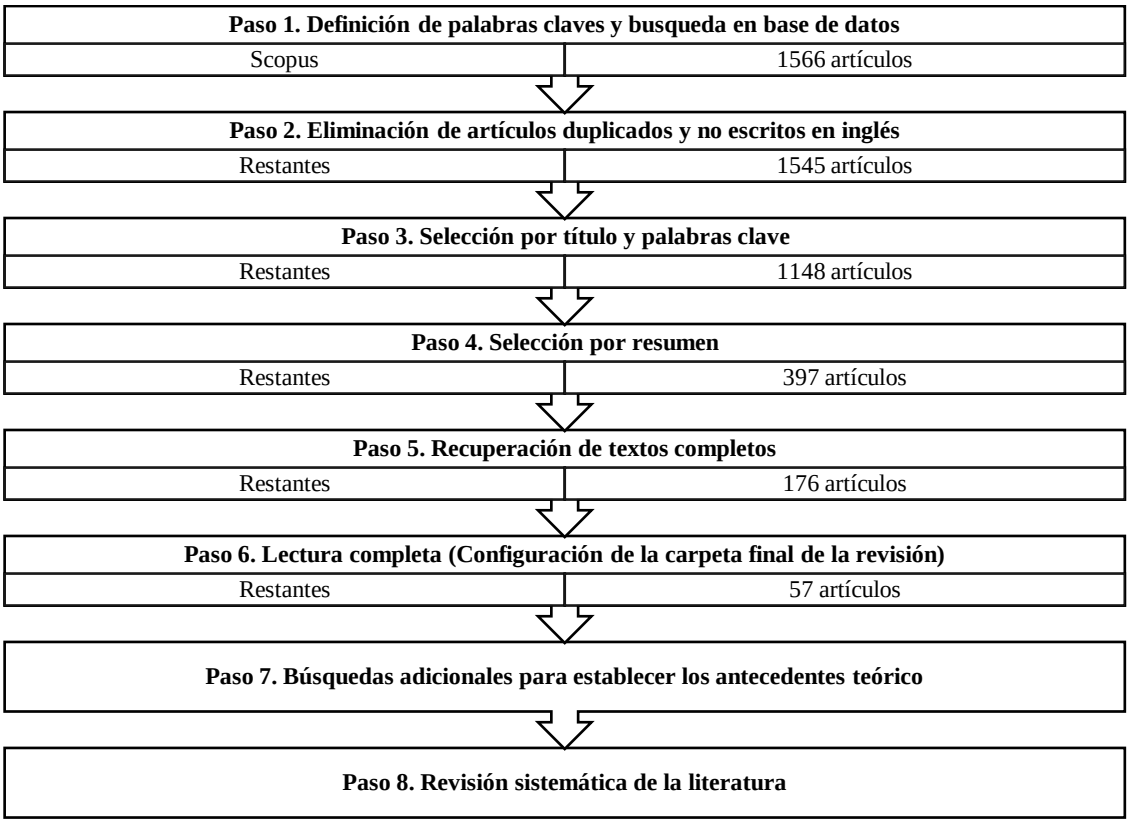


Figura 1-3. Pasos para la revisión de la literatura y definición de los antecedentes teóricos abordados en la literatura científica a consultar
Fuente: Adaptada de Salvador *et al.* (2021).

A continuación, se describen cada uno de los siguientes pasos o etapas.

Definición de palabras clave y búsquedas en bases de datos (Scopus): Para esta etapa se emplearon los siguientes términos de referencia en las búsquedas: "(*"microalgae∗ " OR "micro algae") AND ("domestic wastewater ∗ "OR"urban wastewater ∗ "OR" urban waste water ∗ ")) OR ("domestic waste water ∗ " AND ("bio energy ∗ "OR" bioenergy ∗ "OR" biofuel ∗ "OR" bio fuel ∗ "))* ". Las búsquedas se realizaron durante el mes de marzo de 2021. Se recuperaron todos los tipos de documentos (incluidos, por ejemplo, artículos de revistas, libros, capítulos de libros,

publicaciones seriadas y actas de congresos) y no se restringió el período de publicación ni el idioma, por lo que el número de documentos puede ser bien extenso.

Eliminación de artículos duplicados y no escritos en inglés: Se excluyeron todos los documentos duplicados, así como los documentos escritos en idiomas distintos al inglés y español.

Selección por título y palabras clave: Todos los documentos se examinaron por sus títulos y palabras clave y para ayudar a seleccionarlos o descartarlos se empleó la pregunta: "¿el título y las palabras clave de la publicación se refieren o se parecen, o están relacionados con aspectos de sistemas de microalgas alimentados de fuentes de aguas residuales domésticas para obtener bioenergía?"

Selección por resumen: Todos los documentos fueron revisados por sus resúmenes y la pregunta que ayudó a seleccionarlos o descartarlos fue: "¿el resumen de la publicación se refiere o se parece o está relacionado con aspectos de procesos de microalgas para producir bioenergía?".

Recuperación de textos completos: Se realizaron búsquedas en todos los textos completos de los documentos restantes. Los autores intentaron recuperar los textos completos a través de una variedad de medios, incluido el acceso a fuentes académicas por las bibliotecas de la universidad, y el FECYT, así como mediante la búsqueda del título del documento en el motor de búsqueda abierto. GoogleScholar y en la plataforma ResearchGate. Se descartaron los títulos que no se pudieron recuperar a texto completo.

Lectura completa: En este paso, se dio lectura todos los textos completos y se evaluó su adecuación a la investigación. Una pregunta orientadora para mantener el artículo en la carpeta final fue "¿Contribuye la investigación a analizar los procesos de conversión de bioenergía de los sistemas de microalgas de aguas residuales domésticas?" Durante la lectura completa de todos los documentos, los autores utilizaron un formulario de lectura para recopilar la información que fue de gran utilidad en el análisis sistemático. Después de leer todos los documentos, se descartaron los no pertinentes y quedaron los que conformaron el portafolio/carpeta final que se empleó para este trabajo.

Se utilizaron los pasos del 1 (Definición de palabras clave y búsquedas en bases de datos), al 6 (Lectura completa), para crear el portafolio/carpeta final para la revisión de la literatura. Los documentos que componen el portafolio/carpeta final se expusieron en los Anexos del proyecto.

Búsquedas adicionales para establecer los antecedentes teóricos: Se realizaron búsquedas adicionales con el fin de recuperar documentos de otras fuentes (revisadas por pares o no) para ayudar a establecer los antecedentes teóricos del presente proyecto. Se realizaron búsquedas no sistemáticas (en bases de datos, plataformas y sitios web académicos y no académicos).

Revisión sistemática de la literatura: Durante la lectura completa de los documentos, como se mencionó en el Paso 6 (Lectura completa), se llenó un formulario de lectura, en el cual se anotaron diversas piezas de información que ayudaron a recopilar información útil para cada tema. El formulario de lectura constó principalmente de la siguiente información: principales conclusiones y recomendaciones; y características de los de los sistemas de microalgas de aguas residuales domésticas y procesos de conversión de bioenergía. Luego, los aspectos clave que fueron identificados en la literatura existente se analizaron cada uno de los componentes básicos para conocer cuales tienen mayor presencia.

En todos se mencionaron otros aspectos secundarios que potencialmente influyeron en el análisis. En la revisión de la literatura existente, se identificaron los aspectos claves de los sistemas de cultivo, métodos de recolección de biomasa algal, técnicas de secado y de extracción de lípidos. Además, se integraron los estudios de los diferentes sistemas de microalgas de ARU con los procesos de conversión de bioenergía clasificados según tres rutas principales: termoquímica, química y bioquímica. Por último, se señalaron aspectos claves desde una valoración técnica, ambiental y económica, donde se expusieron las potencialidades de los procesos de tratamiento basados en microalgas para la implementación en los países en desarrollo, y poder generar nuevos conocimientos que no están presentes en la literatura existente.

4 CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de la información relevante sobre la aplicación de microalgas en el tratamiento de aguas residual domésticas.

La búsqueda avanzada en Scopus con los términos “TITLE-ABS-KEY (microalgae OR "micro algae"), ("domestic wastewater" OR "domestic sewage"), (bioenergy, OR biofuel)” se realizó con fecha 18/03/2021 y arrojó 1,566 documentos. La figura 2-4 muestra el número anual de artículos relacionados con la investigación según los términos de búsqueda empleados. Como se puede apreciar el primer documento publicado data del año 1988. No aparecen nuevos registros hasta el año 2006 que también existe una publicación e igual cantidad en los años 2009 y 2010. A partir del año 2011 comienzan a incrementarse los documentos de la temática, siendo el 2020 donde se registra la mayor cantidad de publicaciones (293 documentos, 18.71% del total). Esta figura nos evidencia también como desde el año 2016 al 2020 existen un total de 1088 publicaciones relativamente relacionadas a nuestro tema de estudio. Cabe recalcar que en el presente año 2021 hasta el mes de marzo que es el tiempo en que se realizó la búsqueda ya existen 116 publicaciones, podemos decir con seguridad que en este año se dispararan las publicaciones respecto al tema de investigación, siendo que es un tema innovador y prometedor que mediante su aplicabilidad busca un desarrollo sostenible.

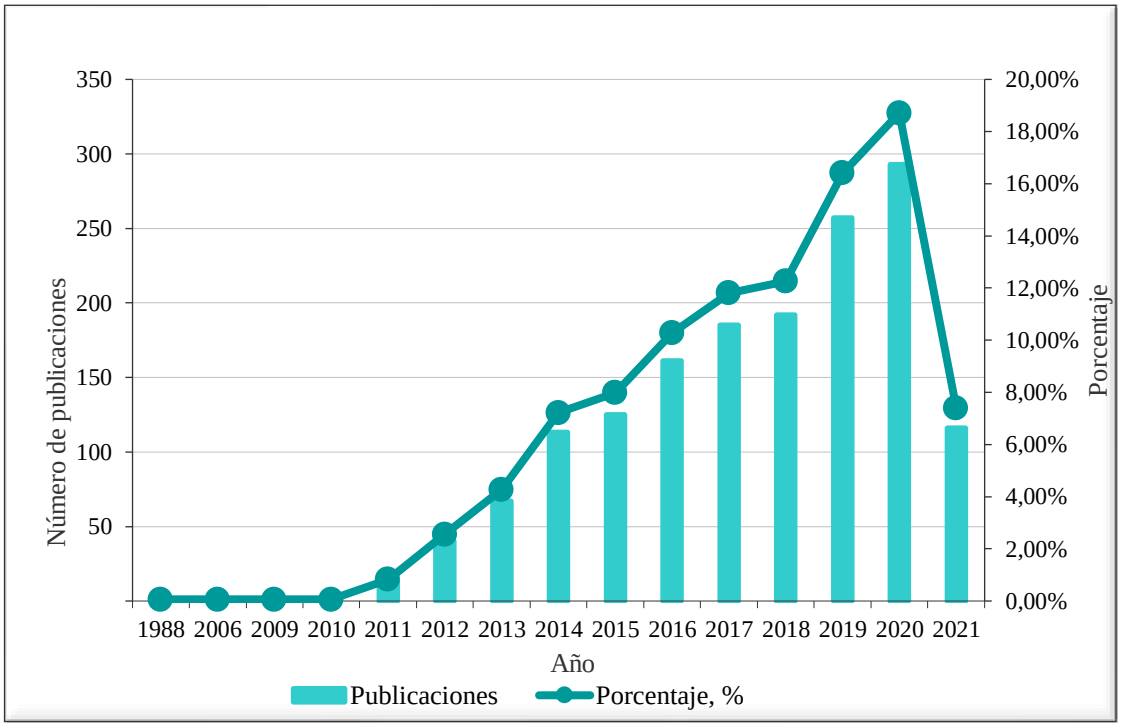


Figura 2-4. Número de artículos anuales relacionados con la investigación
Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento

En cuanto a las principales áreas temáticas generales donde se agrupan las publicaciones de la investigación, la figura 3-4 muestra el número de artículos por las principales temáticas donde se desarrollaron las diferentes investigaciones. Como se puede apreciar sobresalen las Ciencias ambientales con 901 documentos, seguida de 526 publicaciones con la temática Energía, 469 de Ingeniería Química, 285 para Agricultura y ciencias biológicas, 272 para Ingeniería, 260 publicaciones para las temáticas de Bioquímica, genética y biología molecular, 150 de Química, 148 para Inmunología y microbiología, y finalmente con 40 publicaciones para el área de ciencias de los materiales. Como la figura 3-4 nos muestra el tema de microalgas y su utilización para el tratamiento de aguas residuales y bioproductos que se pueden obtener de su biomasa es de interés de toda la comunidad científica. Confirmando así que este tema es ampliamente desarrollado a varias escalas con directrices un poco diferentes, pero todas bajo un mismo enfoque, que es la investigación de un tema potencial en beneficio de la sociedad y el ambiente. También podemos destacar que esto proporciona evidencia adicional de la creciente importancia de las microalgas para la conversión de bioenergía dentro de las Ciencias ambientales y la literatura científica.

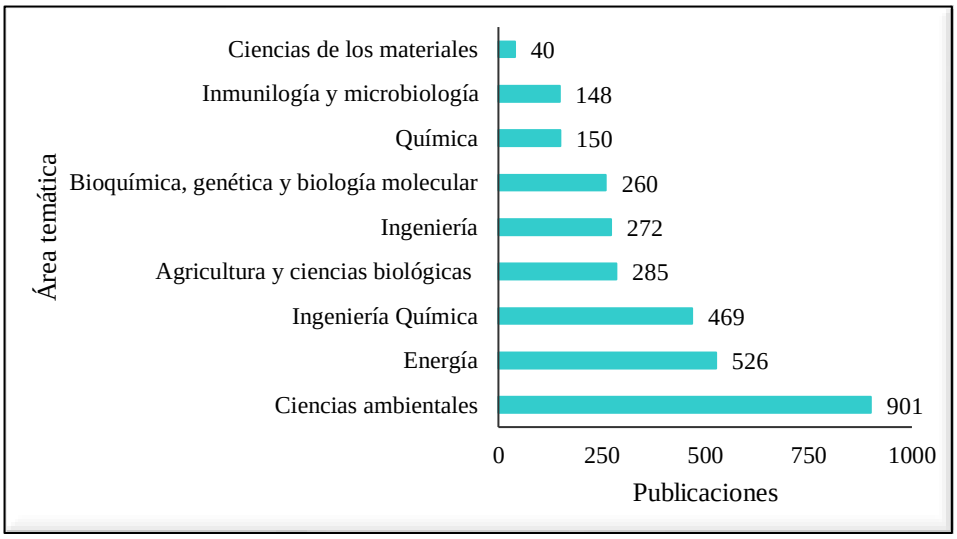


Figura 3-4. Número de artículos por áreas temáticas de la investigación
Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento

Por su parte, la figura 4-4 muestra el análisis de los tipos de publicaciones, la mayoría de los documentos son artículos de investigación (1130 de los 1566 documentos), seguidamente los artículos de revisión (263), capítulos de libros y conferencias con 117 y 53 documentos, respectivamente. En esta parte del proceso de selección se excluyeron tres documentos, las letras al editor, notas y encuestas breve cada uno de ellos con un documento.

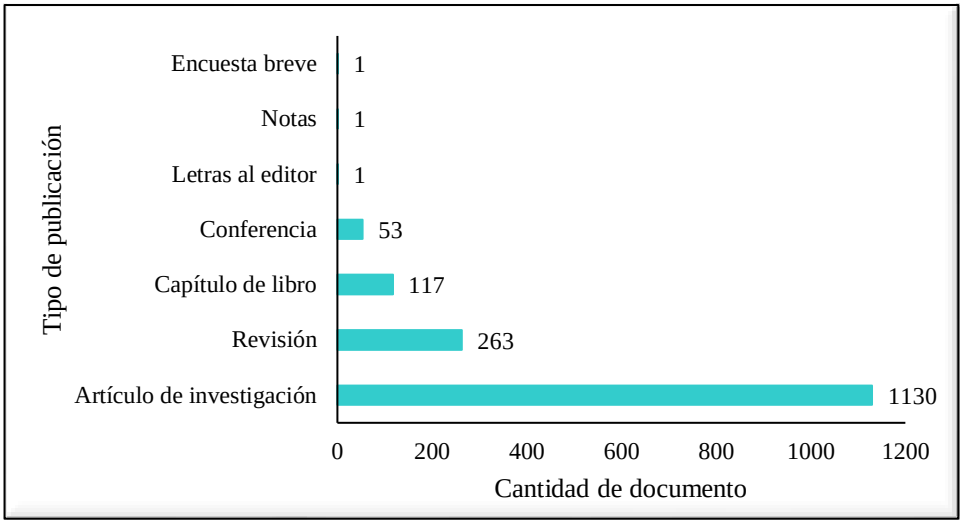


Figura 4-4. Número de artículos por tipo de publicación
Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento

La figura 5-4 muestra la distribución de artículos por idiomas, como se puede apreciar el 98.5% (1543 de los 1566 totales) se encuentran en inglés, que es el idioma más empleado en la literatura científica, seguido por el chino mandarín y el español con 11 y 5 documentos respectivamente. También aparecen publicaciones en portugués, coreano, persa y turco. En esta etapa se excluyeron 18 documentos correspondientes de los idiomas diferentes al inglés y español, por lo que restaron 1545 documentos a analizar en la etapa posterior.

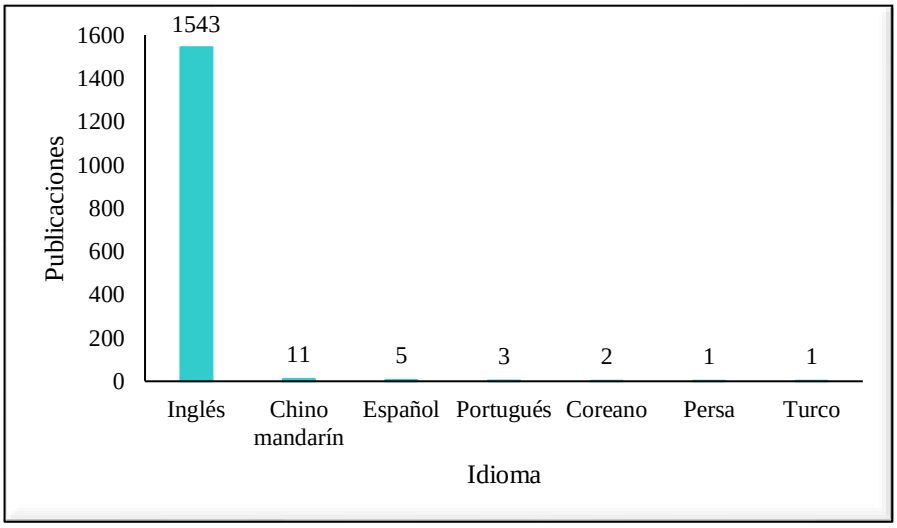


Figura 5-4. Distribución de artículos por idiomas
Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento

El análisis de los autores y origen de las investigaciones agrupados por continentes o áreas geográficas muestra que la investigación publicada se concentra principalmente en Asía y Europa (Ver Figura 6-4), lo que denota que en estas regiones

se han concentrado los mayores esfuerzos por la investigación de bioenergía a partir de microalgas.

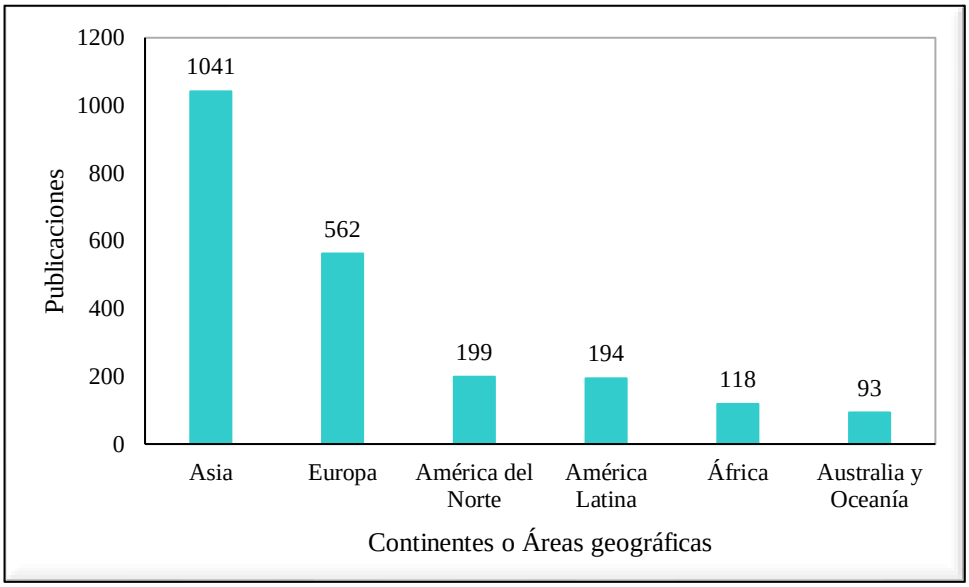


Figura 6-4. Agrupación de artículos por continentes o áreas geográficas
Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento

Por su parte la figura 7-4 presenta los países con el mayor número de publicaciones (países con al menos 50 investigaciones del tema), sobresaliendo China y la India con 308 y 241, respectivamente. Estos dos países son los más poblados a nivel mundial y son consideradas dos economías emergentes que demandan cantidades elevadas de energía, por lo que en los últimos años han centrado esfuerzos en la investigación en fuentes energéticas alternativas. Otros países destacados son Estados Unidos, España y Brasil que registran 156, 148 y 115 publicaciones, respectivamente. La tabla 1-6 de los apéndices muestra la lista completa de publicaciones por países y continentes o áreas geográficas.

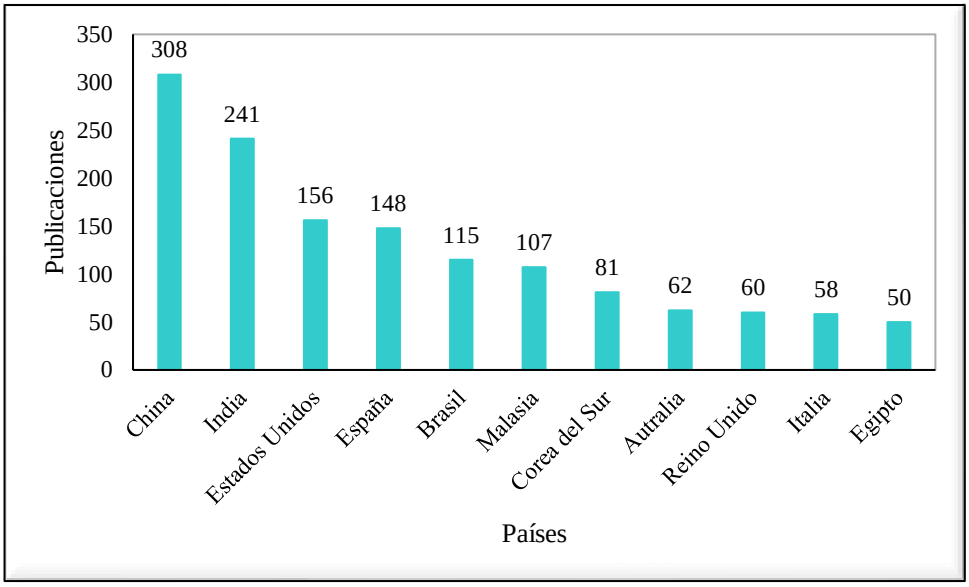


Figura 7-4. Número de artículos por países con al menos 50 investigaciones del tema
Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento

En el análisis de análisis de contenido y términos de lectura de títulos y palabras claves restaron 397 documentos y se excluyeron 1148 documentos. En esta fase solo se agrupó la información más relevante y que incluyera todos los términos de búsqueda seleccionados. Las temáticas más frecuentes de exclusión identificadas fueron:

- Tratamiento de aguas residuales de industrias (caña de azúcar, porcícolas, lácteas, hidropónicas, textil, etc), el objetivo es aguas residuales de origen doméstico.
- Uso de microalgas con fines de remediación ambiental (eliminación de metales pesados, nitrógeno/fósforo, fármacos, y contaminantes emergentes, entre otros) que se van del alcance de esta revisión
- Producción de biopolímeros, bio-coagulante, bio-plásticos y otras posibles aplicaciones de remediación ambiental, que son excluidos porque no guardan total pertinencia con el tema.
- Simbiosis microalgas-bacterias y eficiencias de eliminación de contaminantes, el enfoque está orientado a la producción de bioenergía/biocombustibles con la biomasa microalgal y aunque los diferentes mecanismos del sistema simbiótico algas-bacterias son importantes incluir la temática haría la revisión muy extensa al existir una amplia cantidad de documentos.

4.2 Revisión de los diferentes sistemas de microalgas de aguas residuales domésticas y los procesos de conversión de bioenergía.

El cultivo de microalgas se puede desarrollar a través de sistemas abiertos, cerrados e híbridos. Los estanques de canalización abierta es el sistema favorito para el tratamiento simultaneo de aguas residuales y el cultivo de microalgas (Pawar, 2016). En los estanques de canalización abiertos generalmente se instala ruedas de paletas con la finalidad de homogeneizar el cultivo. La profundidad del cultivo se mantiene en un rango de 0.2-0.4 m para garantizar la penetración de la luz (Li, et al., 2019). Xiaogang et al. (2020) los sistemas abiertos se encuentran expuestos a factores ambientales no controlables influyendo negativamente en la productividad de biomasa. En la tabla 2-4 se enlista algunos estudios de cultivo de microalgas en sistemas abiertos.

Tabla 2-4: Tabla comparativa de los sistemas de cultivo abierto y producción de biomasa

Equipo	Especie de microalgas	Contaminantes presentes	Parámetros de cultivo	Eliminación de contaminantes	Producción de biomasa	Referencia
Estanque	*Desmodesmo spp. y Scenedesmus spp.*	TN: 42.7 mg/L TP: 5.8 mg/L	Luz: 307-540 µmol/m^2/s T: 7-25°C t: 4-7 días	TN: 0.72 mg/L TP: 0.03 mg/L	8.5-14 g/m^2/d	(Sasongko, et al., 2018)
Estanque de canalización abierto	*Chorella vulgaris*	DQO: 422.9 ±136.7 mgO_2/L N-NH_4: 34.21 ±7.8 mg/L	pH: 8 T: 18-24 °C Irradiación solar: 1000-1200 W/ m^2/	DQO: 65% N-NH_4: 61%	8.5 g/m^2/d	(Vassallea, et al., 2020)
Estanque de canalización abierto	*Synecnocystis sp.*	DQO: 280 mg/L COT: 113 TN: 21.50 mg/L TSS: 405 mg/L DBO: 153 mg/L	T: 25°C pH:7.4	-	0.21 g/L/d	(Ashokkumar, Chen, Ngamcharussrivichai, Agila, & Ani, 2019)
Estanque de canalización abierto	*Chlorella pyrenoidosa*	DQO: 426mg/L NH_4-N: 46.2 mg/L TP: 3.22 mg/L NO_3-N: 1.156 mg/L	T: 18-31°C	DQO: 90 mg/L NH_4-N: 2.1 mg/L TP: 0.596 mg/L NO_3-N: 16.9 mg/L	1.71 g/L	(Dahmani, Zerrouki, Ramanna, Rawat, & Bux, 2016)
Reactor biológico giratorio	Cultura mixta		TRH: 2 días TRS: 12-20 días	-	31 g/m^2/día	(Hoh, et al., 2016)

Reactor de biopelícula vertical	*Halochlorella rubescens*		-	-	6.3 g/m^2/d	(Hoh, et al., 2016)
Reactor de biopelícula	*Chlorella pyrenoidosa y Phormidium*	DQO: 153.66 mg/L NAT: 27.33 mg/L NO_3: 11.16 mg/L TDP: 21 mg/L	T: 4-25°C Luz: 617.78±10 µmol/m^2/s	DQO: 53±2% NAT: 81±3% NO_3: 87±5% TDP: 75±2%	3.48±0.44 g/m^2/d	(Naaza, Bhattacharya, Pant, & Malik, 2019)

Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento
COT: carbono orgánico total; DQO: demanda química de oxígeno; NAT: nitrógeno amoniacal total; N-NH_4: Amonio; NO_3-N: nitrato; T: temperatura; t: tiempo; TDP: fósforo disuelto total; TN: nitrógeno total; TP: fósforo total; TRH: tiempo de retención hidráulica; TRS: tiempo de retención de sólidos; TSS: sólidos suspendidos totales.

Los fotobiorreactores tubulares son las configuraciones que son comúnmente aplicadas a escala industrial. Los sistemas cerrados se cultivan en fotobiorreactores. Existe una variedad de diseños, como fotobiorreactores tubulares, fotobiorreactor de panel plano y fotobiorreactores de columna. Los fotobiorreactores permiten controlar los parámetros de cultivo en consecuencia se consigue una mayor productividad de biomasa en comparación con los sistemas abiertos. El diámetro del tubo entre 0.5-0.9 m y la longitud del tubo varía entre 100-150 m (Li, et al., 2019). El fotobiorreactor de placa plana se puede colocar de forma horizontal o vertical en el suelo, este fotobiorreactor permite tener una alta superficie de iluminación por ende una mayor eficiencia fotosintética y una menor acumulación de oxígeno disuelto a diferencia de los fotobiorreactores tubulares (Aliyu, Lee, y Harvey, 2021).

Con la finalidad de buscar un sistema de cultivo eficiente y de bajo costo, la búsqueda de este sistema está en constante investigaciones y de ahí nacen los sistemas híbridos. El reactor de biopelícula de algas rotativas consta de cilindros que sirven como superficie de crecimiento para microalgas. La comparación de las diferentes productividades de biomasa en el sistema de cultivo cerrado se menciona en la tabla 3-4.

Tabla 3-4: Tabla comparativa de los sistemas de cultivo cerrado y producción de biomasa

Equipo	Especie de microalga	Contaminantes presentes	Condiciones de cultivo	Eliminación de contaminantes	Producción de biomasa	Referencia
Fotobiorreactor	*Chlorella vulgaris, C hlorella sorokiniana*	NH_4:37.8 mg/L NO_3: 24.7 mg/L NO_2: 12.1 mg/L	pH: 9.6 ± 0.4 ORP: 124± 43 mV	NH_4: - NO_3: 12.5 mg/L NO_2: 9.5 mg/L	0.57 g/L/d	(Khalekuzzaman , Alamgir, Islam, &

	y *Scenedesmus simris*	PO_4: 29.3 mg/L	CE: 1702 ± 86 µS/cm Luz (am): 110 ± 31 µmol/m^2/s Luz (Md): 644 ± 485 µmol/m2/s Luz (pm): 38 ± 63 µmol/m^2/s T (am): 35 ± 2 °C T (Md): 39 ± 4 °C T (pm): 38 ± 5 °C t: 8 días	PO_4: 0.7 mg/L		Hasan, 2019)
Fotobiorreactor de transporte aéreo de bucle híbrido	*Scenedesmus abundans*	DQO: 82.42 mg/L DIN: 310.87 mg/L DIP: 42.19 mg/L	T: 28 ± 2 °C Iluminación fluorescente continua: 4000 lux t: 16 días	DQO:80.19% DIN: 90.73% DIP: 86.31%	209 mg/L/día	(Sundar, et al., 2020)
Fotobiorreactor vertical de placa plana	*Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus*	TN: 12.25 mg/L TP: 1.8 mg/L TIC: 32.35 mg/L	T: 25 ± 2 °C Luz: iluminación continua con luz fluorescente roja t: 10 días	TN: 1 mg/L TP: 0.05 mg/L TIC: 8.65 mg/L	0,57 g/L/día 0,49 g/L/día	(Yang, et al., 2016)
Fotobiorreactor plato plano	*Nannochloropsis sp.*	-	-	-	0,27 g/L/d	(Baral , et al., 2020)
Fotobiorreactor tubular	*Spirulina platensis*	-	-	-	0,42 g/L/día	(Baral , et al., 2020)
Fotobiorreactor de membrana	*Chlorella vulgaris*	TN: 14.12 mg/L TP: 0.78 mg/L	Luz: 120,8 µmol/m^2/s T: 25-30 °C pH: 6.5-7.8	TN: 87.7% TP: 76.7%	50,7 mg/L/d	(Li, et al., 2019)

Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento

µS: microsiemens; CE: conductividad eléctrica; DIN: nitrógeno inorgánico disuelto; DIP: fósforo inorgánico total; DQO: demanda química de oxígeno; NAT: nitrógeno amoniacal total; NH_4: Amonio; NO_2: dióxido de nitrógeno; NO_3: nitrato; ORP: potencial de oxidación-reducción; PO_4: fosfato; T: temperatura; t: tiempo; TDP: fósforo disuelto total; TIC: carbono inorgánico total; TN: nitrógeno total; TP: fósforo total; TRH: tiempo de retención hidráulica; TRS: tiempo de retención de sólidos; TSS: sólidos suspendidos totales.

El estudio realizado por Sasongko et al. (2018) fue desarrollado en la ciudad de Minami-soma, Japón durante un año. Se utilizó el cultivo de estanque abierto para microalgas nativas *Desmodesmo spp. y Scenedesmus spp.* en efluentes de agua residual municipal pretratadas, el efluente actuó como fuente de nutrientes para el desarrollo de las microalgas. Se alcanzó una productividad media de biomasa de 8.5 y 14 g/m^2/d, la productividad anual de biomasa alcanzaría 60.55 ha/año. La mayor productividad se

registró en la temporada de primavera y verano, por otro lado la menor productividad de biomasa se registró en la temporada de invierno. El contenido de lípidos fue de 10.0± 3,5% por peso seco. Por su parte, Vassallea et al. (2020) utilizó efluente secundario de aguas residuales municipales en un estanque de canalización abierta con especies de microalgas *Kirchneriella sp., Scenedesmmus sp., y Westella sp.* expuesto a condiciones ambientales del lugar. Este estudio se desarrolló en Belo Horizonte, Brasil por el periodo de un año a escala de demostración. La producción media anual de biomasa fue de 8,5 g/m^2/día. Los factores ambientales influyen directamente en el cultivo de microalgas.

Khalekuzzaman et al. (2019) trataron el efluente secundario de las aguas residuales domésticas utilizando un fotobiorreactor a escala de laboratorio. Se realizó un co-cultivo de *Chorella vulgaris, Chorella sorokiniana, y Scenedesmus simris002* por un tiempo de 8 días se obtuvo una productividad de biomasa de 57,31 g/L/d. Se registró hasta un 44.1% de contenido de lípidos de la biomasa. Sundar et al. (2019) utilizó el fotobiorreactor de trasporte aéreo de bucle híbrido para el cultivo de la microalga *Scenedesmus abundans*, a escala de laboratorio de igual manera el efluente eran aguas residuales domésticas pretaratadas, el período de cultivo fue de 16 días, se alcanzó una productividad de biomasa de 209 mg/L/d. Yang et al. (2016) desarrolló un cultivo en un fotobiorractor vertical de placa plana con agua residual municipal pretratada y especies *Scenedesmus obliquus y Chorella vulgaris* a pequeña escala donde se determinó la productividad de biomasa por especie de microalga para *Chorella vulgaris* una productividad de 0,57 g/L/día y para *Scenedesmus obliquus* 0,49 g/L/día de productividad de biomasa. En este estudio se empleó luz arificial de color roja, bajo el concepto de que mejora el crecimiento de microalgas.

El cultivo de microalgas basado en biopelículas ha ido ganando mayor atención (Kesaano y Sims, 2014). Hoh et al. (2016) comparó la productividad de biomasa a a partir de reactor de biopelícula y cultivos en suspensión a partir de aguas residuales municipales pretratadas a escala piloto, con un tiempo de retención hidráulica de 2 días y el tiempo de retención de sólidos de 12-20 días. La productividad de biomasa en el reactor de biopelícula fue de $31g/m^2$/d resultando ser superior al cultivo en suspensión con una productividad de 7.4 g/m^2/d. Se evidenció que los reactores de biopelícula tienen mejor rendimiento en la productividad de biomasa que los sistemas en suspensión (tanques y fotobiorreactores).

Para Hoh et al. (2016) y Harun et al. (2014) los sistemas abiertos consisten en una forma más sencilla y rentable para el cultivo de microalgas, sin embargo, existen desventajas que se contraponen a las ventajas, una de las principales limitaciones de los cultivos abiertos es la contaminación microbiana, reducción de agua por la evaporación, la transmisión de luz es limitada, en conclusión, no se pueden controlar los parámetros de cultivo, dando como resultado una baja productividad de biomasa. Los sistemas cerrados han sido diseñados con la finalidad de superar las limitaciones de los sistemas abiertos. En los sistemas cerrados se puede controlar las condiciones de cultivo, se puede utilizar luz natural como artificial, existe menor riesgo de contaminación del cultivo, por ende, genera mayor productividad de biomasa. A pesar de ello, también existen limitantes como el alto costo de construcción y operación, alto consumo de energía. En ambos tipos de sistemas existe ventajas y limitantes, por ello se realizan investigaciones constantes para poder crear un sistema que permita ser viable tanto en aspectos económicos, como de operación.

Por su parte, la figura 8-4 muestra una estructura de posibles combinaciones de operaciones unitarias. La concentración de microalgas del medio de cultivo puede seguir tres estrategias: i) recolección de la concentración deseada; ii) un paso secado de biomasa para prolongar la vida útil y hacer que el producto sea accesible para su procesamiento posterior (Molina Grima, Belarbi, Acién Fernández, Robles Medina, y Chisti, 2003); y iii) un paso de extracción de lípidos. Se debe tener en cuenta que mientras mejor sea el rendimiento en la extracción de lípidos, mejor será el rendimiento de biocombustible que se desea obtener.

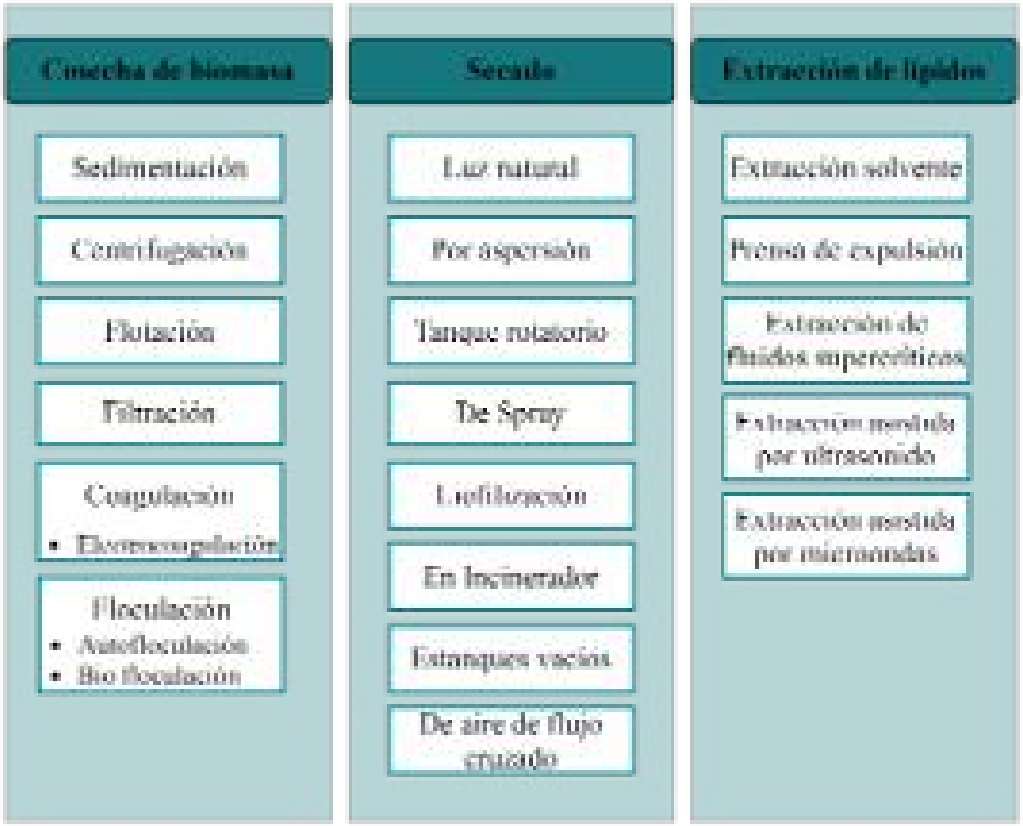


Figura 8-4. Procesos unitarios previos a la conversión de bioenergía
Fuente: Realizado por: Elsy Casco y Josselyn Contento

4.3 Métodos de recolección de biomasa algal

En la biorremediación de las aguas residuales domésticas la eliminación de las microalgas es uno de los procesos más críticos, especialmente si el agua residual tratada tendrá usos posteriores. A pesar de que existe múltiples métodos de recolección de biomasa, el método aplicado dependerá principalmente de la aplicación de la biomasa originada y del requerimiento energético por unidad de producción de biomasa.

- *Sedimentación*

Algunas células de microalgas se hallan afectadas por el valor del pH del medio y su tamaño celular, motivo por el cual, no pueden permanecer flotando en el medio. Por lo tanto, el actual proceso es ventajoso para separar la biomasa, siendo un proceso de recolección variable y económico para aplicarse a gran escala. Algunas microalgas no logran permanecer suspendidas en el medio de crecimiento en ausencia de mezcla, dado a que algunas de sus células no son lo suficientemente grandes (Tan, et al., 2018). En el cultivo de microalgas a medida que su densidad aumenta, el valor de pH también tiende a aumentar, lo que podría ocasionar una neutralización en la carga superficial de las especies. Habitualmente, la carga de la superficie celular de las microalgas es negativa,

lo que evita que estas células se adhieran entre sí. Dado que llegar a una precipitación natural del cultivo y a un aumento de pH puede llevar mucho tiempo, en algunos casos de añade una solución base (NaOH) con el propósito de acelerar la sedimentación. Además, el tiempo requerido para la sedimentación permite la muerte celular y proliferación de bacterias dañinas y otros microorganismos, que generan compuestos no deseados (sulfuro de hidrógeno) y degradan la biomasa de microalgas (Suparmaniam, et al., 2019).

- *Centrifugación*

Este método de recuperación de biomasa, la aceleración centrífuga hace que las células se muevan a través del líquido, lo que les permite asentarse en el fondo o en a los lados del recipiente (Menegazzo y Fonseca, 2019). La centrifugación a pesar de ser un método más costoso, también consume gran cantidad de energía, sin embargo, es una de las formas más rápidas de recolección de biomasa. Es una técnica práctica y común para recolectar y concentrar la biomasa algal y se puede utilizar directamente sobre la biomasa o después de un paso de floculación (Florian, Álvarez Díaz, Fon-Sing, Fleury, y Sassi, 2016). El proceso de centrifugación reemplaza la aceleración gravitacional por la fuerza centrífuga, que se aprovecha para desviar dos partículas. Es un método mecánico convencional, donde, las sustancias se separan en función de la variación de la densidad (Mathimani y Mallick, 2018). Este método se usa generalmente por si sola, o como un segundo proceso para lograr una mayor deshidratación. Algunos de los beneficios de este método de cosecha es el menor tiempo requerido para la recolección, la alta eficiencia en la eliminación de microalgas y una concentración mejorada de biomasa algal (Khademi, Yildiz, Yildiz, y Abachi, 2015).

- *Flotación de microalgas*

Para la recolección de microalgas por flotación, se realiza mediante la introducción de burbujas microscópicas desde el fondo del tanque, por consiguiente, las células de las microalgas se adhieren a la superficie de la burbuja desestabilizándolas, realizando una coagulación, posteriormente las células suben a la superficie y se concentran. El contacto entre las partículas y las burbujas depende del tamaño y de la inestabilidad de las partículas. En cuanto mayor sea la estabilidad, mayor también será el aire-contacto de las partículas, y mientras que, cuanto más pequeñas son las partículas, más fácil son levitadas por las burbujas. En algunos cultivos de microalgas a medida que

aumenta su contenido de lípidos, éstas son atraídas de manera natural a la superficie (Bharte y Desai, 2018).

- *Filtración*

La filtración es considera como uno de los mejores métodos para la recolección de biomasa. La filtración por membrana puede llegar a logar hasta un 100% de recuperación celular, a diferencia de otros modos de recolección. Además, este método podría aplicarse a gran parte de las cepas de microalgas, lo que brinda como resultado una suspensión de biomasa intacta (Al-Jabri, Das, Khan, Thaher, y Abdul Quadir, 2021). Casualmente, en gran parte del proceso de filtración, la membrana es una barrera porosa selectiva, cuando se alimenta la suspensión, la membrana lo separa en retenido (depositado en la membrana), y permeado (el flujo que pasa a través de la membrana). Para acelerar la suspensión a través de la membrana, se necesita de una caída de fuerza a través del sistema, que pueden ser temperatura, presión, concentración, etc. Para la adecuación del filtro poroso se debe tener en cuenta el tamaño, carga, forma, velocidad de mezcla, y viscosidad (Mathimani y Mallick, 2018).

La cosecha de biomasa por filtración de flujo tangencial (TFF), también conocida como filtración de flujo cruzado, es igualmente una técnica prometedora, en donde el flujo pasa a través de una membrana, mientras todas las células permanecen en el volumen reducido del cultivo, lo que le permite aumentar la densidad de la biomasa en el agua. El cultivo concentrado se pasa a través del TFF hasta conseguir la densidad de biomasa que se desea. El filtrado que sale por el TFF puede ser utilizado en múltiples propósitos debido a la excelente calidad con la que sale. Sin embargo, la energía demandante por ese sistema de filtración podría llegar a ser muy alta, generalmente el rango es de 0,7 a 2,3 kWh/m^3de cultivo (Al-Jabri et al., 2021).

- *Coagulación*

Las células de microalgas están cargadas negativamente, lo que les ayuda a permanecer en suspensión con un leve efecto de repulsión, sin embargo, también constituye la base de la mayoría de los métodos de coagulación químicos y electroasistidos. El método de coagulación neutraliza la carga negativa en las células de las microalgas, disminuyendo el efecto de repulsión lo que provoca que se agreguen, lo que eventualmente facilita la sedimentación gravitacional. Generalmente, los métodos de coagulación implican la simple adición de compuestos coagulantes o un campo eléctrico

a suspensiones de microalgas con agitación moderadamente lenta, para posteriormente esperar a que la biomasa se asiente en el fondo del biorreactor. Los coagulantes se dividen de dos tipos, orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos, como el quitosano que es un biopolímero, aumentan el tamaño del flóculo de microalgas (más de µmetro), facilitando el proceso de sedimentación. Los coagulantes inorgánicos como el hierro y aluminio se utilizan principalmente para la cosecha de *Scenedesmuy* y *Chlorella* (Tan, et al., 2018).

Electrocoagulación: La electrocoagulación opera según el mismo principio que la coagulación química, utilizando un campo eléctrico para neutralizar la carga negativa. Los métodos eléctricos son ventajosos porque no se necesitan aditivos químicos y la recuperación de biomasa es alta (Richardson, Johnson, Lacey, Oyler, y Capareda, 2014). En este proceso los coagulantes se producen in situ a partir del ánodo cuando los electrodos se conectan de una fuente de alimentación de corriente continua. Posteriormente, los coagulantes forman flóculos de gran tamaño, que se separan por flotación o sedimentación. Durante este proceso se producen microburbujas de hidrógeno y oxígeno tanto en el ánodo como en el cátodo, ayudando a unir las células de las microalgas coaguladas, lo que les permite flotar en la parte superior del cultivo.

Con el fin de abordar algunas deficiencias acopladas con la electrocoagulación, Parmentier et al. (2020), utilizando electrodos de hierro (Fe) y aluminio (Al) realizaron un estudio en donde reportan un notable aumento de 100 veces en la densidad celular después de la electrocoagulación y bajo consumos de energía en ambos electrodos de 2,0 kWh/kg y 1,1 kWh/kg para Fe y Al respectivamente. Se demostró que la eficiencia de eliminación de las células de Fe era mayor que del electrodo de Al (88% y 73% comparativamente), Sin embargo, cabe mencionar que los electrodos de Al mostraron mejor concentración, de hasta 35.200 mg/L en comparación con el electrodo de Fe con 18.500mg/L.

- *Floculación*

La floculación es el proceso de agregación celular llamados flóculos, en medios líquidos. Donde el floculante puede ser un polímero, un químico, otro organismo vivo o un campo eléctrico. Los floculantes se diferencian de los coagulantes dado que no neutralizan activamente la carga negativa en la célula de microalgas, sino que utilizan la carga para atraer y agregar células en flóculos, en una matriz orgánica o en un electrodo

no reactivo. Posteriormente estos flóculos se sedimentarán o eliminarán mediante otros métodos como la centrifugación o flotación (Japar, Takriff, y Mohd Yasin, 2017).

Autofloculación: La introducción de condiciones de estrés en el cultivo como la limitación de carbono, puede inducir a la autofloculación. Algunas microalgas son autofloculantes, por ejemplo, sedimentación y agregación espontáneas si el cultivo no se agita activamente. En estos casos, las condiciones de estrés provocan que las microalgas destilen sustancias polimétricas extracelulares (EPS), que posteriormente agregan células de forma natural (Menegazzo y Fonseca, 2019).

Bio Floculación: El método de recolección por Bio Floculación es el co-cultivo de una microalga con la capacidad de auto sedimentarse con una que no se sedimenta (Al-Jabri et al., 2021). Este método utiliza materiales de base biológica u otros organismos vivos. La bio floculación es causada por biopolímeros también conocidos como sustancia polimétrica extracelular (EPS), el cual se compone de polisacáridos y azúcares. Este método es ventajoso debido a que no necesita la adición de floculantes químicos, siendo un proceso de bajo costo y simple (Vasistha, Khanra, Clifford, & Rai, 2021).

Tabla 4-4: Eficiencia de los métodos de recolección de biomasa algal

Método de cosecha	Fortaleza	Debilidad	Especie de microalga	Recuperación de biomasa (%)	Referencias
Sedimentación	Fácil y económico Requiere de poca energía	Depende de la densidad de las partículas Requiere mucho espacio y tiempo Riesgo de deterioro de la biomasa	*Espirulina* *Scenesdesmus sp.* *Cyclotella sp.*	10 – 90	(Kant Bhatia, et al., 2021)
Centrifugación	Rápida y alta eficiencia Apto para casi todas las microalgas	Costosa Alto consumo de energía	*Nannochloris sp.* 5000 rpm. Tiempo 10 min	94	(Sasongko, et al., 2018) (Menegazzo y Fonseca, 2019)
Flotación	Tiempos de operación cortos Requieren de poco espacio Eficiencia en su	Para algas marinas no es recomendado Proceso costoso	*Chlorella vulgaris* *Scenedesmus quadricauda*	50 - 90	(Bharte y Desai, 2018)

	aplicabilidad a gran escala				
Filtración	Recuperación de biomasa alta Aplicable para especies sensibles al cillazamiento	Alto costo inicial de inversión y operación Aplicable solo para pequeños volúmenes	*Coelastrum proboscideum*	70 - 90	(Mathimani y Mallick, 2018)
Coagulación	Rápido Eficiente	Gastos de capital altos Altos gastos de operación	*Neochloris Oleobundans* $Al_2(SO_4)_3$ 200 mg/L	91	(Moreno, 2011)
Floculación	Reduce el volumen de cultivo Aumenta el tamaño de partícula Reduce la demanda de energía	Contaminante	*Scenedesmus obliquus* ($FeCl_3$) 100 mg/L	95	(Mathimani y Mallick, 2018)
			Chlorella sorokiniana ($FeCl_3$) 250 mg/L	66	
			Chlorella minutissima ($AlCl_3$) 500 mg/L	80	

Fuente: Realizado por Elsy Casco y Josselyn Contento
$Al_2(SO_4)_3$: Sulfato de aluminio; $AlCl_3$: cloruro de aluminio; $FeCl_3$: cloruro de hierro; Rpm: revoluciones por minuto.

4.4 Técnicas de secado

Para evitar el deterioro de las microalgas, es necesario aplicar un proceso de secado. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el secado afecta las propiedades químicas de la biomasa. Como lo es en el proceso de biodiesel, si existe demasiado contenido de agua en la biomasa, afecta a la eficiencia del procesamiento. Por consiguiente, el uso de materias primas refinadas es muy importante. El secado de microalgas constituye un gasto significativo en el proceso, ya que puede ser hasta el 75% del costo total de la cosecha de microalgas. Algunos de los métodos de secado aplicados a las microalgas son secado a luz natural, por aspersión, tanque rotatorio, liofilización, en incinerador, en estanques al vacío, y secado de flujo cruzado. Sin embargo, muchos de ellos no son viables económicamente o son estacionales (Aliyu et al., 2021).

Uno de los métodos de bajo costo es utilizar luz solar natural. Se debe tener en cuenta que este método implica la utilización de grandes superficies de secado, es inconsistente, y existe riesgo de pérdida de biomasa. El secado por aspersión se aplica para separar y secar los componentes sólidos de suspensión sólido-líquido. Además, el secado por luz solar como el secado por aspersión, se usa generalmente antes de la

extracción de productos de alto valor agregado, como alimentos con elevado contenido de proteínas.

El secado de tambor rotatorio es la tecnología de secado más conocida, se realiza mediante la circulación de aire caliente, en el mismo sentido o del sentido contrario del material orgánico. La temperatura del secado es versátil, puede ser hasta de 730 ℃ en gases calientes y para materia orgánico puede ser entre 250 y 400 ℃, secando desde el 20 al 95% de la materia. Sus ventajas son el bajo costo y que tiene gran capacidad, sin embargo, puede aglomerar material en zonas de la cáscara, que posteriormente afectará a la eficiencia de secado (Fuentes Santos, 2016).

En el secado de Spray la biomasa fluye hasta una bomba dosificadora a través de una válvula y filtro, de donde son impulsados por una cañería hasta el atomizador donde es pulverizado por el disco. En esta cámara se encuentra con el aire y se produce el secado, posteriormente el producto seco mezclado con el aire de salida se conduce hasta el ciclón que se encarga de separar el aire del polvo. El aire aplicado al secado es previamente calentado en un horno (Fuentes Santos, 2016). Por otro lado, la liofilización a pesar de ser un método costoso a gran escala es eficaz en romper las células de microalgas para lograr una alta eficiencia en la extracción de lípidos. El secado de biomasa por estantes al vacío se caracteriza por ser un secado uniforme a baja temperatura sin comprensión ni agitación. Los secadores de flujo cruzado el paso de aire se realiza perpendicularmente a una caja de granos, que están en movimiento entre planchas perforadas (Tan, et al., 2018).

4.5 Técnicas de extracción de lípidos

- *Extracción solvente*

Para lograr una máxima extracción de lípidos se ha aplicado varios disolventes, de los cuales los más utilizados son el metanol y el cloroformo, sin embargo, son dañinos y representan una amenaza para la vida humana. Algunos otros disolventes son el benceno, ciclohexano, hexano y acetona, estos rompen las paredes celulares de las microalgas y posteriormente el aceite en el extracto del disolvente se separa por destilación (Khademi et al, 2015). La polaridad del disolvente es de gran importancia ya que tiene gran impacto en la eficiencia de extracción. El metanol y etanol al ser polares extraen más lípidos debido a su capacidad de penetrar las paredes celulares. Para acelerara el tiempo del proceso, mejorar la extracción de lípidos y recuperar el solvente

para su reutilización, también se aplica un proceso de extracción por solvente acelerada (ASE), aplicando presión o calor (Bharte y Desai, 2018).

- *Prensa de Expulsión*

En la aplicación de esta técnica se puede extraer hasta el 75% del aceite de la biomasa de algas secas. Para este proceso es necesario aplicar presión mecánica romper y fraccionar las células, para extraer el aceite. Por otro lado, el prensado mecánico normalmente requiere de biomasa con un contenido de humedad muy bajo, este proceso previo de secado puede representar el 30% del costo total de la producción (Bharte y Desai, 2018).

- *Extracción de fluidos supercríticos*

El método de extracción de fluido supercrítico (SFE), separa los componentes mediante la utilización de un fluido supercrítico como el dióxido de carbono. Donde el componente a separar se extrae mientras el otro permanece en la matriz, y este puede ser líquido o sólido. El fluido alcanza un punto crítico, cuando es calentado y comprimido por encima de su parámetro crítico. El dióxido de carbono supercrítico es comúnmente usado gracias a que es inofensivo, asequible, no es inflamable, y fácil de separar. Además, la temperatura crítica es de solo 31 °C, haciendo que su manejo sea fácil (Bharte y Desai, 2018).

- *Extracción asistida por ultrasonido*

La frecuencia del ultrasonido está por encima de los noveles de audición humana (10kHz a 10 MHz). Los tipos de ultrasonido se clasifican baja intensidad y alta intensidad; los de baja intensidad y alta frecuencia se caracteriza para análisis no destructivos, principalmente para la evaluación de calidad, mientras que el ultrasonido de alta intensidad y baja frecuencia se aplica para alterar las propiedades de los alimentos.

En los medios líquidos cuando se emite ultrasonido se generan pequeñas regiones vacías, denominadas microburbujas. Si el ultrasonido se aplica con la intensidad suficiente, las microburbujas se comprimen llegando a sus radios mínimos e implosionan, produciendo luz (sonoluminiscencia), radicales libres, calor y ondas de choque, lo que permite dañar las paredes celulares liberando los compuestos deseados (Khademi et al., 2015). Estudios han demostrado que la extracción asistida por ultrasonido en microalgas como *Nannochloropsis oculata* y *Chlorella vulgaris* no se obtuvo resultados prometedores, identificando que el método por sí solo no puede considerarse como un método eficiente en la extracción de lípidos (Bharte y Desai, 2018).

- *Extracción asistida por microondas*

La característica diferencial del método de extracción por microondas radica en que la muestra se calienta de manera uniforme con una fuente de calor sin contacto. La transferencia de calor y masa son dos aspectos importantes que diferencian a un calentamiento por microondas de uno convencional. En el calentamiento convencional se calienta de afuera hacia a dentro y la transferencia de calor se da de adentro hacia afuera. Mientras que en el calentamiento por microalgas tanto la transferencia de calor como de masa son del interior al exterior de la biomasa. El proceso del calentamiento intracelular da lugar al vapor de agua, provocando la electroporación apartando la membrana celular, lo que lleva a una eficaz extracción de metabolitos celulares. De esta manera la presión y calor extraen el contenido de la celda, dando productos de buena calidad.

Bharte y Desai (2018) utilizaron un sistema de microondas que consistía en la realización de un proceso continuo con la finalidad de extraer aceite de la especie *Scenedesmus obliquus* y como disolvente el hexano, el 77% del contenido total de lípidos se obtuvo a 95 ℃ en 30 min. En el sistema de microondas la temperatura objetivo de 95 ℃ se podía alcanzar en 100 s, a diferencia del calentamiento convencional donde se necesitaba alrededor de 1000 s para llegar a esta temperatura.

4.6 Procesos de conversión de bioenergía

Según Brennan y Owende (2010); Vij, Subramanian, Pandian, Krishna, & Hari (2021), existen tres rutas principales para la producción de biocombustible a partir de microalgas: termoquímica, química y bioquímica. Estas involucran varios tipos de procesos que a su vez generan diferentes productos energéticos. La figura 9-4 muestra las rutas, procesos y productos para la producción de bioenergía a partir de biomasa de microalgas. Y en la tabla 6-4 se puede observar el rendimiento de los biocombustibles que se obtienen a partir de las microalgas.

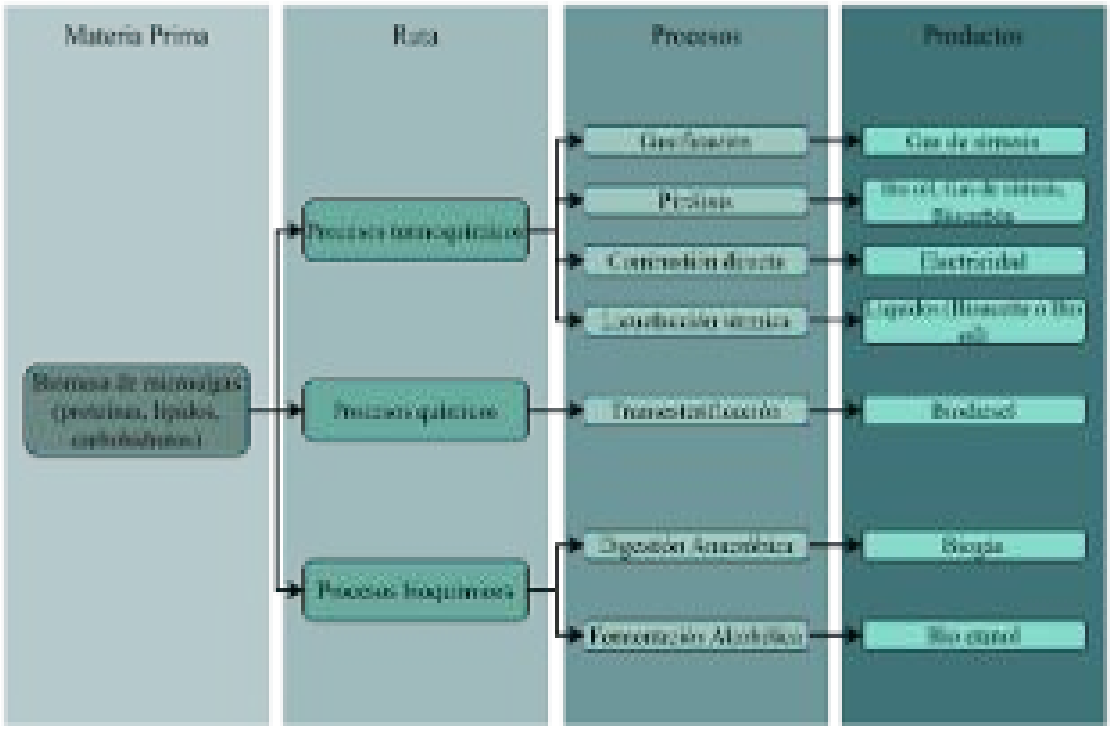


Figura 9-4. Diferentes métodos para la producción de biocombustible a partir de microalgas
Fuente: Adaptado de (Vij et al., 2021).

- *Proceso de conversión termoquímicos*

Los procesos termoquímicos son los favoritos para la producción de bioenergía y productos valiosos a partir de biomasa de microalgas (Arun, et al., 2020). La descomposición térmica de la biomasa puede producir diferentes tipos de productos como se representa en la figura 10-4. Este tipo de conversión se puede llevar a cabo por pirólisis, licuefacción, gasificación y combustión directa, se aplica con mayor frecuencia que la conversión bioquímica (Soares, Martins, y Gonçalves, 2019).

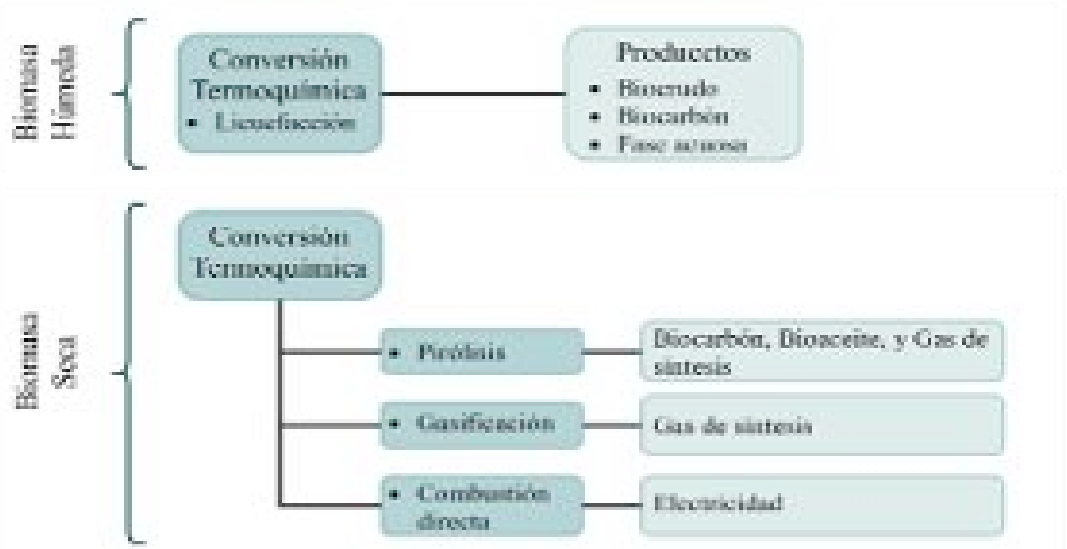


Figura 10-4. Proceso de conversión termoquímico
Fuente: Adaptado de: (Aliyu et al., 2021).

La licuefacción hidrotermal se utiliza principalmente para producir biocrudo, la fase acuosa es el residuo del proceso de licuefacción se produce en grandes cantidades inevitablemente (Leng, et al., 2020). Este proceso se considera una tecnología prometedora para la producción de biocombustibles sin embargo resulta ser más costoso en relación con el proceso de pirólisis y gasificación (Aliyu et al., 2021).

Los productos que se obtienen de la pirólisis dependen de las condiciones de operación (temperatura, velocidad de calentamiento y duración). La pirólisis lenta es ideal para producir biocarbón. Por otro lado, está la pirólisis rápida produce bioaceite, se consigue un mayor rendimiento de líquidos y de gas (Min, et al., 2020). (Soares et al., 2019) El propósito de la gasificación es producir un gas de síntesis limpio y de alta eficiencia, el gas de síntesis está compuesto principalmente por CO y H_2 mezclado con otros componentes. La producción de gas de síntesis puede variar de 1-3 m^3/kg de biomasa seca. (Rawat I. , Ranjith Kumar, Mutanda, & Bux, 2011) la combustión directa consiste en la quema directa de biomasa en presencia de aire, los gases producidos deben utilizarse inmediatamente debido a que no pueden ser almacenados. La biomasa debe someterse a procesos de secado haciendo un proceso menos viable. A continuación, observaremos en la tabla 5-4 los diferentes bioproductos que se puede obtener mediante conversión termoquímica con las diferentes condiciones de producción.

Tabla 5-4: Parámetros de operación y productos que se obtienen de los procesos de conversión termoquímica

Ruta de conversión	Descripción	Producto	Referencias
Licuefacción hidrotermal	BH: 5-50% T: 300-350°C P: 5-20 MPa	Biocrudo Biocarbón Fase acuosa	(Arun, et al., 2020)
Pirólisis	BH: < 5% AO T: 350-700 °C	Bioaceite Biocarbón Gas de síntesis	(Min, et al., 2020)
Gasificación	BS PO T: 800-1000°C	Gas de síntesis	(Min, et al., 2020)
Combustión directa	BS T: >800°C PO	Electricidad	(Rawat I. et al., 2011)

Fuente: Realizado por Elsy Casco y Josselyn Contento
BH: biomasa húmeda; BS: biomasa seca; T: temperatura; P: presión; AO: ausencia de oxígeno; PO: presencia de oxígeno

- *Procesos de conversión químicos*

En el proceso de conversión química se utiliza con la finalidad de obtener biodiesel a partir del proceso de transesterificación. La transesterificación convencional de proceso catiónico, incluye dos pasos: (i) extracción de lípidos de las células de

microalgas, (ii) conversión de lípidos extraídos en biodiesel. En la conversión de lípidos los triglicéridos se transforman a ácidos grasos (biodiesel) y glicerol (Kumar Duran, Kumar, y Sandhu, 2018). Se introduce metanol junto con el catalizador alcalino o ácido (hidróxido de potasio o hidróxido de sodio, ácido clorhídrico o ácido sulfhídrico), comúnmente en operación a gran escala se utiliza el catalizador alcalino debido a que su velocidad de reacción es 4000 veces más rápida que el catalizador ácido (Min, et al., 2020).

Transesterificación in situ proceso catiónico es un proceso de un solo paso, la extracción y la transesterificación se llevan a cabo en un solo paso con alcohol que actúa como disolvente y reactivo, de este modo se reduce el costo de producción y el tiempo de procesamiento. El rendimiento de biodiesel mejora en 20% en comparación con el método de transesterificación convencional (Min, et al., 2020).

Kumar Duran et al. (2018) el proceso de transesterificación supercrítico proceso catiónico, se ha considerado este proceso el más favorable para la producción de biodiesel, debido a que no hay generación de residuos debido a la ausencia de catalizador facilitando la recuperación de glicerol. El proceso es costoso debido a las condiciones supercríticas y porque se utiliza grandes cantidades de alcohol.

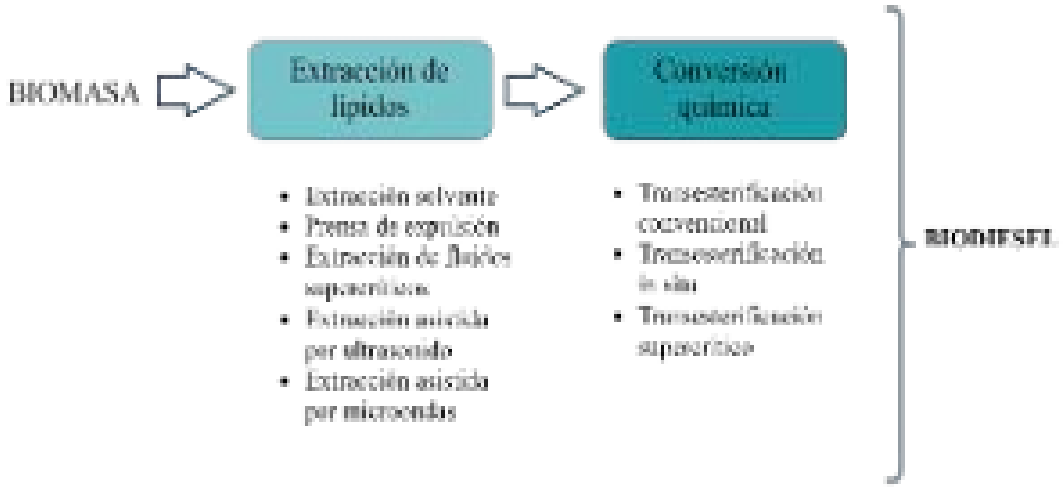


Figura 11-4. Procesos de conversión química
Fuente: Adaptado de: (Kumar Duran et al., 2018)**;** (Min, et al., 2020)**.**

- *Procesos de conversión bioquímicos*

El proceso de digestión anaeróbica (DA) implica el proceso de degradación de la biomasa algal en ausencia de oxígeno. Este proceso se desarrolla a través de reacciones bioquímicas dando como producto el biogás. El biogás está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico en pequeñas cantidades

(Cavinato, Ugurlu, de Godos, Kendir, y Gonzalez Fernandez, 2017). La DA se usa para materia orgánica con alto contenido de humedad (80-90%), por esta razón es totalmente aplicable para las microalgas húmedas. Los lípidos de las microalgas pueden producir más biogás con relación a las proteínas y carbohidratos (Min, et al., 2020). El proceso de DA la degradación de biomasa se da a partir de 4 etapas. La hidrólisis es la primera etapa, aquí los compuestos complejos (carbohidratos, proteínas y lípidos) de la biomasa algal son degradados a compuestos más simples. En la acidogénesis los compuestos simples se descomponen aún más produciendo compuestos como ácidos volátiles de cadena corta, CO_2, H_2, y ácido acético. Posteriormente los ácidos volátiles de cadena corta se transforman en H_2 y ácido acético en la etapa de acetogénesis. el ácido acético y H_2 gracias a las bacterias acetogénicas. Finalmente, en la cuarta etapa metanogénesis el ácido acético se transforma en metano por acción de las bacterias metalogénicas que están en el digestor (Zabed, et al., 2020).

El proceso de fermentación consiste en convertir las microalgas en bioetanol. Las microalgas con alto contenido de carbohidratos son óptimas para la producción de bioetanol. Para la fermentación de biomasa algal es necesario realizar un pretratamiento, la biomasa se transforma en azúcares mediante molienda, posterior a la molienda se añade levadura (*Saccharomyces cerevisiale*) y agua en un fermentador. Los costos de producción de bioetanol aumentan debido a la necesidad de realizar un pretratamiento (Soares et al., 2019).

Antes de someterle al proceso de fermentación se debe pasar por un pretratamiento de la biomasa. Para el pretratamiento se puede usar procesos mecánicos, químicos y biológicos. En el proceso mecánico incluye técnicas de trituración, molienda, homogeneización, reparto líquido y tratamiento ultrasónico, este proceso mejora la digestibilidad anaeróbica de la biomasa, este método resulta ser más económico en comparación con otras tecnologías. Además, estos procesos aumentan en un 13-110% el rendimiento de metano. En los pretratamientos químicos se aplican pretratamientos con ácido, alcalino se han aplicado a microalgas. En el pretratamiento biológico se utiliza microbios y enzimas para liberar el material intercelular y de este modo mejorar la tasa de producción de metano, este pretratamiento presenta características limpias y sobresalientes de la aplicación enzimática (Santos Ballardo, Rossi, Reyes Moreno, y Valdez Ortiz, 2016).

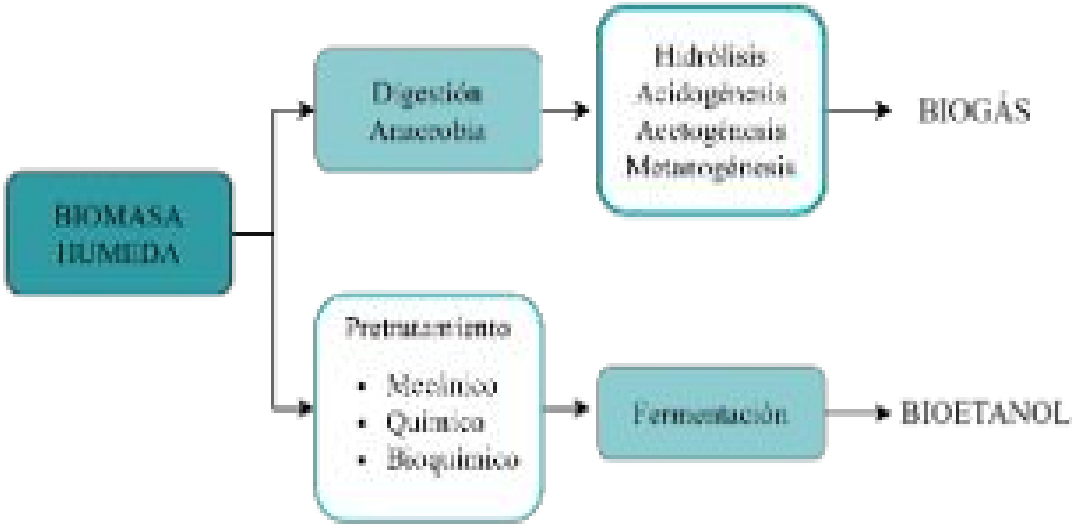


Figura 12-4. Proceso de conversión Bioquímica para la producción de biogás y bioetanol
Fuente: Adaptado de: (Zabed, et al., 2020); (Phwana, et al., 2018).

Tabla 6-4: Potencial de los diferentes procesos para la producción de biocombustibles

Procesos de conversión	Técnica de conversión	Especie de microalgas	Condiciones	Biocombustibles	Referencias
Conversión termoquímica	Licuefacción hidrotermal	*Chlorella pyrenoidosa y Formidio*	Presión: 27 bares T: 230°C t: 20 min	Biocrudo: 43±2%	(Naaza et al., 2019)
	Gasificación	*Scenedesmus sp.*	T: 860°C Agente gasificante: aire	Gas de síntesis: 16.9% CO, 11.4% H_2, 11.6% CO_2	(Soares et al., 2019)
	Pirólisis	*Chlorella prototecoides*	T: 500°C Velocidad de calentamiento: 6°C/s	Bioaceite: 18%	(Tan, et al, 2018)
Conversión química	Transesterificación	*Synechocystis*	Disolventes: cloroformo, metanol Catalizador: ácido heterogéneo T: 100°C	Biodiesel: 79.7%	(Ashokkumar, et al., 2019)
Conversión bioquímica	Digestión anaeróbica	*S. obliquus*	T: 33°C Flujo continuo	Metano: 0.296 LCH_4/g VS	(Santos Ballardo et al., 2016)
			T: 55°C Flujo continuo	Metano: 0.462 LCH_4/ g VS	
	Digestión anaeróbica	*Dunaliella salina*	T: 38°C t: 32 d	Biogás: 505 mL/g VS	(Zabed, et al., 2020)
	Digestión anaeróbica	*Chlorella vulgaris*	T: 36°C	Biogás: 369 mL/g VS	(Zabed, et al., 2020)

Fermentación	*Scenedesmus abundans*	T: 30°C Levadura: *S. cerevisiae* t: 48 h pH: 5.5	Bioetanol: 0.103 g de etanol/g de biomasa	(Phwana, et al., 2018)
Fermentación	*Chlorella sp.*	T: 30°C Levadura: *S. cerevisiae* pH: 6 t: 20 h	Bioetanol: 0.16 g de etanol/g de biomasa	(Phwana, et al., 2018)

Fuente: Realizado por: Elsy Caso y Josselyn Contento
CO: monóxido de carbono; H_2: Hidrógeno gaseoso; LCH_4: litros de metano; T: temperatura; t: tiempo; VS: sólido volátil.

4.7 Potencialidades de los procesos de tratamiento basados en microalgas con fines de obtención de bioenergía a partir de los recursos de las aguas residuales

4.7.1 Viabilidad técnica

Los sistemas de cultivo para microalgas se basan en sistemas abiertos (SA) y sistemas cerrados (SC). En lo referente a los SA el consumo de energía es bajo, en comparación a los SC. Sin embargo, los SC tienen mayor productividad de biomasa, no requiere de grandes áreas de terreno, y hay un mayor control en las condiciones de cultivo. Por otra parte, la conversión de la biomasa algas en bioproductos como combustibles es potencialmente significativa ya que la biomasa restante o considerada residuo puede ser aplicada para la elaboración de otros productos de valor agregado aplicados a la industria farmacéutica, cosméticos, fertilizante y alimento para animales (Kothari, et al., 2019).

Los biocombustibles de biomasa de microalgas o también llamados combustibles de tercera generación resultan ventajosos con relación a los combustibles de primera y segunda generación, debido a que, los biocombustibles de primera generación se fabrican de materias primas alimenticias como almidón, azúcares, girasol, trigo, cebada, etc. Por este motivo no son sostenibles, y además requieren de grandes extensiones de terreno para su cultivo. Por otra parte, los biocombustibles de segunda generación su materia prima se basa en lignocelulósicas no comestibles como biomasa de árboles, residuos agrícolas, paja, pasto, etc. Que, a pesar de estar disponibles a un bajo costo, su generación es costosa y compleja. Por ello, los bicombustibles de tercera generación, especialmente basados en biomasa de microalgas y bajo un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas suenan más benéficos debido a que no requieren de grandes extensiones de terreno, no necesitan de recursos hídricos adicionales, tienen mayor capacidad de secuestrar CO_2 de la atmósfera, tienen alta tasa de crecimiento y no emiten cantidades

significativas de gases de efecto invernadero (Anto, et al., 2020); (Arun, et al., 2020). Además, la bioenergía de los biocombustibles a base de algas es 10 000 veces mayor que los biocombustibles de segunda generación.

4.7.2 Viabilidad ambiental

El cultivo de microalgas adaptado al sistema de tratamiento de aguas residuales ofrece grandes ventajas como la degradación de contaminantes, y oxigenación del agua tratada. El biodiesel producido a partir de biomasa de microalgas tiene la capacidad de reducir hasta un 78% las emisiones de CO_2. Arun et al. (2020) consideran al cultivo de microalgas en aguas residuales como carbono negativo, dado que, absorben más CO_2 del que se produce, mediante las técnicas de secuestro y captura de carbono. La biomasa de 1 kg puede secuestrar 1,83 kg de CO_2 del medio ambiente.

Hoh et al. (2016) determinan que la aplicación de la especie de microalgas *Chlorella vulgaris* para la fuente del tratamiento primario ha eliminado más del 90% de nitrógeno y el 80% de fósforo. Por otro lado, Behera, Acharya, Gargey, Aly, & Paramasivan, (2019) reportaron una productividad de biomasa del 0.5 g/L/día, junto con una productividad de lípidos de 0.103 g/L/día y una remoción del 85% y 92% de nitrógeno y fósforo respectivamente en un sistema de estanques de alta tasa.

Dado que la recolección de bimasa supone entre el 20 y 30% del costo total de la producción de biocombustibles. Se pueden emplear varios compuestos y materiales para inducir la agregación de microalgas para una recolección más fácil. Algunos compuestos (por ejemplo, sales férricas y de aluminio o polímeros sintéticos de acrilamida (Vandamme, Foubert, & Muylaert, 2013), pueden contaminar la biomasa, lo que puede interferir con procesos químicos posteriores como la transesterificación o procesos biológicos como la fermentación de residuos a etanol (Anthony, et al., 2013). Otros compuestos (por ejemplo, hidróxido de sodio o fosfato de calcio, producen efluentes perjudiciales para el medio ambiente, que son costosos de tratar. Estas consideraciones deben tenerse en cuenta al equilibrar las necesidades energéticas y los costes finales del sistema de biorrefinería con sus ingresos (Vandamme et al., 2013).

4.7.3 Viabilidad económica

Yang et al. (2016) mencionan que los cuellos de botella para la viabilidad económica de los biocombustibles a base de microalgas son las barreras tecnológicas y de ingeniería, incluido el alto costo del cultivo y la recolección de microalgas. Sin

embargo, gracias a que las aguas residuales domésticas se encuentran enriquecidas con nutrientes, pueden usarse como fuente de cultivo de bajo costo para las microalgas, esto al tratarse de cultivo en sistemas abiertos.

Las innumerables preocupaciones asociadas con el cultivo a gran escala de microalgas para la producción de biomasa se derivan de un tema clave: los recursos y los costos asociados necesarios para facilitar todo el proceso, desde el cultivo hasta el producto bioenergético terminado (Chokshi, Pancha, Ghosh, y Mishra, 2016); (Laurens, 2017). Dependiendo de la ubicación, el entorno natural y las condiciones de cultivo, las necesidades de energía y / o recursos químicos para un cultivo productivo pueden superar por completo los beneficios económicos del uso de microalgas para el tratamiento de aguas residuales (Gouveia, et al., 2016) o la captura de carbono (Al Ketife, Almomani, EL-Naas, y Judd, 2019); (Rezvani, Moheimani, y Bahri, 2016) y mucho menos. los productos de biocombustible acabados. (Ezugbe y Rathilal, 2020). Además, muchos métodos habituales utilizados para valorizar la biomasa en biocombustibles son igualmente caros y requieren el uso de disolventes tóxicos (Goswami, Makut, y Das, 2019).

Arun et al. (2020) expresan que la viabilidad económica es un factor importante donde determina el precio al consumidor, este precio se establece mediante costos directos y costos indirectos. Los costos directos son aquellos costos de producción en la actualidad, mientras que los costos indirectos determinan la sostenibilidad del combustible a largo plazo relacionado al impacto en el medio ambiente. Sin embrago, cabe destacar que los costos indirectos no son exhibidos al público a causa de la dificultad en la monetización del costo de los recursos, economía mundial, disponibilidad de tierras, cambio climático y efectos sobre la salud de los seres vivos. Por este motivo la viabilidad económica de los biocombustibles esta aún limitada. Además, Hoh et al. (2016) estiman que el costo del cultivo representa el 40% total del costo total de la producción, mientras que el proceso de cosecha representa del 20 - 30% del costo. Por otro lado, los autores (Arun, et al., 2020) también establecen que, en un sistema de estanques, la productividad típica de biomasa es de 30 a 50 toneladas/ha/año y solo el costo de recolección contribuye del 20 al 30% del costo total del cultivo.

5 CONCLUSIONES

Para la revisión bibliográfica del tema de investigación en la base de datos Scopus se han empleado las palabras claves como: microalgae, micro algae, domestic wastewater, domestic sewage, bioenergy, biofuel. Se obtuvieron un total de 1566 publicaciones científicas, relacionadas con las microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales y la producción de bioenergía, lo que refleja que es un tema de investigación de interés de toda la comunidad científica, principalmente las áreas de ciencias ambientales, energía y la investigación química.

Se ha logrado identificar que los diferentes sistemas de cultivo de microalgas integrados al tratamiento de aguas residuales domésticas son, los sistemas abiertos (SA) y sistemas cerrados (SC). Ambos sistemas tienes sus propias cualidades como el mantenimiento, construcción, costos y parámetros de cultivo. Podemos definir que los SA son los mejores para una aplicabilidad a gran escala, gracias a los bajos costos. Sin embargo, los SC son los más aptos para un mejor crecimiento de las microalgas, debido a la accesibilidad operacional, favoreciendo a una mejor productividad de biomasa.

Se han identificado las diferentes rutas de conversión de bioenergía para los diferentes biocombustibles que se pueden obtener mediante la biomasa algal. De los cuales, muchos de ellos se enfocan en rutas termoquímicas, gracias a que posee procesos en donde la biomasa puede ser aplicada seca, o húmeda, lo que ayuda a minimizar los gastos. Sin embargo, muchos de ellos se llevan a cabo a escalas en laboratorio, o son revisiones bibliográficas.

Se ha identificado el potencial de los sistemas de cultivo de microalgas en el tratamiento de aguas residuales domésticas para la producción de bioenergía, mediante una breve valoración técnica, ambiental y económica. En la valoración técnica podemos decir que el sistema de cultivo integrado al TAR es eficiente en los efluentes secundarios de la planta, con relación a los métodos convencionales de tratamiento. Para la valoración ambiental, las microalgas cumplen un papel innovador y eficaz en la remoción de nutrientes, además evita la difusión de gases de efecto invernadero. Y para finalizar la valoración económica nos ha permitido evidenciar la falta de aplicabilidad de esos sistemas integrados a gran escala. Debido a los altos costos en las operaciones de secado y extracción de lípidos, que hacen del sistema deficiente en términos de capital de inversión.

6 RECOMENDACIONES

A pesar de existir una gran diversidad de especies de microalgas, las estudiadas para los sistemas de cultivo en ARD son muy pocas, motivo por el cual la comunidad científica debería centrarse en el estudio de las diferentes microalgas tomando en cuenta su endemismo con el propósito que su aplicación a gran escala las condiciones ambientales no sean un factor limitante en el cultivo.

Para los sistemas de cultivos integrados a microalgas, en los procesos de recolección de biomasa y extracción de lípidos, se debería estudiar la aplicación de tecnologías híbridas con un enfoque prometedor en la reducción de costos, evitar la contaminación, y disminuir el consumo de energía con el fin de proporcionar una producción de biocombustibles enfocados en la economía circular y contribuyendo al desarrollo sostenible.

Muchos artículos científicos se realizan a escala piloto, y mediante revisión bibliográfica, lo que dificulta obtener una visión realista de la aplicabilidad a gran escala. Por ello, la documentación científica basada en la implementación del cultivo de microalgas acopladas al TAR, debería desarrollarse con datos y procesos confiables para una rápida implementación en el desarrollo de energías renovables, con el fin de solucionar los cuellos de botella con relación al capital de inversión.

7 REFERENCIAS

Abdelgadir, A., Chen, X., Liu, J., Xie, X., Zhang, J., Zhang, K., . . . Liu, N. (2014). Characteristics, process parameters, and inner components of anaerobic bioreactors. *Biomed Res Int*. doi:10.1155/2014/841573

Al Ketife, A. M., Almomani, F., EL-Naas, M., & Judd, S. (2019). A technoeconomic assessment of microalgal culture technology implementation for combined wastewater treatment and CO2 mitigation in the Arabian Gulf. *Process Safety and Environmental Protection, 127*, 90-102. doi:https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.003

Aliyu, A., Lee, J., & Harvey, A. P. (2021). Microalgae for biofuels via thermochemical conversion processes: A review of cultivation, harvesting and drying processes, and the associated opportunities for integrated production. *Bioresource Technology Reports, 14*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100676

Al-Jabri, H., Das, P., Khan, S., Thaher, M., & Abdul Quadir, M. (2021). Treatment of Wastewaters by Microalgae and the Potential Applications of the Produced Biomass—A Review. *Water, 13*(27). doi:https://doi.org/10.3390/w13010027

Anthony, R. J., Ellis, J. T., Sathish, A., Rahman, A., Miller, C. D., & Sims, R. C. (2013). Effect of coagulant/flocculants on bioproducts from microalgae. *Bioresource technology, 149*, 65-70. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.028

Anto, S., Mukherjee, S. S., Muthappa, R., Mathimani, T., Deviram, G., Kumar, S. S., . . . Pugazhendhi, A. (2020). Algae as green energy reserve: Technological outlook on biofuel production. *Chemosphere, 242*. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125079

Arun, J., Gopinath, K., Sundar, P., Vargees, F., Marudai, J., & Malolan, R. (2020). A conceptual review on microalgae biorefinery through thermochemical and. *Bioresource Technology Reports, 11*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100477

Ashokkumar, V., Agila, E., Sivakumar, P., Salam, Z., Rengasamy, R., & Ani, F. N. (2014). Optimization and characterization of biodiesel production from microalgae Botryococcus grown at semi-continuous system. *Energy Conversion and Management, 88*, 936-946. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.019

Ashokkumar, V., Chen, W., Ngamcharussrivichai, C., Agila, E., & Ani, F. (2019). Potential of sustainable bioenergy production from Synechocystis sp. cultivated in wastewater at large scale – A low cost biorefinery approach. *Energy Conversion and Management, 186*, 188-199. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.056

Assunção, J., & Malcata, F. X. (2020). Enclosed “non-conventional” photobioreactors for microalga production: A review. *Algal Research, 52*. doi:https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102107

Baral , S., Dionisi , D., Maarisetty , D., Gandhi , A., Kothari , A., Gupta, G., & Jain , P. (2020). Biofuel production potential from wastewater in India by integrating

anaerobic membrane reactor with algal photobioreactor. *Biomass and Bioenergy, 133*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105445

Barreiro Vescovo, S. N. (2019). *Caracterización de los consorcios microalgas-bacterias en el tratamiento de agua residual urbana* . Madrid: UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.

Behera, B., Acharya, A., Gargey, I. A., Aly, N., & Paramasivan, B. (2019). Bioprocess engineering principles of microalgal cultivation for. *Bioresource Technology Reports, 5*, 297-316. doi:https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.08.001

Behera, B., Acharya, A., Gargey, I. A., Aly, N., & Paramasivan, B. (2019). Bioprocess engineering principles of microalgal cultivation for sustainable biofuel production. *Bioresource Technology Reports, 5*, 297-316. doi:https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.08.001

Bhagea, R., Bhoyroo, V., & Puchooa, D. (2019). Microalgae: the next best alternative to fossil fuels after biomass. A review. *Microbiology Research, 10*(1). doi:https://doi.org/10.4081/mr.2019.7936

Bharte, S., & Desai, K. (2018). Techniques for harvesting, cell disruption and lipid extraction of microalgae for biofuel production. *Biofuels*. doi:https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1472977

Bhatia, S. K., Mehariya, S., Bhatia, R. K., Kumar, M., Pugazhendhi, A., Awasthi, M. K., . . . Yang, Y.-H. (2021). Wastewater based microalgal biorefinery for bioenergy production: Progress and challenges. *Science of The Total Environment, 751*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141599

Bhatnagar, A., Bhatnagar, M., Chinnasamy, S., & Das, K. C. (2010). Chlorella minutissima—A Promising Fuel Alga for Cultivation in Municipal Wastewaters. *Applied Biochemistry and Biotechnology volume,* 523-536. doi:https://doi.org/10.1007/s12010-009-8771-0

Bhattacharya, M., & Goswami, S. (2020). Microalgae – A green multi-product biorefinery for future industrial prospects. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 25*. doi:https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101580

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(2), 557-577. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009

Brereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D., Turner, M., & Khalil, M. (2007). Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software, 80*, 571-583. doi:https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.009

Candela Orduz, R. D. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica.* Bucaramanga: Universidad Nacional Abierta y a Distancia. .

Carrillo-Barahona, W. E., Negrete-Costales, J. H., Loor-Lalvay, X. A., & Riera-Guachichullca, E. J. (2021). The quality of domestic waste water. *Revista Científico-Académica Multidisciplinaria, 6*(3), 228-245.

Cavinato, C., Ugurlu, A., de Godos, I., Kendir, E., & Gonzalez Fernandez, C. (2017). Biogas production from microalgae. En *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts* (págs. 155-182). Woodhead Publishing. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00007-8

Chisti, Y. (2013). Constraints to commercialization of algal fuels. *J Biotechnol, 167*(3). doi:10.1016/j.jbiotec.2013.07.020

Cho, S., Lee, N., Park, S., Yu, J., Thao Luong, T., Oh, Y.-K., & Lee, T. (Marzo de 2013). Microalgae cultivation for bioenergy production using wastewaters from a municipal WWTP as nutritional sources. *Bioresource Technology, 131*, 515-520. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.176

Chokshi, K., Pancha, I., Ghosh, A., & Mishra, S. (2016). Microalgal biomass generation by phycoremediation of dairy industry wastewater: An integrated approach towards sustainable biofuel production. *Bioresource Technology, 221*, 455-460. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.070

Chowdhury, H., & Loganathan, B. (2019). Third-generation biofuels from microalgae: a review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 20*, 39-44. doi:https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.09.003

Couto, E., Calijuri, M. L., & Assemany, P. (2020). Biomass production in high rate ponds and hydrothermal liquefaction: Wastewater treatment and bioenergy integration. *Science of The Total Environment, 724*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138104

Craggs, R., Sutherland, D., & Campbell, H. (2012). Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *Journal of Applied Phycology, 24*, 329-337. doi:https://doi.org/10.1007/s10811-012-9810-8

da Silva, T., Gouveia, L., & Reis, A. (2014). Integrated microbial processes for biofuels and high value-added products: the way to improve the cost effectiveness of biofuel production. *Applied Microbiology and Biotechnology2, 98*. doi:https://doi.org/10.1007/s00253-013-5389-5

Dahmani, S., Zerrouki, D., Ramanna, L., Rawat, I., & Bux, F. (2016). Cultivation of Chlorella pyrenoidosa in outdoor open raceway pond using domestic wastewater as medium in arid desert region. *Bioresource Technology, 219*, 749-752. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.019

de Mendonça, H. V., Balbaud Ometto, J. P., Otenio, M. H., Ramos Marques, I. P., & Dos Reis, A. J. (2018). Biorremediación mediada por microalgas y valorización de aguas residuales de ganado previamente digeridas en un reactor anaeróbico híbrido utilizando un fotobiorreactor: Comparación entre operación discontinua y continua. *The Science of the total environment, 633*, 1-11. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.157

Devia Torres, D., Cáceres Sepúlveda, S., Roa, A. L., Suárez Gelvez, J. H., & Urbina Suárez, N. A. (2017). Utilización de microalgas de la división Chlorophyta en el tratamiento biológico de drenajes ácidos de minas de carbón. *Revista Colombiana de Biotecnología, XIX*(2), 95-104. Obtenido de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=776/77654661010

Drira, N., Piras, A., Rosa, A., Porcedda, S., & Dhaouadi, H. (2016). Microalgae from domestic wastewater facility's high rate algal pond: Lipids extraction, characterization and biodiesel production. *Bioresource Techonology, 206*, 239-244. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.082

Enamala, M., Enamala, S., Chavali, M., Donepudi, J., Yadavalli, R., Kolapalli, B., . . . Kuppam, C. (2018). Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94*, 49-68. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.012

Ezugbe, E. O., & Rathilal, S. (2020). Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. *Membranes, 10*(5). doi:https://doi.org/10.3390/membranes10050089

Fernández, G., Reis, A., Wijiffels, R., & Barbosa, M. (2021). The role of microalgae in the bioeconomy. *New BIOTECHNOLOGY*, 99-107. doi:https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.011

Florian, D., Álvarez Díaz, P. D., Fon-Sing, S., Fleury, G., & Sassi, J.-F. (2016). The Environmental Biorefinery: Using Microalgae to Remediate Wastewater, a Win-Win Paradigm. *Energies, 9*(3). doi:https://doi.org/10.3390/en9030132

Fuentes Santos, Á. (2016). *Modelización y simulación numérica del secado solar de microalgas.* Universidad Carlos III de Madrid.

González Camejo, J., Ferrer, J., Seco, A., & Barat, R. (2021). Outdoor microalgae-based urban wastewater treatment: Recent advances, applications, and future perspectives. (S. N. Lane, Ed.) *Wiley Periodicals LLC., 8*(3). doi:https://doi.org/10.1002/wat2.1518

Goswami, G., Makut, B. B., & Das, D. (2019). Sustainable production of bio-crude oil via hydrothermal liquefaction of symbiotically grown biomass of microalgae-bacteria coupled with effective wastewater treatment. *Scientific Reports, 9*. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-019-51315-5

Goswami, R. K., Mehariya, S., Verma, P., Lavecchina, R., & Zuorro, A. (2021). Microalgae-based biorefineries for sustainable resource recovery from wastewater. *Journal of Water Process Engineering, 40*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101747

Gouveia, L., Graça, S., Sousa, C., Ambrosano, L., Ribeiro, B., Botrel, E. P., . . . Silva, C. M. (2016). Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs: Scale-up considerations. *Algal Research, 16*, 167-176. doi:https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.03.010

Gramegna, G., Scortica, A., Scafati, V., Ferella, F., Gurrieri, L., Giovannoni, M., . . . Benedetti, M. (2020). Exploring the potential of microalgae in the recycling of dairy wastes. *Bioresource Technology Reports, 12*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100604

Guo, W., Lei, Z., Wang, J., & Wei, D. (2019). Special issue on challenges in biological wastewater treatment and resource recovery. *Bioresource Technology Reports, 7*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100243

Gupta, S., Pawar, S. B., & Pandey, R. A. (2019). Current practices and challenges in using microalgae for treatment of nutrient rich wastewater from agro-based industries. *Science of the Total Environment, 687*, 1107-1126. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.115

Gurung, K., Tang, W. Z., & Sillanpää , M. (2018). Correction to: Unit Energy Consumption as Benchmark to Select Energy Positive Retrofitting Strategies for Finnish Wastewater Treatment Plants (WWTPs): a Case Study of Mikkeli WWTP. *Environmental Processes, 5*, 667-681. doi:https://doi.org/10.1007/s40710-018-0340-5

Harun, R., Yip, J., Thiruvenkadam, S., Ghani, W., Cherrington, T., & Danquah, M. (2014). Algal biomass conversion to bioethanol –a step-by-step assessment. *Biotechnology Journal, 9*(73), 73-86. doi: 10.1002/biot.201200353

Hernández Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía, 49*, 157-173. doi:10.4067/S0718-19572014000200001

Hernández-García, A., Velásquez-Orta, S. B., Novelo, E., Yáñez-Noguez, I., Monje-Ramírez, I., & Orta Ledesma, M. T. (2019). Wastewater-leachate treatment by microalgae: Biomass, carbohydrate and lipid production. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 174*, 435-444. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.052

Hoh, D., Watson, S., & Kan, E. (2016). Algal Biofilm Reactors for Integrated Wastewater Treatment and Biofuel Production: a review. *Chemical Engineering Journal*. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.062

Jaiswal, K. K., Kumar, V., Vlaskin, M. S., Sharma, N., Rautela, I., Nanda, M., . . . Chauhan, P. K. (2020). Microalgae fuel cell for wastewater treatment: Recent advances and challenges. *Journal of Water Process Engineering, 38*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101549

Jaiswal, K. K., Kumar, V., Vlaskin, M. S., Sharma, N., Rautela, I., Nanda, M., . . . Chauhan, P. K. (2020). Microalgae fuel cell for wastewater treatment: Recent advances and challenges. *Journal of Water Process Engineering, 38*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101549

Jaiswal, K., Kumar, V., Vlaskin, M. S., Sharma, N., Rautela, I., Nanda, M., . . . Chauhan, P. K. (2020). Microalgae fuel cell for wastewater treatment: Recent advances and challenges. *Journal of Water Process Engineering, 38*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101549

Japar, A. S., Takriff, M. S., & Mohd Yasin, N. H. (2017). Harvesting microalgal biomass and lipid extraction for potential biofuel production: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 5*(1), 555-563. doi:https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.016

Javed, F., Aslam, M., Rashida, N., Shamair, Z., Laeeq Khan, A., Yasin, M., . . . Ahmed Bazmi, A. (1 de November de 2019). Microalgae-based biofuels, resource recovery and wastewater treatment: A pathway towards sustainable biorefinery. (Z. Huang, J. Patrick, & E. Suuberg, Edits.) *The Science and Technology of Fuel and Energy, 255*. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115826

Jiménez Barreto, D. M., & Montalván Cobos, P. M. (2018). *Diseño y prueba piloto de un reactor tubular cerrado de microalgas de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos.* Cuenca: Universidad de Cuenca.

Kant Bhatia, S., Mehariya, S., Kant Bhatia, R., Kumar, M., Pugazhendhi, A., Kumar Awasthi, M., . . . Yang, Y.-H. (10 de January de 2021). Wastewater based microalgal biorefinery for bioenergy production: Progress and challenges. *Science of the Total Environment, 751*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141599

Kesaano, M., & Sims, R. C. (2014). Algal biofilm based technology for wastewater treatment. *Algal Research, 5*, 231-240. doi:https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.02.003

Khademi, F., Yildiz, I. I., Yildiz, A. C., & Abachi, S. (2015). Advances in algae harvesting and extracting technologies for biodiesel production. *Progress in Clean Energy, 2*, 65-82. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-17031-2_6

Khalekuzzaman , M., Alamgir, M., Islam, M., & Hasan, M. (2019). A simplistic approach of algal biofuels production from wastewater using a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor and Photobioreactor (HABR-PBR) System. *PLoS ONE*. doi:10.1371

Kitchenham, B., Dybå, T., & Jørgensen, M. (2004). Evidence-based software engineering. *Proceedings. 26th International Conference on Software Engineering*, 273-281. doi:10.1109/ICSE.2004.1317449

Kothari, R., Ahmad, S., Pathak, V. V., Pandey, A., Kumar, A., Raju, S., . . . Tyagi, V. V. (2019). Algal-based biofuel generation through flue gas and wastewater utilization: a sustainable prospective approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*. doi:https://doi.org/10.1007/s13399-019-00533-y

Kotoula, D., Iliopoulou, A., Irakleous-Palaiologou, E., Gatidou, G., Aloupi, M., Antonopoulou, P., . . . Stasinakis , A. S. (2020). Municipal wastewater treatment by combining in series microalgae Chlorella sorokiniana and macrophyte Lemna minor: Preliminary results. *Journal of Cleaner Production, 271*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122704

Kumar Duran, S., Kumar, P., & Sandhu, S. (2018). A review on microalgae strains, cultivation, harvesting, biodiesel conversion and engine implementation. *Biocombustibles*. doi:https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1457314

Kumar, R., & Pal, P. (2015). Assessing the feasibility of N and P recovery by struvite precipitation from nutrient-rich wastewater: a review. *Environmental Science and Pollution Research, 22*. doi:https://doi.org/10.1007/s11356-015-5450-2

Laurens, L. (2017). State of Technology Review - Algae Bioenergy. *An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project*. doi:10.13140/RG.2.2.11770.90560

Lee, Y.-J., & Lei, Z. (2019). Microalgal-bacterial aggregates for wastewater treatment: A mini-review. *Bioresource Technology Reports, 8*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100199

Leng, L., Zhang, W., Leng, S., Chen, J., Yang, L., Li, H., . . . Huang, H. (2020). Bioenergy recovery from wastewater produced by hydrothermal processing

biomass: Progress, challenges, and opportunities. *Science of The Total Environment, 748*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142383

Li, K., Liu, Q., Fang, F., Luo, R., Lu , Q., Zhou, W., . . . Ruan, R. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource Technology, 291*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121934

Lin, C.-Y., Thi Nguyen, M.-L., & Lay, C.-H. (2017). Starch-containing textile wastewater treatment for biogas and microalgae biomass production. *Journal of Cleaner Production, 168*, 331-337. doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.036

Marín, D., Carmona Martínez, A., Blanco, S., Lebrero , R., & Muñoz, R. (2021). Innovative operational strategies in photosynthetic biogas upgrading in an outdoors pilot scale algal-bacterial photobioreactor. *Chemosphere, 264*. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128470

Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217-232.

Mathimani, T., & Mallick, N. (2018). A comprehensive review on harvesting of microalgae for biodiesel – Key challenges and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91*, 1103-1120. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.083

Mathimani, T., Baldinelli, A., Rajendran, K., Prabakar, D., Matheswaran, M., Pieter van Leeuwen, R., & Pugazhendhi, A. (2019). Review on cultivation and thermochemical conversion of microalgae to fuels and chemicals: Process evaluation and knowledge gaps. *Journal of Cleaner Production, 208*, 1053-1064. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.096

Menegazzo, M. L., & Fonseca, G. G. (2019). Biomass recovery and lipid extraction processes for microalgae biofuels production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 107*, 87-107. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.064

Min, C., Lee, E. O., Tau, L., Eng-Poh, N., Hwei, L., & Joon Ching, J. (2020). Conversion of Microalgae Biomass to Biofuels. En A. Yousuf (Ed.), *Microalgae Cultivation for Biofuels Production* (págs. 149-161). doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817536-1.00010-2

Mishra, S., Roy, M., & Mohanty, K. (2019). Microalgal bioenergy production under zero-waste biorefinery approach: Recent advances and future perspectives. *Bioresource Technology, 292*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122008

Miyawaki, B., Mariano, A. B., Vargas, J. V., Balmant, W., Defrancheschi, A. C., Correa, D. O., . . . Kava, V. M. (2021). Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment. *Renewable Energy, 163*, 1153-1165. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.045

Molina Grima, E., Belarbi, E. H., Acién Fernández, F. G., Robles Medina, A., & Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and

economics. *Biotechnology Advances, 20*(7-8), 491-515. doi:https://doi.org/10.1016/S0734-9750(02)00050-2

Mondal, M., Goswami, S., Ghosh, A., Oinam, G., Tiwari, O. N., Das, P., . . . Halder, G. N. (2017). Production of biodiesel from microalgae through biological carbon capture: a review. *3 Biotech, 7*(99). doi:https://doi.org/10.1007/s13205-017-0727-4

Moreno, J. (2011). *Estudio de cosechado de cultivos de microalgas en aguas residuales mediante técnicas de coagulación - floculación.* doi:https://www.researchgate.net/publication/233398562

Naaza, F., Bhattacharya, A., Pant, K., & Malik, A. (2019). Investigations on energy efficiency of biomethane/biocrude production from pilot scale wastewater grown algal biomass. *Applied Energy, 254*. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113656

Nayak, J. K., & Ghosh, U. K. (2019). Post treatment of microalgae treated pharmaceutical wastewater in photosynthetic microbial fuel cell (PMFC) and biodiesel production. *Biomass and Bioenergy, 131*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105415

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). *AQUASTAT*. Recuperado el 2021, de http://www.fao.org/aquastat/statistics/query/results.html

Parmentier, D., Manhaeghe, D., Baccini, L., Meirhaeghe, R. V., Rousseau, D. P., & Hulle, S. V. (2020). A new reactor design for harvesting algae through electrocoagulation-flotation in a continuous mode. *Algal Research, 47*. doi:https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101828

Pawar, S. (2016). Effectiveness mapping of open raceway pond and tubular photobioreactors for sustainable production of microalgae biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62*, 640-653. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.074

Peng, L., Fu, D., Chu, H., Wang, Z., & Qi, H. (2020). Biofuel production from microalgae: a review. *Environmental Chemistry Letters, 18*, 285-297. doi:https://doi.org/10.1007/s10311-019-00939-0

Phwana, C., Ong, H., Chen, W., Ling, T., Ng, E., & Show, P. (2018). Overview: Comparison of pretreatment technologies and fermentation processes of bioethanol from microalgae. *Energy Conversion and Management, 173*, 81-94. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.054

Ramos, X. (20 de Diciembre de 2020). Más del 90 % de los municipios del Ecuador no tratan las aguas residuales de acuerdo a la normativa. *EL UNIVERSO*.

Rangel-Basto, Y. A., García-Ochoa, I. E., Suarez-Gelvez, J. H., Zuorro, A., Barajas-Solano, A. F., & Urbina-Suarez, N. A. (2018). The Effect of Temperature and Enzyme Concentration in the Transesterification Process of Synthetic Microalgae Oil. *Chemical Engineering Transactions, 64*, 331-336. doi:https://doi.org/10.3303/CET1864056

Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy, 88*(10), 3411-3424. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025

Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2013). Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy, 103*, 444-467. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.004

Rezvani, S., Moheimani, N. R., & Bahri, P. A. (2016). Techno-economic assessment of CO2 bio-fixation using microalgae in connection with three different state-of-the-art power plants. *Computers & Chemical Engineering, 84*, 290-301. doi:https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.09.001

Richardson, J. W., Johnson, M. D., Lacey, R., Oyler, J., & Capareda, S. (2014). Harvesting and extraction technology contributions to algae biofuels economic viability. *Algal Research, 5*, 70-78. doi:https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.05.007

Rúa Orozco, D. J., Escobar Palacio, J. C., Lora, E., Venturini, O. J., & Barros, R. (26 de 03 de 2015). Procesos biológicos de conversión. 123-164. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/312535899_Procesos_biologicos_de_conversion

Rusten, B., & Sahu, A. K. (2011). Microalgae growth for nutrient recovery from sludge liquor and production of renewable bioenergy. *Water Science & Technology, 64*(6). doi:https://doi.org/10.2166/wst.2011.722

Sandeep, P., Mishra, S., Akcil, A., & Kucuker, M. (2020). Microalgal potential for nutrient-energy-wastewater nexus: Innovations, current trends and future directions. *Energy & Environment*. doi:https://doi.org/10.1177/0958305X20955187

Santos Ballardo, D., Rossi, S., Reyes Moreno, C., & Valdez Ortiz, A. (2016). Microalgae potential as a biogas source: current status, restraints and future trends. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology volume*, 243-264. doi:https://doi.org/10.1007/s11157-016-9392-z

Saranya, D., & Shanthakumar, S. (2019). Green microalgae for combined sewage and tannery effluent treatment: Performance and lipid accumulation potential. *Journal of Environmental Management, 241*, 167-178. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.031

Sasongko, N., Noguchi, R., Ito, J., Demura, M., Ichikawa, S., Nakajima, M., & Watanabe, M. (2018). Engineering Study of a Pilot Scale Process Plant for Microalgae-Oil Production Utilizing Municipal Wastewater and Flue Gases: Fukushima Pilot Plant. *Energies, 11*(7). doi:10.3390 / en11071693

Savage, P. E., & Hestekin, J. A. (2013). A perspective on algae, the environment, and energy. *Environmental Progress & Sustainable Energy, 32*, 877-883.

Shahid, A., Malik, S., Zhu, H., Xu, J., Nawaz, M. Z., Nawaz, S., . . . Mehmood, M. (2020). Cultivating microalgae in wastewater for biomass production, pollutant removal, and atmospheric carbon mitigation; a review. *Science of the Total Environment, 704*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135303

Show, K.-Y., Yan, Y., Ling, M., Ye, G., Li, T., & Lee, D.-J. (2018). Hydrogen production from algal biomass – Advances, challenges and prospects. *Bioresource Technology, 257*, 290-300. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.105

Show, P., Tang, M., Nagarajan, D., Ling, T., Ooi, C.-W., & Chang, J.-S. (2017). A Holistic Approach to Managing Microalgae for Biofuel Applications. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 215*(18). doi:https://doi.org/10.3390/ijms18010215

Simas-Rodrigues, C., Villela, H. D., Martins, A. P., Marques, L. G., Colepicolo, P., & Tonon, A. P. (2015). Microalgae for economic applications: advantages and perspectives for bioethanol. *Journal of Experimental Botany, 66*, 4097-4108. doi:https://doi.org/10.1093/jxb/erv130

Singh, A., & Olsen, S. I. (2011). A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. *Applied Energy, 88*, 3548-3555. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.012

Soares, R., Martins, M., & Gonçalves, R. (2019). A conceptual scenario for the use of microalgae biomass for microgeneration in wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management, 252*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109639

Sun, Y., Chen, Z., Wu, G., Wu, Q., Zhang, F., Niu, Z., & Hu, H.-Y. (2016). Characteristics of water quality of municipal wastewater treatment plants in China: implications for resources utilization and management. *Journal of Cleaner Production, 131*, 1-9. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.068

Sundar, P., Gopinath, K., Arun, J., Pavithra, K., Pavendan, K., & Adithya, J. (2020). An insight into carbon balance of product streams from hydrothermal liquefaction of Scenedesmus abundans biomass. *Renewable Energy*. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.011

Suparmaniam, U., Lam, M. K., Uemura, Y., Lim, J.-W., Lee, K. T., & Shuit, S. H. (2019). Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 115*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109361

Tan, X. B., Lam, M. K., Uemura, Y., Lim, J. W., Wong, C. Y., & Lee, K. T. (2018). Cultivation of microalgae for biodiesel production: A review on upstream and downstream processing. *Chinese Journal of Chemical Engineering, 26*, 17-30. doi:https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.08.010

Tang, H., Chen, M., Ng, S., & Salley, S. O. (2012). Continuous microalgae cultivation in a photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering, 109*, 2468-2474. doi:https://doi.org/10.1002/bit.24516

Tango, M. D., Calijuri, M. L., Assemany, P. P., & do Couto, E. (2018). Microalgae cultivation in agro-industrial effluents for biodiesel application: effects of the availability of nutrients. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research, 78*(1-2), 57-68. doi:https://doi.org/10.2166/wst.2018.180

Tiong, L., Komiyama, M., Uemura, Y., & Thanh Nguyen, T. (2016). Catalytic supercritical water gasification of microalgae: Comparison of Chlorella vulgaris

and Scenedesmus quadricauda. *The Journal of Supercritical Fluids, 107*, 408-413. doi:https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.10.009

Tran, D.-T., Yeh, K.-L., Chen, C.-L., & Chang, J.-S. (2012). Enzymatic transesterification of microalgal oil from Chlorella vulgaris ESP-31 for biodiesel synthesis using immobilized Burkholderia lipase. *Bioresource Technology*, 119-127. doi:10.1016/j.biortech.2011.12.145

Vandamme, D., Foubert, I., & Muylaert, K. (2013). Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. *Trends in Biotechnology, 31*(4), 233-239. doi:https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.12.005

Vasistha, S., Khanra, A., Clifford, M., & Rai, M. P. (2021). Current advances in microalgae harvesting and lipid extraction processes for improved biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110498

Vassallea, L., Díez-Monterob, R., Machado, R., Moreira, C., Ferrer, I., Mota, C., & Passos, F. (2020). Upflow anaerobic sludge blanket in microalgae-based sewage treatment: Codigestion for improving biogas production. *Bioresource Technology, 300*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122677

Vieira de Mendonça, H., Assemany, P., Abreu, M., Couto, E., Maciel, A. M., Duarte, R. L., . . . Reis, A. (2021). Microalgae in a global world: New solutions for old problems? *Renewable Energy, 165*, 842-862. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.014

Vij, R. K., Subramanian, D., Pandian, S., Krishna, S., & Hari, S. (2021). A review of different technologies to produce fuel from microalgal feedstock. *Environmental Technology & Innovation, 22*. doi:https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101389

Vuppaladadiyam, A. K., Prinsen, P., Raheem, A., Luque, R., & Zhao, M. (2018). Sustainability Analysis of Microalgae Production Systems: A Review on Resource with Unexploited High-Value Reserves. *Environmental Science & Technology, 52*(24). doi:https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02876

WWAP. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado.* París: UNESCO.

Xiaogang, H., Jalalah, M., Jingyuan, W., Zheng, Y., Li, X., & Salama, E.-S. (2020). Microalgal growth coupled with wastewater treatment in open and closed systems for advanced biofuel generation. *Biomass Conversion and Biorefinery*. doi:https://doi.org/10.1007/s13399-020-01061-w

Yang, S., Salama, S., Oh Kim, J., Govindwar, S., Kurade , M., Lee, M., . . . Hun, B. (2016). Cultivation and harvesting of microalgae in photobioreactor for biodiesel production and simultaneous nutrient removal. *Energy Conversion and Management*, 54-62. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.017

Zabed, H. M., Akter, S., Yun, J., Zhang, G., Zhang, Y., & Qi, X. (2020). Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109503

Zhan, J., Rong, J., & Wang, Q. (23 de March de 2017). Mixotrophic cultivation, a preferable microalgae cultivation mode for biomass/bioenergy production, and bioremediation, advances and prospect. *International Journal of Hydrogen Energy, 42*, 8505-8517. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.021

Zhu, L. (2015). Microalgal culture strategies for biofuel production: a review. *Biofuels Bioproducts & Biorefining, 9*(6), 801-814.

8 APÉNDICES

Apéndice 1-8: *Listado de países, por continentes de la revisión inicial de publicaciones en Scopus.*

País	Publicaciones	Continente o Área geográfica
China	308	Asia
India	241	Asia
Estados Unidos	156	América del Norte
España	148	Europa
Brasil	115	América Latina
Malasia	107	Asia
Corea del Sur	81	Asia
Australia	62	Australia y Oceanía
Reino Unido	60	Europa
Italia	58	Europa
Egipto	50	África
Portugal	48	Europa
Canadá	43	América del Norte
Taiwan	42	Asia
México	40	América Latina
Francia	38	Europa
Sudáfrica	37	África
Iran	33	Asia
Indonesia	30	Asia
Holanda	30	Europa
Nueva Zelanda	30	Australia y Oceanía
Japón	26	Asia
Arabia Saudita	26	Asia
Viet Nam	26	Asia
Tailandia	25	Asia
Pakistán	22	Asia
Finlandia	21	Europa
Alemania	21	Europa
Bélgica	20	Europa
Suecia	18	Europa
Singapur	16	Asia
Grecia	15	Europa
Polonia	14	Europa
Túnez	14	África
Chile	12	América Latina
República Checa	12	Europa
Noruega	12	Europa
Dinamarca	12	Europa
Qatar	10	Asia
Bangladesh	9	Asia
Colombia	9	América Latina
Hungría	9	Europa
Ecuador	8	América Latina
Federación Rusa	8	Asia
Hong Kong	6	Asia
Irlanda	6	Europa

Emiratos Árabes Unidos	6	Asia
Argelia	5	África
Austria	4	Europa
Honduras	4	América Latina
Israel	4	Asia
Nicaragua	4	América Latina
Suiza	4	Europa
Etiopia	3	África
Lebanon	3	Asia
Romania	3	Europa
Estonia	2	Europa
Iraq	2	Asia
Lituania	2	Europa
Macao	2	Asia
Marruecos	2	África
Nigeria	2	África
Omán	2	Asia
Ruanda	2	África
Eslovenia	2	Europa
Argentina	1	América Latina
Armenia	1	Asia
Brunéi Darussalam	1	Asia
Bulgaria	1	Europa
Mauritania	1	África
Myanmar	1	Asia
Namibia	1	África
Nepal	1	Asia
Perú	1	América Latina
Filipinas	1	Asia
Serbia	1	Europa
Islas Solomon	1	Australia y Oceanía
Sri Lanka	1	Asia
Sudan	1	África
Ucrania	1	Europa