



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE LAS TECNOLOGÍAS
CONVENCIONALES Y MEJORADAS CON GRANULACIÓN ALBA PARA
LA COSECHA DE MICROALGAS CULTIVADAS EN EL TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES CON FINES DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.**

Giselle Marian Cruz Torrado
Kevin Adrián Camargo Gómez
Ingeniería en Energía

Prof. Alexander Meneses Jácome

Bucaramanga, Santander, Colombia
2020

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. MARCO REFERENCIAL	6
2.1. Estado del arte	6
2.2. Conceptos Fundamentales	7
2.2.1. Cultivo	7
2.2.2. Cosecha	10
2.2.3. Conversión	12
2.3. Planteamiento del problema	15
3. OBJETIVOS	16
3.1. Objetivo general	16
3.2. Objetivos específicos (OE)	16
4. METODOLOGÍA	17
4.1. Organización y enfoque	17
4.2. Aspectos instrumentales	18
5. RESULTADOS	19
5.1. Etapas y parámetros determinantes del desempeño energético de los sistemas de microalgas.....	19
5.2. Análisis de las secciones y parámetros definidos para los sistemas de microalgas	22
5.2.1. Etapa de cultivo	22
5.2.1.1. Tipo de biomasa	26
5.2.2. Etapa de Cosecha.....	29
5.2.2.1. Consumo de energía de la(s) tecnología(s) de cosecha	29
5.2.2.2. Sedimentación de la biomasa.....	33
5.2.3. Etapa de conversión de la biomasa cosechada	37
5.3. Técnica de Granulación ALBA como alternativa de mejoramiento de sistemas convencionales de microalgas	40
5.3.1. Consorcio de microalgas y bacterias	40
5.3.2. Escenario alternativo para la(s) tecnología(s) de cosecha	41
5.3.3. Comparación entre sistemas que poseen implementación ALBA y los convencionales	42
6. CONCLUSIONES	44
7. RECOMENDACIONES.....	46
8. BIBLIOGRAFÍA.....	47
9. ANEXOS	52
9.1. Método estadístico para el análisis de datos	52

RESUMEN

Las microalgas ofrecen muchas ventajas en la producción de biocombustibles al no competir con tierras agrícolas para su cultivo y favorecer la captura de CO₂ evitando su emisión a la atmósfera; además son la alternativa más factible para el tratamiento de aguas residuales por el aprovechamiento de contaminantes de las aguas, como el nitrógeno (N) y fósforo (P), como nutrientes para su crecimiento, y por su alta capacidad fotosintética. A pesar del prometedor rol de las microalgas en los escenarios de biocombustibles y energía renovable, algunas etapas de la producción consumen mucha energía haciendo ineficiente el sistema, como la etapa de cosecha y pretratamiento de la biomasa cosechada para su conversión al producto deseado. Este proyecto se enfoca en la etapa de cosecha, revisando y analizando la literatura para establecer rangos de consumo de energía para cada tecnología reportada de la etapa de cosecha de sistemas convencionales de producción de biogás a partir de microalgas. También se revisan los parámetros de sedimentación de sistemas convencionales para compararlos, junto con los rangos de consumo de energía previamente establecidos, con el escenario de un sistema mejorado mediante la técnica de granulación ALBA en el cultivo de microalgas, en donde se busca formar consorcios entre las microalgas y las bacterias agregadas para facilitar la sedimentación natural y/o reducir el uso de más tecnologías para la cosecha, minimizando así el consumo de energía y el impacto del consumo de dicha etapa en el sistema.

ABSTRACT

Microalgae offer many advantages in the production of biofuels as they do not compete with agricultural land for cultivation and favor the capture of CO₂, avoiding its emission into the atmosphere. Furthermore, they are the most feasible alternative for wastewater treatment because of the use of water pollutants such as nitrogen (N) and phosphorus (P) as nutrients for your growth, and because of their high photosynthetic capacity. Despite the promising role of microalgae in the biofuel and renewable energy scenarios, some stages of production are energy intensive making the system inefficient, such as the harvesting stage and pre-treatment of the harvested biomass for conversion to biofuel. This project focuses on the harvesting stage, reviewing and analyzing the literature to establish energy consumption ranges for each technology reported from the harvesting stage of conventional microalgae-based biogas production systems. The sedimentation parameters of conventional systems are also reviewed to compare them, together with the previously established energy consumption ranges, with the scenario of an improved system using the ALBA granulation technique in microalgae culture, where it is sought to form consortia between microalgae and bacteria added to facilitate natural sedimentation and/or reduce the use of more technologies for harvesting, thus minimizing energy consumption and the impact of the consumption of that stage in the system.

1. INTRODUCCIÓN

En un contexto de cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles, existe un creciente interés de los actores industriales y académicos en las fuentes de energía renovables y especialmente en la producción de energía basada en la transformación de biomasa. El uso de recursos hídricos para producir bioetanol y biodiesel generalmente induce un menor potencial de cambio climático, pero puede crear otros problemas ambientales y generar competencia con los cultivos alimentarios por el uso de tierras cultivables [1].

Los biocombustibles de primera generación, como el aceite de palma, el maíz y otros cultivos alimentarios, han generado grandes disputas sobre su contribución al aumento de los precios de los alimentos y el descuido de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a los cambios en el uso de la tierra. Muchos autores afirman que la conversión de cultivos alimentarios en biocombustibles es insostenible, no solo por la amenaza del suministro de alimentos, sino también por el aumento de la tasa de deforestación y los daños a la biodiversidad [2] [3] [4].

El biocombustible a base de microalgas se ha señalado como una alternativa interesante debido a la alta productividad de las microalgas por hectárea y por año, su capacidad para reciclar CO₂ de los gases de combustión, posiblemente alto (30–50 wt%) contenido de aceite y alta eficiencia fotosintética. Además, en comparación con los de los cultivos alimentarios, son las plantas de rápido crecimiento que no compiten por la tierra agrícola ya que pueden crecer en estanques o fotobiorreactores verticales (PBR), por lo que tienen un bajo requerimiento de tierra [1] [2] [5] [6] [7] [8] [9].

Las microalgas y las cianobacterias representan una familia muy grande de microorganismos fotosintéticos. Pueden producir grandes cantidades de carbohidratos o triglicéridos (lípidos) según las especies y las condiciones de cultivo. Estos compuestos son materias primas para la producción de diferentes tipos de biocombustibles, como biodiesel o bioetanol, biogás por digestión anaerobia directa, o calor y electricidad por combustión [10] [11].

El cultivo de microalgas para combustible no es un concepto nuevo y fue el foco de un extenso programa de investigación en los Estados Unidos de 1978 a 1996. Desde el pico del precio del petróleo de 2008, la cantidad de trabajos de investigación publicados y compañías que hacen anuncios sobre el desarrollo de algas ha crecido exponencialmente [12].

A pesar del potencial de los biocombustibles de algas como fuente de energía renovable, su producción presenta varios inconvenientes como la

alta demanda de agua durante el cultivo de microalgas, altos requerimientos de energía y agotamiento de fósforo mineral asociados con el consumo de fertilizantes, altos requerimientos de energía asociados con la cosecha y el secado de la materia prima de biomasa [6] [9] [10].

El uso de aguas residuales para el cultivo de algas parece tener ventajas sobre la producción convencional de microalgas, ya que el agua dulce y los nutrientes necesarios para el crecimiento de algas pueden ahorrarse, lo que reduce los posibles impactos ambientales. Además, las aguas residuales consumidas en el cultivo de algas reducen la purificación intensiva de energía de las aguas residuales en las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales [13].

La falta de instalaciones industriales reales dedicadas a la producción de energía a partir de microalgas implica el uso de modelos y extrapolaciones para describir los sistemas de producción y su rendimiento. Además, hasta ahora no ha surgido ningún proceso de cosecha único con una factibilidad superior para su aplicación a gran escala comercial, debido principalmente a la diferencia en la importancia relativa de los criterios tecnológicos, económicos y ambientales para cada proceso de cosecha que depende de la cepa utilizada y los productos finales [5] [14].

En consecuencia, se producen muchas diferencias en los sistemas publicados desde una perspectiva técnica (sistemas de cultivo, especies de microalgas, procesos de recolección y desagüe, energía producida) y metodológica (unidades funcionales, perímetros, métodos de asignación de coproductos). Por lo tanto, se debe superar una curva de aprendizaje en su camino lleno de baches hacia la comercialización, que requiere no solo esfuerzos dedicados de investigación, desarrollo y demostración, sino también objetivos claros de la sociedad [5] [9] [11].

Una alternativa para los inconvenientes de los sistemas convencionales de cultivo de microalgas es la implementación de consorcios conformados por microalgas y bacterias, ya que pueden contribuir a la reducción de los elevados gastos que el sistema convencional presenta. Otra ventaja de este consorcio es que en una sola etapa se puede llegar a dar la eliminación de la materia orgánica y la remoción de los nutrientes [12].

Sin embargo, este tipo de tecnología necesita ser más estudiada y desarrollada ya que para la aceptación de su aplicación comercial se ve necesario su optimización y operación bajo condiciones reales de operación las cuales se pueden llegar a conseguir si se profundiza en el aprendizaje de las interacciones que se pueden llegar a dar en el consorcio [15].

2. MARCO REFERENCIAL

El panorama del estudio, contexto y alcance fueron establecidos durante la etapa de preparación de la propuesta, particularmente a través del desarrollo del estado del arte, el cual se ha ampliado y direccionado para definir los objetivos de este.

2.1. Estado del arte

El uso de la tecnología de microalgas para remediación de efluentes contaminados y la generación simultánea de bioenergía ha cobrado vigencia como tema de investigación y desarrollo en los últimos 20 años [8] [3] [16].

Entre los enfoques más utilizados para estudiar el potencial de esta tecnología, están los que abordan su análisis desde una perspectiva energética, y más específicamente los que evalúan las tecnologías de cosecha, pues existe una correlación directa entre el consumo de energía, la eficiencia de sedimentación o de los procesos de separación de la biomasa algal y su calidad, la cual determina su destino o uso final como biocombustible [9] [10].

Siguiendo con los consumos energéticos, algunos estudios abarcan varias tecnologías de cosecha para compararlas y plantear las más eficientes respecto a su desempeño, estableciendo escenarios óptimos para la cosecha y lineamientos para el análisis de las tecnologías [14] [7].

En algunos campos específicos de investigación y desarrollo de las tecnologías, en especial los que proponen la producción de biocombustibles a partir de la biomasa algal cosechada, se observa más favorabilidad para la producción de biogás que otras aplicaciones de la biomasa debido a menores exigencias técnicas y, por ende, a menores requerimientos energéticos de los procesos de conversión, los cuales dependen de etapas anteriores, como la cosecha, porque determinan la calidad de la biomasa tratada e indirectamente determinan su destinación final [1] [6] [17].

Asimismo, también crece el interés por valorar el impacto ambiental de la bioenergía derivada de procesos de microalgas utilizados como sistemas de tratamiento de aguas residuales, en especial las de tipo urbano. Este enfoque desarrolla un importante aporte al mejor entendimiento de los aspectos energéticos mediante las metodologías utilizadas, que en su mayoría responden al enfoque de ciclo de vida, el cual enfatiza en la

recolección de información de inventario con muy buena calidad, enriqueciendo la base del conocimiento requerida en la evaluación energética y ambiental de estos procesos [1] [13] [18] [19].

En otro frente de trabajo, la evolución tecnológica de las tecnologías de sedimentación o cosecha de las microalgas tiene como finalidad el desarrollo de entidades granulares que sedimenten naturalmente o que faciliten la operación de los equipos mecánicos de las tecnologías de recolección secundaria de la cosecha, para así reducir costos y consumos de energía. Según esto, una de las alternativas más prometedoras consiste en la agregación de bacterias para formar consorcios de microalga-bacteria, conocido como granulación ALBA. Por ello, ciertos grupos de bacterias juegan un papel clave en la floculación, como de *Chlorella vulgaris*, mostrando potencial para formar consorcios con mejores propiedades de sedimentación de acuerdo con pruebas experimentales realizadas para comprobarlo [15] [12].

2.2. Conceptos Fundamentales

Por otra parte, la revisión del estado del arte ha permitido identificar los principales conceptos y nociones para el estudio y análisis de los actuales sistemas de producción de microalgas. Primeramente, se definen las etapas principales de los sistemas convencionales, los cuales son cultivo, cosecha y conversión [2]. A continuación, se describe brevemente la información complementaria que ha sido recopilada, con el fin de contribuir al mejor entendimiento del presente trabajo.

2.2.1. Cultivo

Las microalgas se pueden cultivar de manera fotoautótrofa¹, heterótrofa o en condiciones de mixotrofia², siendo la primera el único método de producción de microalgas a gran escala que resulta económicamente rentable y técnicamente viable, ya que las microalgas son usualmente fotoautótrofas. Dichos cultivos utilizan la luz solar o artificial como fuente de energía, el dióxido de carbono (CO₂) como fuente de carbono y agua dulce o salina como base del medio de cultivo [20] [21].

Desde hace un buen tiempo el principal desafío para la etapa de cultivo ha sido el suministro de nutrientes, por lo que el uso de aguas residuales se trabajado como la mejor alternativa, ya que de esta manera se reduce el uso de agua dulce y brinda los nutrientes necesarios para el crecimiento de

¹ Cultivo con fuente de energía y carbono exclusivo de compuesto orgánicos [20].

² Cultivo similar al fotoautótrofo que utiliza luz solar como fuente de energía, pero con asimilación de fuente de carbono solo por los compuestos orgánicos [20].

algas, al tiempo que se disminuyen los principales impactos ambientales asociados al cultivo de microalgas para fines comerciales [14] [6] [13].

A pesar de las grandes ventajas de las aguas residuales para el cultivo de microalgas, pueden requerir ciertos procesos de purificación del afluente a tratar y de la biomasa cultivada, ya que las aguas residuales contienen contaminantes que afectan indicadores del cultivo como el pH y la remoción de nitrógeno (N) y fósforo (P), lo que resulta en mayores costos de capital y operación, en especial debidos a un mayor uso de energía primaria en los procesos de separación [22].

Además del rol importante del afluente de aguas residuales en el cultivo, el componente clave para la etapa es el biorreactor, especialmente por su gran incidencia en la concentración de biomasa que se alcanza en el cultivo, el cual es un parámetro determinante en la eficiencia de sedimentación y del consumo de energía asociado al mismo.

Según la literatura, para los cultivos de microalgas los reactores de flujo continuo más investigados de cara a posibles aplicaciones a escala real son los Estanques abierto, con sus siglas en inglés OPR (Open Pond Raceways) y los Fotobiorreactores, con sus siglas en inglés PBR (Photobioreactors) ilustrados en las figuras 1 y 2, respectivamente. Los primeros, se muestran más adaptados para producciones en masa, pero acusan tasas de crecimiento más bajas y riesgo de contaminación por microorganismos parásitos, altas pérdidas por evaporación y difusión de CO₂ al aire, entre otras desventajas ambientales y operacionales [7] [8].

En contraste, los PBR se destacan por controlar la entrada de especies exóticas que puedan contaminar el cultivo y concentrar casi 2,6 veces más la biomasa producida que los OPR, pero esto no compensa la alta demanda de energía inicial del PBR, que consume 14 veces más energía que el OPR por volumen de salida, debido a elementos como el mezclado típico, iluminación por luces artificiales, inyección de nutrientes y otros elementos requeridos para el acondicionamiento del cultivo [10] [6] [23].

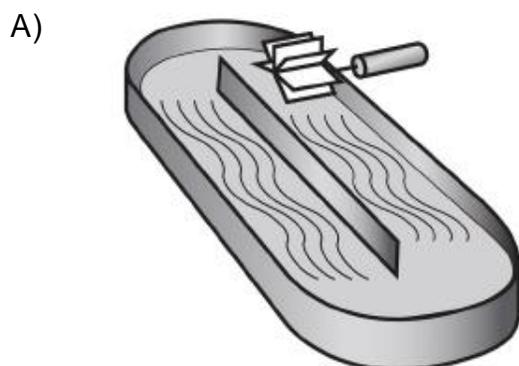


Figura 1. Ilustración de los biorreactores OPR. A) Figura esquemática, tomado de [24], B) Fotografía ilustrativa, tomado de [25].

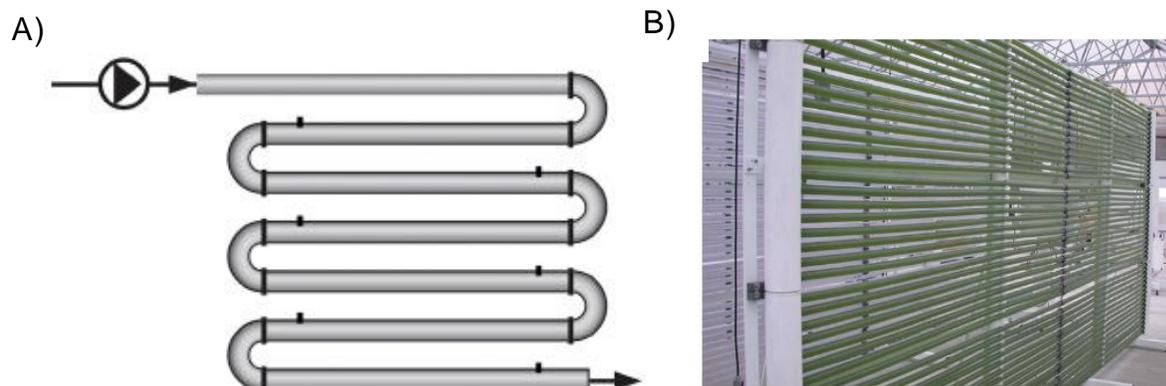


Figura 2. Ilustración de los biorreactores PBR. A) Figura esquemática, tomado de [24], B) Fotografía ilustrativa, tomado de [25].

Los cultivos también trabajan de distintas formas según el flujo del afluente y el volumen, siendo continuo, semicontinuo o batch. Si es continuo las condiciones de cultivo se mantienen constantes por largos períodos de tiempo sin interrupciones, semicontinuo cuando el cultivo se da por períodos de tiempo, pero manteniendo una parte del volumen cultivado, y batch es cuando el cultivo no necesita supervisión directa para que se ejecute [7] [1] [21] [8].

La selección de las especies de microalgas a cultivar también es determinante pues cada una tiene características específicas con potenciales diferentes, de las cuales la más estudiada es la familia de la *Chlorella vulgaris sp.*, la cual se destaca por su adaptabilidad para el crecimiento en aguas residuales, por prosperar en diversos hábitats y por su potencial para la producción de biocombustibles gracias a un perfil de ácidos grasos saturados y buena productividad de biomasa [7] [23].

Otras especies también cuentan con alto contenido de lípidos y viabilidad de crecimiento en aguas residuales, como el *Nannochloropsis oculata sp.* y la *Scenedesmus dimorphus sp.* Sin embargo, algunas de estas especies tienen un tamaño relativamente pequeño (2–4 μm), lo que dificulta la sedimentación natural, obligando el uso de flocculantes y métodos mecánicos para su recolección y aumentando los costos de operación, así como el consumo de energía [10] [6] [18] [4].

Además, algunas especies también tienen paredes celulares muy rígidas lo que dificulta la extracción de lípidos para la conversión en biocombustibles o bioproductos de valor comercial, aunque especies como *Haematococcus*

pluvialis sp. presentan células relativamente grandes (19–29 µm) que supondrían una mejor sedimentabilidad natural [6] [2].

Otra especie en particular es la *Spirulina platensis* sp., la cual su crecimiento puede ser autótrofo o heterótrofo, de forma que su fuente de energía puede ser la luz o la materia orgánica, manteniendo altas tasas de crecimiento en medios alcalinos que limitan el crecimiento de especies contaminantes. Se destaca por tener un elevado contenido de proteínas, siendo también una especie muy demandada comercialmente [26] [27] y con evidencia de prosperar en aguas residuales como medio de cultivo [28].

2.2.2. Cosecha

Esta etapa se compone de recolección primaria y secundaria, que en conjunto permiten la separación de la biomasa de microalgas del medio de cultivo, en este caso del agua residual. La recolección primaria se utiliza para reducir el volumen de lodo o “slurry” de microalgas húmedas, que se procesará durante la recolección secundaria, donde sus tecnologías a menudo requieren menos energía que las tecnologías secundarias.

El tamaño celular, la forma, la densidad, la carga superficial, la robustez y el contenido general de lípidos de la especie o cepa específica de microalgas determinan el rendimiento de la mayoría de las tecnologías de recolección, como también la composición química del medio de crecimiento (pH, nutrientes, salinidad, temperatura, densidad) [10].

En general, las tecnologías de cosecha se basan en procesos mecánicos, químicos o biológicos, o su combinación. Los mecánicos aplican fuerzas mecánicas o eléctricas para concentrar la biomasa microalgal, las químicas hacen uso de aditivos inorgánicos u orgánicos para mejorar la floculación-coagulación y los biológicos estimulan la floculación espontánea o natural (biofloculación) sin requerir productos químicos adicionales sino la formación de gránulos de microorganismos con mejores propiedades de sedimentación mediante interacciones de las microalgas con bacterias, hongos o incluso con otras especies de microalgas [14] [4].

Las tecnologías mecánicas incluyen la centrifugación, la sedimentación natural y la flotación; las químicas son principalmente floculación inducida por floculantes de polielectrolitos (polímeros) inorgánicos u orgánicos y, por último, las biológicas incluyen biofloculación que ocurre a pH alto, floculación causada por biopolímeros secretados y floculación microbiana [9].

Las tecnologías de centrifugación son las más utilizadas para recolección secundaria por lo que su eficiencia es importante en el sistema y en el consumo de energía, aunque dependen de las características físicas de las especies de algas, las dimensiones del recipiente del filtro y la magnitud de la aceleración centrífuga. El proceso implica una separación de fases de las células de microalgas de la suspensión mediante la aplicación de fuerza centrífuga, pero esto expone a las microalgas a disrupción celular y al daño estructural, junto a un gran consumo de energía [9] [10].

La sedimentación es la tecnología con menos consumo de energía ya que esta no se requiere ningún aditivo o subsistema para su funcionamiento, solo retener el afluente cierto tiempo y que la biomasa sedimente espontáneamente, pero, aunque por ello no consume más energía y sea más económica, su eficiencia es la más baja de todas las tecnologías ya que la mayoría de especies de microalgas no sedimentan fácilmente, y sus propiedades varía según la cepa de algas [10] [18].

La flotación funciona por la adherencia de burbujas de aire a las partículas de biomasa, llevándolas a la parte superior del separador donde son recogidas. A la flotación se le atribuye un menor consumo de energía que a la centrifugación, pero el uso de aditivos y químicos para mejorar el rendimiento requiere unidades de separación adicionales y mayores costos operacionales [9].

En cuanto a las tecnologías químicas de floculación-coagulación, la eficiencia depende del tipo de floculante utilizado pues las sales metálicas multivalentes (sulfato de aluminio, cloruro férrico, etc.) tienen mejor eficiencia de cosecha, siendo populares por su efectividad y alta disponibilidad, pero pueden afectar la calidad de los productos derivados de las microalgas, sea biodiesel, nutracéuticos o alimentos para animales [10] [6].

Un parámetro importante para tener en cuenta en la etapa de cosecha que se relaciona con la capacidad de sedimentación es la concentración de sólidos totales (TS), el cual se basa típicamente en el contenido de sólidos inicial de la suspensión de algas y el contenido de sólidos final requerido. Un alto TS significa que la tecnología de cosecha es eficiente en términos de concentración de materia seca presente en el afluente, lo que lleva a una alta eliminación de agua, mientras que un contenido sólido más bajo, por supuesto, reduciría el consumo de electricidad, pero eventualmente requeriría una mayor energía para el proceso posterior [14] [7] [18].

Dependiendo del tipo de tecnología de recolección (primaria o secundaria), existen rangos de concentración establecidos en la literatura, siendo de 1,5% a 10% para recolección primaria, o también denominados de baja

concentración, y de 12% a 27% para recolección secundaria o alta concentración [2].

La concentración de TS necesaria depende del producto deseado y la ruta de conversión (seca o húmeda) seleccionada, por ejemplo, la digestión anaeróbica de microalgas requiere un bajo contenido de TS, del 5% al 14%, mientras que la combustión directa requiere del 50% al 98%. Para la producción de biodiesel, la TS varía del 12% al 30% para la extracción en húmedo y del 10% al 95% para la extracción en seco [11].

2.2.3. Conversión

Corresponde a la transformación de la biomasa algal cosechada en un biocombustible o en producto de alto valor comercial, a través de procesos termoquímicos y bioquímicos. Se establecen dos rutas de procesamiento principales, la seca y la húmeda, las cuales dependen de las calidades de los productos a obtener y del manejo de la biomasa tratada.

Según la literatura, en la ruta seca los procesos más comunes son la pirólisis y transesterificación, mientras que para la ruta húmeda son la licuefacción hidrotérmica, la digestión anaerobia, el hidrotatamiento y la gasificación supercrítica. Entre todos ellos, el proceso con tecnología más establecida es la digestión anaerobia, cuyo producto objetivo es el biogás [19] [5].

La ruta seca tiene como objetivo minimizar el consumo de energía en el proceso de deshidratación de la biomasa. En esta ruta, además de los procesos de conversión, se utilizan pretratamientos como la ruptura celular y el secado térmico, a menudo seguido de procesos de extracción de lípidos o aceites para obtener el componente requerido para los procesos de conversión, en esencia libre de agua. Para la ruta húmeda, el objetivo es mantener toda la cadena de microalgas en la fase húmeda, lo cual reduce el consumo de energía al ser menos exigente en términos de deshidratación de la biomasa de las microalgas [5].

A partir de lo anterior se plantea que la remediación de efluentes con microalgas para fines de biogás sea una ruta tecnológicamente con mayor posibilidad de consolidación que la producción de biodiesel o de otros derivados, postulando el enfoque escogido para el presente estudio en donde se trata de analizar críticamente la realidad energética de las tecnologías de cosecha para los sistemas de cultivo de microalgas en remediación de efluentes, teniendo en cuenta el potencial de aplicación inmediata una vez sean subsanadas las limitaciones técnicas en materia de separación de la biomasa.

Esta decisión se refuerza con el hecho de que los postratamientos para valorización de biogás en general también son tecnologías muy conocidas, estandarizadas y de menor costo que los requeridos para refinar otros productos de las microalgas. La figura 3 presenta de manera sintetizada las rutas de conversión para la producción de distintos biocombustibles a partir de microalgas, según las rutas previamente descritas de manera puntual.

Es importante señalar que los distintos productos descritos en la figura 3 pueden ser calificados con base en su rendimiento energético para conversión a biocombustibles gracias al NER (Relación de Energía Neta), el cual define la relación de energía neta entre el consumo y la producción de energía, siendo un indicador de la eficacia energética general para la etapa de conversión, donde un valor mayor a 1 significa una conversión positiva en términos energéticos [3].

Además del NER, otro indicador utilizado para la definición del rendimiento energético es el FER (Relación de Energía Fósil) que se define como la relación entre la energía del producto final de combustible y la cantidad de energía fósil requerida para fabricar el combustible, proporcionando una medida sustituta para la renovabilidad del biocombustible, por lo que, al igual que el NER, los valores FER de más de 1 son deseables [5] [29].

Con base en los indicadores, el NER estimado para este proyecto confirma que la producción de biogás es más eficiente energéticamente que la producción de biodiesel en la etapa de conversión, como también la ruta húmeda sobre la ruta seca; además, los biocombustibles algales tienen mayor FER que diésel convencional [6] [19] [2] [3].

Aunque el NER/FER estimado para el proyecto se enfoque en la etapa de conversión, algunos estudios utilizan dichos indicadores para el sistema completo de microalgas, particularmente para el cultivo, en el cual los resultados apuntan a un mayor NER para los OPR que los PBR, con una diferencia cuantitativa muy considerable [23] [30].

Para el mejor entendimiento de la etapa de conversión, se realizó un diagrama con la mayoría de los procesos, productos y subproductos de acuerdo con la revisión de la literatura, identificándose con líneas de conexión de diferentes colores. También se identifican las fases de la etapa.

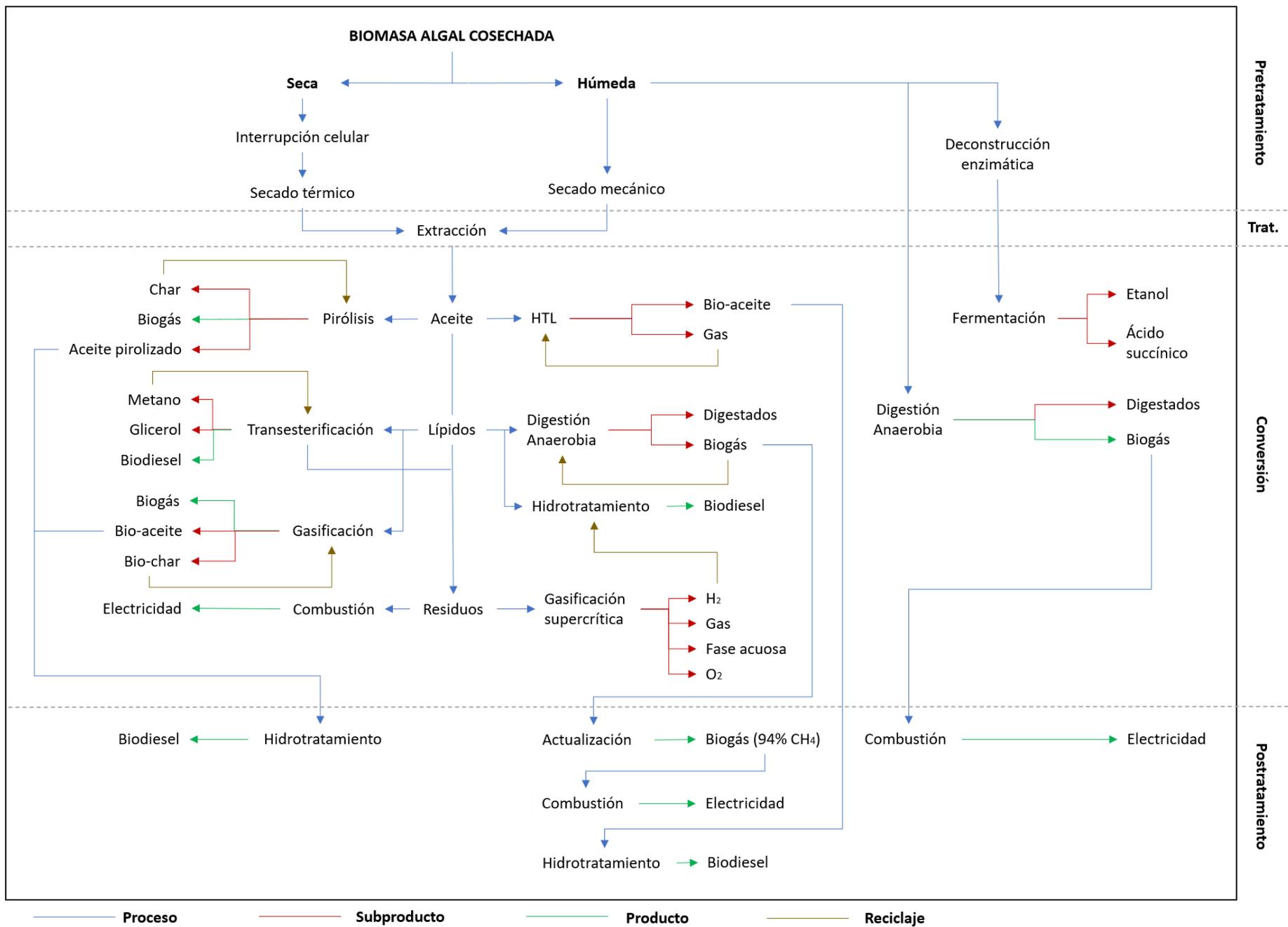


Figura 3. Esquema de las rutas de la etapa de conversión. Tomado de: autoría propia del desarrollo del proyecto

2.3. Planteamiento del problema

El estado del arte y las precisiones conceptuales realizadas en las secciones previas revelan una limitación del potencial de las microalgas para producción de biocombustibles en sistemas de tratamiento de aguas residuales, a pesar de sus múltiples ventajas que se les atribuyen; esto debido a cuellos de botella técnicos, relativos al consumo intensivo de energía y a sus deficientes propiedades de sedimentación, especialmente en la etapa de cosecha.

La separación de la biomasa del medio de cultivo, en este caso efluentes o aguas residuales, implica concentrar dicha biomasa a un valor objetivo y necesario para su posterior conversión al producto deseado. Para el caso que se propone desarrollar en este proyecto, que es la producción de biogás, se estima que el consumo de energía podría contribuir con aproximadamente el 20 a 30% del costo total de operación, siendo un consumo intensivo, con el agravante de ser cifras dispersas y poco homogéneas a causa de la carencia de criterios unificados en la literatura para el adecuado análisis de estos procesos [1] [12].

La previa fase exploratoria del estudio había permitido anticipar las dificultades técnicas que restringen a la etapa de cosecha para separar la biomasa algal del agua tratada debido a la baja velocidad de sedimentación de las microalgas, el tamaño de sus flóculos, bajas concentraciones de cultivo y a su densidad muy similar a la del agua que, en conjunto, dificultan la separación y por lo tanto comprometen el uso de químicos tanto para facilitar la separación como mejorar la operación de los equipos mecánicos utilizados en la cosecha, principalmente las centrífugas [14] [12].

Además, aunque existan alternativas viables para el mejoramiento del sistema de microalgas, particularmente la granulación ALBA carece de suficiente información que permita relacionar los parámetros energéticos y sedimentables. Como tampoco hay muchos estudios o casos de aplicación, se presenta la necesidad de profundizar en la exploración y aplicación de la granulación ALBA, como alternativa a la disminución de los consumos de energía en la separación de las microalgas utilizadas en procesos de pulimento de aguas residuales.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño energético de las tecnologías convencionales y mejoradas con granulación ALBA de cosecha de la biomasa algal obtenida a partir de la biorremediación de aguas residuales con fines de producción de biogás.

3.2. Objetivos específicos (OE)

- a. Identificar las variables y parámetros que determinan el rendimiento energético de las tecnologías implicadas en la recolección de la biomasa algal.
- b. Establecer rangos de consumo típico de energía en la cosecha de la biomasa algal restringidas en función de la ruta de valorización energética seleccionada.
- c. Analizar la granulación ALBA como proceso alternativo para mejorar la eficiencia de sedimentación y el comportamiento energético de la etapa de cosecha.
- d. Comparar teóricamente el potencial energético de sistemas MAB (Migroalgae to Biogás) con y sin aplicación de procesos ALBA.

4. METODOLOGÍA

4.1. Organización y enfoque

El desarrollo metodológico del proyecto consta de tres partes de acuerdo con los objetivos propuestos. La primera corresponde al estudio exploratorio enfocado en la formulación del proyecto, lo cual ha permitido acotar el alcance del proyecto al estudio del desempeño energético de la etapa de cosecha de microalgas utilizadas en sistemas de remediación de efluentes residuales de domésticos o urbanos cuya destinación fuera la producción de biogás.

Este desarrollo exploratorio se ha presentado en el marco de referencia del presente estudio y obedece en buena medida a las siguientes consideraciones:

- Cultivos de microalgas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, delimitándose a aplicaciones OPR preferentemente.
- Valoración energética de las tecnologías de cosecha de microalgas más comunes (ej. Centrifugación)
- Producción de biogás, determinado como el proceso con el mayor potencial de aplicación en la bioenergía.

En efecto, de esta etapa exploratoria se pudieron inferir las tecnologías de recolección de biomasa algal más eficientes y de interés en el estado actual de uso y proyección de esta tecnología aplicada al saneamiento de efluentes. De esta manera, el primer componente metodológico se acota para el desarrollo completo del primer objetivo específico, iniciado parcialmente con el estado de arte y el marco referencial.

La segunda parte fue enfocada en el análisis del sistema convencional de producción de biogás a partir de microalgas cultivadas en aguas residuales, en donde se identifican las exigencias operacionales para las etapas de cultivo y de cosecha requeridas para el sistema, permitiendo identificar parámetros característicos y rangos de operación para algunas de las principales tecnologías implicadas en la cosecha principalmente y su compromiso energético, abarcando de esta manera el cumplimiento del segundo objetivo específico.

Los resultados de este estudio convergen en los propósitos del tercer objetivo específico en sentido de establecer la base de comparación de las tecnologías de referencia o tradicionales de cosecha con el escenario alternativo de un sistema mejorado con la técnica de granulación ALBA. Dicha técnica se presenta como una forma de favorecer la sedimentación

pasiva de la biomasa formando consorcios entre las microalgas y las bacterias agregadas, con consecuentes ventajas operacionales, como la reducción en los consumos de energía gracias a la promoción de la separación de la biomasa algal del efluente tratado.

En la tercera parte del desarrollo del proyecto, nuevamente mediante una aproximación monográfica, se identifican las características puntuales de la granulación ALBA, haciendo una revisión crítica de su potencial real con fines a la reducción del consumo energético en este enfoque de tratamiento de efluentes, lo que corresponde al desarrollo final del cuarto objetivo específico.

4.2. Aspectos instrumentales

Como se observa, el estudio ha sido fundamentalmente monográfico y basado en una revisión crítica de la literatura, apoyado sustancialmente en la consulta de las bases de datos como ScienceDirect, IEE Xplore y SciELO entre otras.

La estrategia de búsqueda estuvo orientada a seleccionar previamente documentos con información cualitativa sobre las características técnicas, especialmente energéticas y sedimentables de sistemas de cultivo de microalgas en aplicaciones de remediación de efluentes urbanos y con destino a la producción de biocombustibles a partir de ellas. Siendo los principales motores de búsqueda los siguientes:

- “microalgae” or “microalgal biomass”
- “harvesting” or “energy demand” or “electric consumption” or “settleability” or “dewatering”
- “consortium microalgae-bacteria” or “sedimentation microalga-bacteria” or “flocculation with bacteria”.

Los resultados de esta búsqueda fueron cerca de 130 documentos, los cuales fueron clasificados, revisados y filtrados bajo los siguientes criterios:

- Reportes de consumos energéticos de las tecnologías de cosecha
- Capacidad de sedimentación de las microalgas
- Producción de biocombustibles a partir de las microalgas
- Aplicación de la técnica de granulación ALBA al cultivo de microalgas usadas en el tratamiento de aguas residuales

Dando como resultado un conjunto final de 37 referencias que constituyen la base documental principal que da sustento al presente trabajo.

5. RESULTADOS

5.1. Etapas y parámetros determinantes del desempeño energético de los sistemas de microalgas.

El estudio crítico de la base documental técnicamente establecida, según los criterios metodológicos previamente establecidos, permitió identificar las etapas y parámetros más determinantes y de mayor incidencia en los estudios de tecnologías de cosecha de microalgas, tanto del consumo energético como del comportamiento de la sedimentación/separación de biomasa, resumidas en la tabla 1.

A partir de esta identificación de etapas y parámetros, se estableció un sistema de tabulación como método de análisis de la información. El propósito fue identificar valores, rangos y patrones de cada etapa y parámetro, para lo cual, en algunos casos fue necesario considerar ciertas definiciones y establecer fórmulas para que, a partir de ellas, unificar criterios en el uso del lenguaje técnico, el cual a menudo es disperso en este campo de conocimiento, lo que dificulta muchas veces interpretar de manera adecuada y veraz la información disponible y el significado de algunas secciones y parámetros.

Las etapas y parámetros que han sido objeto de una revisión más detallada se explican mediante la tabla 1, mientras que las fórmulas establecidas para el adecuado desarrollo del proyecto se presentan en la tabla 2.

Tabla 1. Etapas y parámetros que influyen en la operación de cosecha de microalgas cultivadas en aguas residuales con fines de producción de biogás.

Etapas del sistema	Parámetros
Etapa de cultivo	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de afluente y sus componentes • Tipo de reactor • Tipo de cultivo • Proceso para el tratamiento del afluente • Concentración inicial de salida de la biomasa cultivada y consumo de energía del cultivo • Producción de biomasa algal cultivada
	<p>Tipo de biomasa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Especie de microalga • Tasa de crecimiento • Valor calorífico bruto (GCV, Gross calorific value por sus siglas en inglés) • Composición elemental y bioquímica de la biomasa algal cultivada
Etapa de Cosecha	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología(s) de recolección primaria • Etapa(s) adicional(es) de tratamiento • Tecnología(s) de la(s) etapa(s) adicional(es) • Floculante/coagulante (si reporta) • Unidad energética original de cada artículo • Consumo de energía de la(s) tecnología(s) de cosecha
	<p>Sedimentación de la biomasa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia de sedimentación • Concentración de biomasa sedimentada • Concentración de sólidos totales (TS) en el afluente • Factor de sedimentabilidad
Etapa de conversión de la biomasa cosechada	<ul style="list-style-type: none"> • Ruta(s) • Proceso(s) • Fase(s) • Producto(s) • Heating high value (HHV) • Consumo eléctrico y/o calórico • Producción eléctrica y/o calórica • NER

NOTA: Los valores registrados para cada uno de estos parámetros, provenientes de diversos estudios, fueron objeto de análisis estadístico con el fin de disponer de herramientas adicionales para entender la información, su validez y representatividad. Las definiciones y fórmulas para tener en cuenta en dicho análisis estadístico se presentan en el capítulo de Anexos 8.1.

Tabla 2. Definiciones, expresiones y fórmulas de uso recurrente en el proyecto

Parámetro	Unidad	Fórmula	Comentarios
Productividad del cultivo de biomasa	g/L/d	$Productividad = Concentración\ inicial * Tasa\ de\ dilución$	La tasa de dilución representa la tasa de crecimiento específica en condiciones estacionarias [23].
Concentración de salida del cultivo	kg/m ³	$Concentración\ inicial = \frac{Producción\ de\ biomasa\ anual}{Flujo\ anual}$	
Tasa de crecimiento	g/m ² /d	$Tasa\ de\ crecimiento = \frac{Producción\ de\ biomasa}{Superficie\ o\ área}$	
HHV (Heating High Value)	MJ/kg	$HHV = 3,55C^2 - 232C - 2230H + 51,2C * H + 131N + 20.600$	Fórmula establecida por A. Friedl, para poder calcular un aproximado del GCV o HHV de biomasa de microalgas correlacionada con la composición elemental de la biomasa [31].
Factor de sedimentabilidad	AD.	$F_{sedi.} = \frac{Concentración\ después\ de\ cosecha}{Concentración\ antes\ de\ cosecha}$	Aplicable para recolección primaria y secundaria, bajo las debidas consideraciones del punto de referencia de la corriente de entrada en cada caso.
NER (Relación Neta de Energía)	AD.	$NER = \frac{Energía_{producida}}{Energía_{consumida}}$	El cálculo es aplicable de forma exclusiva para la sección de Conversión de la biomasa en biocombustibles.
FER (Relación de energía fósil)	AD.	$FER = \frac{HHV_{biocombustible}}{Energía_{consumida}}$	Se debe utilizar la misma métrica (LHV o HHV) para caracterizar la energía producida [11], que para este proyecto sería HHV. En ese estudio valores y cálculos de NER y FER se registraron como el mismo parámetro.

AD. Parámetro Adimensional

5.2. Análisis de las secciones y parámetros definidos para los sistemas de microalgas

5.2.1. Etapa de cultivo

La primera observación es que, en gran parte de la investigación, los autores prefieren realizar los estudios con efluentes sintéticos, es decir, con una mezcla preparada sintéticamente para simular aguas residuales y no con efluentes reales provenientes de una planta de tratamiento. Esto demuestra que, desde el punto de vista metodológico, es conveniente reducir durante las etapas de desarrollo de la tecnología algunos problemas técnicos inherentes al manejo de un efluente real (ej. citotoxicidad por metales pesados, microorganismos parásitos, etc.), antes de proceder con la aplicación real, en especial cuando se piensa en la aplicación como sistema de tratamiento autónomo o principal [8].

Adicionalmente, al realizar los estudios con efluentes sintéticos se puede tener un control de las variables relacionadas con la carga nutritiva, es decir, los nutrientes mayores (N, P) y menores (Na, Mg, K), así como del suministro regulado de CO₂, el cual en condiciones reales de aplicación de la tecnología debería provenir de una central térmica cercana o de un proceso industrial que estimule la captura de esta fuente de carbono o en su defecto, de la recirculación de los gases provenientes de la valorización energética de la biomasa algal (ej.. combustión de biogás producido a partir de las microalgas cosechadas) [22].

También se explora recurrentemente opciones de mezcla del agua residual con efluentes que aporten salinidad, pues es una condición que muestra favorecer el crecimiento de especie de microalgas con alto potencial de bioenergía, sin embargo, se penaliza en el balance energético, ya que compromete el uso de tecnologías de alto consumo de energía como la ósmosis inversa, para lograr una satisfactoria separación de la sal y la biomasa algal [4].

Los estudios donde los sistemas de microalgas trabajan con efluentes reales, lo hacen principalmente como tratamiento complementario a otros procesos de tipo biológico, sea de base aerobia (lodos activados) o anaerobia (UASB) y, asimismo, tanto OPR como PBR son igualmente estudiados. En general, la recirculación del medio de cultivo como forma de agitación mínima, aunque requerida en permanencia, tanto para homogenizar la concentración de biomasa y estimular su crecimiento, es la principal fuente de consumo energético [18].

Tabla 3. Variables de la etapa de cultivo de microalgas

Ref.	Afluente		Reactor	Cultivo	Proceso para el tratamiento del afluente
	Tipo	Componentes			
[1]	Sintético	Fertilizantes e inyección de CO2	OPR	Continuo	Autónomo
[2]	Sintético	Nutrientes, CO2 y agua	PBR/OPR	Continuo	Autónomo
[3]	Sintético	Nutrientes, CO2 y agua	OPR	Continuo	Autónomo
[4]	Sintético	Agua salada y dulce, nutrientes y CO2	PBR-OPR/OPR	Continuo	Autónomo
[5]	Residual	Concentrado de digestor anaerobio de lodos activados y una mezcla 50:50 de aguas residuales de acuicultura centradas y sintéticas	PBR tubulares	Semicontinuo	Complemento de un sistema anaerobio de lodos activados (Postratamiento)
[7]	Sintético	CO2, fertilizantes (N Y P), Na, Mg k	OPR	Continuo	Autónomo
[8]	Sintético	Inyección de nutrientes y captura y utilización de CO2 proveniente de una planta de energía térmica	OPR	Batch	Autónomo
[9]	Sintético	Macronutrientes suplidos en el lab. (NO3 y PO4), suministros externos y CO2 de una fuente industrial puntual	OPR	Continuo	Autónomo
[10]	Residual	Agua subterránea con salinidad ligera a media	OPR	Continuo	Complemento de un sistema anaerobio de lodos activados (Postratamiento)
[12]	Sintético	Nutrientes e inyección de aire y CO2	OPR/PBR (placa plana)	Continuo	Autónomo
[14]	Residual	Aguas de desecho de Holanda y Francia, CO2, catalizadores y solventes	OPR/PBR	Semicontinuo	Complemento de un sistema anaerobio de lodos activados (Postratamiento)
[15]	Sintético	Fertilizantes, inyección de CO2	OPR	Continuo	Autónomo
[16]	Residual	Aguas residuales tratadas utilizando digestores de flujo ascendente de lodo anaeróbico (UASB)	OPR	Continuo	Complemento de un sistema anaerobio de lodos activados (Postratamiento)
[17]	Sintético	Suministro de nutrientes y CO2	OPR/PBR	Continuo	Autónomo
[18]	N.R.	N.R.	OPR	Continuo	N.R.
[19]	N.R.	N.R.	OPR/PBR	Continuo	N.R.
[20]	N.R.	N.R.	PBR (tubulares)	Semicontinuo	N.R.

N.R.: No reporta

Teniendo en cuenta la tabla 3, que hace una síntesis de trabajos de investigación en la aplicación de sistemas de microalgas como unidades de tratamiento de aguas residuales domésticas o urbanas, se preparó la tabla 4, para establecer rangos de concentración de la biomasa cultivada y de la energía invertida en dicho cultivo.

En la concentración inicial la mayoría de los registros (19 datos) pertenecen a reactores OPR (13 datos) con un promedio de 0,7253 g/L, mientras que para los PBR (6 datos) el promedio es 1,483 g/L. Esto indica que los PBR concentran 2,04 veces más la biomasa que los OPR, lo que confirma con sutil cercanía el valor de mayor consenso en la literatura, que indica que los PBR concentran 2,6 veces más la biomasa que los OPR [10]. Esta diferencia puede explicarse en que existen variantes en la forma de reportar la concentración de la biomasa, pues en algunos estudios se utilizan los TS (Sólidos Totales), en otros los TSS (Sólidos suspendidos totales) o los VSS (Sólidos suspendidos volátiles).

Hay menos registros sobre consumo de energía del cultivo (13 registros), de los cuales los OPR tienen un promedio de 25,68 MJ/kg, mientras que para los PBR es 356,69 MJ/kg, mostrando un mayor consumo de energía para los PBR sobre los OPR por 331 MJ/kg aproximadamente de diferencia, equivalente a 92,79% más consumo para el PBR, lo que significa que el consumo para los PBR es 13,88 veces más que en los OPR, evidenciando una de las mayores desventajas de los PBR y respaldando el valor teórico de 14 veces más consumo para los PBR según el estudio exploratorio [10].

La dispersión de las cifras llama la atención y genera incertidumbre, ya que los valores varían drásticamente, pudiéndose deber a los límites del sistema establecidos para cada estudio, en donde algunos incluyen todos los flujos de entrada másicos y energéticos, como fertilizantes, mientras que otros solo reportan consumo de operación.

Es importante aclarar que los PBR son pensados para trabajo continuo diario (24 horas/7 días), con iluminación artificial, y para trabajo en contextos con cambios de estaciones donde en las temporadas frías el agua debe mantenerse con una temperatura estable, por medios externos de calentamiento [3] [20].

Tabla 4. Concentración de salida de la biomasa cultivada y energía requerida en el cultivo

Parámetro		Concentración de salida	Consumo de energía
Unidad		g/L	MJ/kg
Ref.	Reactor	Valor	
[1]	OPR	0,5	0,824
[2]	OPR	0,5	3,356
	PBR	0,5	1,152
[4]	PBR/OPR	0,432	60,8
	OPR	0,13	175,4
[5]	PBR	0,478 - 0,62	N.R.
[7]	OPR	0,5	N.R.
[8]	OPR	4	N.R.
[9]	OPR	0,5	2,72
[10]	OPR	0,5	2,37
[12]	OPR	0,5	N.R.
	PBR	1,9	N.R.
[14]	OPR	0,4	N.R.
	PBR	2,5	N.R.
[15]	OPR	0,4	0,817
[17]	OPR	0,5	18,73
	PBR	4	19,09
[18]	OPR	0,5	N.R.
[19]	OPR	0,5	26,09
	PBR	0,5	1343,54
PROM.	OPR	0,72	25,7
	PBR	1,483	356,7

N.R.: No reporta

El siguiente parámetro revisado en detalle fue la producción de biomasa algal en el cultivo y los datos recopilados se presentan en la tabla 5. En este caso, el reto es que en algunos estudios los autores trabajan en velocidad de producción neta ($\text{masa} \cdot \text{tiempo}^{-1}$), generalmente reportada en $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ y otros prefieren reportar productividad ($\text{masa} \cdot \text{volumen}^{-1} \cdot \text{tiempo}^{-1}$), típicamente dada en $\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

En términos de velocidad de producción el valor promedio para los OPR es $7025,43 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, mientras que para los PBR es de $450 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, siendo 15,61 veces más producción para los OPR que los PBR, con una diferencia de $6575,43 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ equivalente a 93,6% más para los OPR. Esto se explica porque los OPR están diseñados generalmente a gran escala, manejando

grandes volúmenes de afluente y, por ende, produciendo mayores cantidades de biomasa [1].

Desde la perspectiva de productividad, el valor promedio de los OPR es $0,194 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, mientras que para los PBR es de $1,05 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, pero con apenas solo 2 datos reportados. La diferencia se debe principalmente a la tasa de dilución de cada reactor, en donde para los PBR la tasa es de $0,3 \text{ d}^{-1}$, mientras para los OPR es de $0,1 \text{ d}^{-1}$. Además, como ya se explicó en el marco referencial, la concentración de los PBR es mayor que los OPR por lo que también aumenta el valor de productividad [32].

Tabla 5. Producción de biomasa del sistema

Parámetro		Producción de biomasa	Productividad del cultivo
Unidad		$\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$
Ref.	Reactor	Valor	
[1]	OPR	25000	N.R.
[2]	OPR	N.R.	0,125
	PBR	N.R.	N.R.
[3]	OPR	13698,63	N.R.
[12]	OPR	150	0,57
	PBR	542,24 - 1057,36	0,05
[15]	OPR	3104	N.R.
[17]	OPR	75	0,05
	PBR	100	1,535
[18]	OPR	100 - 150	0,32 – 0,48
PROM.	OPR	7025,44	0,194
	PBR	450	1,053

N.R.: No reporta

5.2.1.1. Tipo de biomasa

Para el cultivo de la biomasa se utilizan diferentes especies de microalga, siendo *C. Vulgaris* la que cuenta con la mayoría de los reportes, seguido de *N. occulata* y *S. dimorphus*. La mayoría de estas especies tienen un alto de valor de tasa de crecimiento, el cual, según el análisis estadístico realizado, tiene una media de $25,55 \text{ g}/\text{m}^2/\text{d}$ y una desviación estándar de $21,98 \text{ g}/\text{m}^2/\text{d}$, equivalente al 86,03% de dispersión con 17 datos.

La dispersión se debe al tipo de reactor usado, ya que las especies de microalgas cultivadas en fotobiorreactores tienen reporte de valores más altos a la media, debido a que los PBR se caracterizan por favorecer el crecimiento y concentración de biomasa respecto a los OPR. Sin embargo, las tasas de crecimiento intrínsecas son específicas para cada especie,

pero pueden verse afectadas por la cantidad de luz, temperatura, calidad y cantidad de nutrientes, pH, salinidad y otros factores; además, la tasa de crecimiento diaria y mensual varía significativamente durante todo el año [8] [22] [23] [4] [32].

En cuanto a la composición de la biomasa, los valores promedio para la composición elemental son C: 52,5%; H: 7,84%; O: 29,07%; N: 14,57%; P: 2,05%; S: 0,58%; f: 1,8% (La sumatoria da 108,41% ya que no son valores sobre 100% sino promedios de los reportes).

Para la composición bioquímica, en la mayoría de los artículos el valor de lípidos y proteínas es el más predominante en el porcentaje total de la composición, siendo para lípidos un rango de 3% hasta 40% con un valor promedio de 20,96%, mientras que para proteínas el rango va desde 11% hasta 63,4% con un promedio de 40,1%, demostrando la viabilidad de ciertas especies para la extracción de lípidos y su posterior conversión a biodiesel, como también la extracción de proteínas y la producción de subproductos de alto valor comercial [17] [22].

Tabla 6. Tipo de biomasa del cultivo de microalgas

REF	ESPECIE DE MICROALGA	TASA DE CRECIMIENTO	GCV	COMPOSICIÓN	
				Elemental	Bioquímica
[1]	Chorella Vulgaris	25 g/m2/d	N.R.	C: 367 g; N: 61 g; F: 8,1 g; P: 6,59 g	N.R.
[2]	Nannochloropsis oculata	25 g/m2/d	N.R.	N.R.	N.R.
[3]	Chorella Vulgaris	13,7 g/m2/d	18,4 MJ/kg	C: 45,8%. H: 6,8%. O: 38,7%. N: 5,8%. P: 2,7%	Proteína: 29%. Lípidos: 19,7%. Carbohidratos: 49,5%. Otros: 1,8%
[4]	Haematococcus pluvialis y Nannochloropsis	16 g/m2/d ¹	33,45 MJ/kg	(H. pluvialis): C: 45,6%. H: 8,2%. N: 6%. S: 0,58%. O: 39,625%	(Nannochloropsis): Proteínas: 30,1%. Grasa: 30,2%. Carbohidratos: 9,7%. Ash: 26,9%
[5]	Algas silvestres similares a Chlorella	1,7 - 2,3 g/m2/d	N.R.	N.R.	N.R.
[7]	Nannochloropsis oculata	20 g/m2/d	23,2 MJ/Kg	N.R.	N.R.
[8]	N.R.	N.R.	20 MJ/kg	C: 43,17%. H: 8,53%. O: 8,91%. N:39,39%	Proteína: 63,4%. Lípidos: 7,5%. Carbohidratos: 20,5%. Otros: 8,6%
[9]	Scenedesmus dimorphus	13 g/m2/d	24 MJ/kg	N.R.	N.R.
[10]	Scenedesmus dimorphus	16-25 g/m2/d	N.R.	C: 500 g/kg; N:17,5 - 52,5 g/kg; P: 12,9 g/kg	Lípidos: 25 - 40%; Proteínas: 11- 32%; Carbohidratos: 35 - 41%; Cenizas: 8%
[12]	Chorella Vulgaris	15 - 54/105,7 g/m2/d ²	N.R.	N.R.	Proteínas: 109,5 g/mol; Carbohidratos: 162 g/mol; Lípidos: 884 g/mol
[14]	Nannochloropsis y Scenedesmus dimorphus	30 - 50 g/m2/d ³	20-25 MJ/Kg	N.R.	(Nanno) Lípidos: 40%, Carbohidratos: 10%, Proteínas: 35%, Fenoles: 2%, Otros orgánicos: 4,5%, Minerales: 8,5%. (Scenedesmus) Lípidos: 25%, Carbohidratos: 17%, Proteínas: 40%, Fenoles: 2%, Otros orgánicos: 5%, Minerales: 11%
[15]	Dunaliella salina	30 g/m2/d	18,47 MJ/Kg	N.R.	N.R.
[16]	N.R.	18 g/m2/d	N.R.	N: 8%, C: 45%	Lípidos: 3%, Proteínas: 50% y carbohidratos: 13%
[17]	N.R.	15 - 35 g/m2/d ⁴	N.R.	N.R.	Lípidos: 25%, Proteínas: 42%, Polisacáridos: 28%, Ácidos nucleicos: 5%
[18]	N.R.	N.R.	18,5 MJ/kg	N.R.	N.R.
[20]	Chorella Vulgaris	N.R.	N.R.	N.R.	Proteínas: 50%, Carbohidratos: 20%, Lípidos: 15%, Otros componentes: 15% (pigmentos, vitaminas, minerales)

¹ Reporte para la especie Nannochloropsis oculata; ² Reporte primero de reactor en cultivo OPR, seguido de dos reportes para PBR para dos diferentes casos analizados en el artículo; ³ Reporte primero de reactor en cultivo OPR seguido de reactor PBR; ⁴ Reporte primero de reactor en cultivo OPR seguido de reactor PBR
N.R.: No reporta

5.2.2. Etapa de Cosecha

La tecnología con mayor reporte es centrifugación por placa espiral (SPR), seguido de floculación inorgánica y sedimentación. Aunque SPR se considere como tecnología de recolección secundaria, algunos artículos la reportan como única tecnología de cosecha, segunda fase de la recolección primaria o etapa adicional de la recolección primaria, siendo esta última denominación la más reportada en los artículos como método de deshidratación o desagüe.

5.2.2.1. Consumo de energía de la(s) tecnología(s) de cosecha

El análisis del consumo energético de las tecnologías de recolección primaria y secundaria se realizó a partir de la ruta de producción seleccionada, la cual para este proyecto es la producción de biogás en ruta húmeda de acuerdo con lo establecido en el estudio exploratorio y lo concluido en el parámetro de NER de la sección de conversión. La unidad estándar establecida es $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, siendo la energía en kWh requerida para lograr la concentración de biomasa dada por m^3 de afluente procesado [14].

Para la recolección primaria el rango de consumo de energía va de $0,00084 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ a $40 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, con una media de datos de $6,45 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ y una desviación estándar de $7,18 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, equivalente a 111,18% de dispersión con 32 datos. Para la recolección secundaria el rango de consumo de energía va de $0,012 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ a $10,8 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, con una media de datos de $2,42 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ y una desviación estándar de $2,74 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, equivalente a 113,1% de dispersión con 44 datos. Las tecnologías con mayor reporte son sedimentación y DAF (3 artículos) para RP y centrifugación por decantación³ (4 artículos) para RS.

Evidentemente la amplitud de los rangos obedece a la diversidad de tecnologías, unas de escaso consumo (sedimentación) otras de caso contrario, pero de significativa mayor eficacia. Además, también se encuentra la dificultad para distinguir en algunos reportes los límites entre las denominadas cosechas primaria y secundaria.

Además del análisis estadístico de los valores agrupados para cada recolección, también se analizó para cada rango de valores de cada tecnología, en donde la media, la desviación estándar y el coeficiente de

³ Centrífugas que utilizan un tanque giratorio de sedimentación en donde las partículas sólidas tienen una densidad más alta que el líquido por lo que se adhieren a las paredes del tambor por la fuerza centrífuga, generando un sedimento [44]

varianza se calculaba solo con 2 datos, el límite máximo y mínimo de cada tecnología.

A partir de lo anterior, la mejor tecnología de recolección primaria sería SAF en contraste con la DAF como la menos recomendada. Para recolección secundaria, la mejor tecnología sería la filtración a presión y la de menor desempeño la filtración combinada. En general, las tecnologías de recolección secundaria parecen acusar consumos de energía más bajos que los de recolección primaria y en este aspecto serían más eficientes, observación que contradice lo estipulado en el marco referencial establecido de acuerdo con la literatura consultada y revisada.

Se deduce, entonces, que las tecnologías de recolección secundaria son más eficientes respecto a su consumo de energía, hipótesis que contradice lo estipulado en el marco referencial de acuerdo con la literatura.

A continuación, se presentan la tabla 7 y 8 en las cuales se presentan los datos anteriormente explicados. En la tabla 7 se evidencian los parámetros de cosecha, permitiendo contextualizar los escenarios de cosecha de la biomasa algal establecidos en los estudios. Para la tabla 8 se reportan los valores de consumo de energía para todas las tecnologías de cosecha, tanto primarias como secundarias, dando una mejor visualización y comparación de los rangos establecidos.

Tabla 7. Parámetros de la cosecha

Ref.	Tecnología(s) de recolección primaria	Etapas adicionales(es)	Tecnología(s) etapas adicionales(es)	Floculante	Unidad energética
[1]	Sedimentación pasiva + centrifugación SPR	N.R.	N.R.		kWh/d
[2]	Floculación asistida por rociado de aire (ASACF)	Deshidratación	Centrifugación SPR	Cloruro Férrico	MJ/kg
[3]	Floculación química (orgánica) + centrifugación SPR	Secado mecánico y térmico	N.R.	Cal (óxido de calcio)	GJ/ton
[4]	Sedimentación gravitacional + floculación inorgánica	Filtración y secado	Microfiltro de flujo cruzado y secador de cinta	Sulfato de aluminio	MJ/m3
[5]	Floculación	Deshidratación	Centrifugación SPR	Alumbre, cloruro férrico y polímero catiónico	kWh/ton
[10]	Anexo				kWh/m3
[7]	Floculación inorgánica + Centrifugación SPR	N.R.	N.R.	Cloruro de hierro	MJ/GJ
[8]	Floculación inorgánica	Deshidratación	Filtración por prensa de cámara	Alumbre	kWh/m3
[9]	Biofloculación, flotación por aire disuelto (DAF), centrifugación por placa espiral y filtración por membrana	N.R.	N.R.	N.R.	MJ/kg
[10]	Biofloculación + flotación por aire disuelto (DAF) + centrifugación; Floculación inorgánica con polímero seguido de DAF + centrifugación; Floculación inorgánica con sulfato de aluminio seguido de DAF + centrifugación; centrifugación	Secado	Secado térmico	Polímero y sulfato de aluminio	kWh/m3
[12]	Sedimentación gravitacional, Floculación inorgánica, Centrifugación	Secado	Secado por correa	Sulfato de aluminio	MJ/MJ
[9]	Anexo				kWh/m3
[14]	Floculación	Desagüe	Centrifugación y filtración a presión y al vacío	Hidróxido de sodio, quitosano, cloruro de hierro III y fosfato de aluminio	kJ/m3
[15]	Floculación orgánica	Deshidratación y secado	Prensa de desagüe de voluta y secador de cinta	Hidróxido de sodio	GJ/kg
[16]	Flotación por aire disuelto (DAF)	N.R.	N.R.		MJ/d
[17]	Floculación química (inorgánica) y sedimentación	Desagüe	Centrifugación SPR	Sulfato de aluminio	MJ/kg
[18]	Anexo				kWh/m3
[19]	Floculación y centrifugación	N.R.	N.R.	N.R.	MJ/kg
[20]	Centrifugación de pila de disco	N.R.	N.R.		kWh/m3

*Las tecnologías reportadas con 'Anexo' indican el reporte de muchas tecnologías. N.R.: No reporta

Tabla 8. Rangos de consumo de energía de las tecnologías de cosecha

	TECNOLOGÍA	VALOR	REF.
Recolección primaria	Sedimentación	0,05 - 1	[1], [6], [18]
	Auto/co-floculación/biofloculación	0,02 - 0,2	[18]
	Floculación inorgánica	0,00084 - 2,85	[13], [18]
	Floculación orgánica	0,1 - 14,81	[15], [18]
	Floculación electrolítica	0,04 - 9,5	[13], [18]
	Floculación magnética	6,50	[18]
	Hidrociclón	0,3	[13], [18]
	Flotación por aire disuelto (DAF)	0,6 - 20	[6], [13], [18]
	Flotación electrolítica	0,3 - 2	[18]
	Flotación por aire suspendido (SAF)	0,003 - 0,015	[18]
	Flotación por espuma	0,015	[13]
	Agregación acústica	16 - 40	[18]
Recolección secundaria	Centrifugación por decantación	3,6 - 10,8	[6], [10], [13], [18]
	Centrifugación por pila de disco	0,7 - 1,4	[10], [18], [20]
	Centrifugación por rotor en placa espiral (SPR)	0,42 - 1,94	[1], [18]
	Separador de placa autolimpiante	1	[6], [13]
	Filtración por microfiltros	0,02 - 0,5	[6], [18]
	Filtración natural	0,4	[13]
	Filtración a presión	0,47 - 0,88	[13], [14]
	Filtración combinada (Micro/Ultra)	0,012 - 10	[18]
	Filtración por flujo tangencial (TFF)	0,2 - 2,6	[6], [13]
	Filtración por prensa de correa	0,16 - 0,88	[6], [13], [18]
	Filtración por prensa de cámara	0,88	[6], [13], [18]
Filtración por correas de vacío	0,1 - 5,9	[13], [14], [18]	
Filtración por pantalla vibratoria	0,4 - 3	[6], [13], [18]	
Microfiltración sumergida	0,25	[13]	

5.2.2.2. Sedimentación de la biomasa

La mayoría de las tecnologías de sedimentación reportadas tienen un valor de eficiencia entre el 65% y el 100%, siendo el más bajo para la sedimentación y el más alto para floculación inorgánica. Del análisis estadístico, el resultado de la media para la recolección primaria es 90,41% de eficiencia y una desviación de 8,77% de eficiencia, equivalente al 9,71% de dispersión con 23 datos, mientras que para la recolección secundaria la media fue 92,92% de eficiencia con una desviación de 3,34%, equivalente a 3,6% de dispersión con 21 datos.

Se puede inferir que la mayoría de las tecnologías tiene un excelente desempeño en la recolección de la biomasa algal, siendo las tecnologías de recolección secundaria más eficientes que la primaria por 2,51% de diferencia. Además, también son las tecnologías que reportan mayores concentraciones de biomasa cosechada, con valores entre 50 g.L⁻¹ y 240 g.L⁻¹, mientras que para la recolección primaria el rango es inferior, 4,32 g.L⁻¹ a 50 g.L⁻¹.

En la recolección secundaria el mayor y menor valor del rango mencionado corresponde a una misma tecnología, centrifugación por rotor en placa espiral (SPR). Esto se explica a partir de la tecnología de recolección primaria utilizada antes que la SPR, ya que dependiendo de dicha tecnología se obtiene un valor inicial de concentración de biomasa que determina el valor final a obtener después de SPR. Por tanto, se postula la importancia de seleccionar una tecnología eficiente de recolección primaria para tener una mayor concentración final en la recolección secundaria, reduciendo consumos de energía y costos operativos [18].

La media de los datos para la concentración de biomasa cosechada de las tecnologías de recolección primaria fue 23,353 g.L⁻¹, con una desviación estándar de 15,8 g.L⁻¹, equivalente a 67,67% de dispersión para 12 datos. Para la recolección secundaria la media fue de 161,28 g.L⁻¹ con una desviación estándar de 53,09 g.L⁻¹, equivalente a 32,92% de dispersión para 7 datos.

Lo anterior plantea que la recolección secundaria concentra casi 7 veces más biomasa que la recolección primaria, con una diferencia de 137,92 g.L⁻¹, demostrando la necesidad del uso de la recolección secundaria para concentrar la biomasa hasta el valor requerido en la producción de biocombustibles líquidos, compensando los posibles aumentos de consumo de energía por su uso.

Según la dispersión de datos, la recolección primaria tiene un valor 34,75% mayor que la recolección secundaria, debido a la diferencia considerable de la eficiencia para una misma tecnología, pues algunas fueron usadas para cosechar en primera instancia la biomasa que sale del cultivo, pero también se usan como segunda fase en función de complemento de otra tecnología, siendo igualmente recolección primaria, aunque con una menor concentración de biomasa cosechada.

En contraste con la concentración de biomasa cosechada, la concentración de sólidos totales (TS) medido en el afluente de salida de la etapa de cosecha, reporta valores para la recolección primaria entre el 0,4% a 30%, obteniendo una media de 4,68% con una desviación estándar de 4,5% concentración de TS, equivalente al 96,19% de dispersión para 38 datos. Mientras, para la recolección secundaria el rango va de 1% hasta 90%, obteniendo una media de 21,21% con una desviación estándar de 15,38% de concentración de TS, equivalente a 72,51% de dispersión para 58 datos.

Claramente la concentración de la recolección secundaria es mayor que la primaria en 16,71%, respaldando la denominación de tecnologías de alta concentración y la necesidad de su uso en la etapa de cosecha para una mejor eficiencia. Además, es importante establecer la relación entre la concentración de TS y la energía consumida, ya que cuando los contenidos de sólidos son más bajos, se puede llegar a requerir mayor energía para deshidrataciones posteriores, a causa del exceso de agua [18].

Finalmente, el análisis estadístico para el factor de sedimentabilidad mostró valores para la recolección primaria de 72,6% con una desviación de 83,02%, equivalente a 114,36% de dispersión para 12 datos, mientras que para recolección secundaria la media es de 14,12% y una desviación de 13,61%, equivalente a 96,41% de dispersión para 7 datos.

Es muy notorio el alto valor de sedimentabilidad para la recolección primaria, pudiéndose deber a que son las primeras tecnologías que procesan el afluente que sale del cultivo, el cual tiene una concentración muy baja (0,5 g/L la mayoría de los reportes), por lo que, al concentrar la biomasa hasta cierto valor, el factor de aumento será alto sin importar la tecnología referida.

A partir de esto se analiza que el factor de sedimentabilidad dependerá del tipo de recolección y de la fase de recolección que para aquellos casos en donde se usa varias tecnologías del mismo tipo de recolección.

La siguiente tabla presenta todos los valores reportados para los parámetros anteriormente explicados, relacionando y comparándolos entre sí para el oportuno análisis.

Tabla 9. Reportes de sedimentación

TECNOLOGÍA	Eficiencia [%]		Concentración de biomasa cosechada [g/L]		Concentración de TS [%]		Factor de Sedimentabilidad*		
	Valor	Ref.	Valor	Ref.	Valor	Ref.	Valor	Ref.	
Recolección primaria	Sedimentación	65 - 75,5%	[1, 6, 11]	1,3 - 10	[1, 4]	0,5 -3%	[6, 11, 18]	10 - 40	[1, 4, 12]
	Auto/co-floculación/Biofloculación	99%	[13]	10	[9, 19]	1,4 -5%	[18]	20	[9, 19]
	Floculación inorgánica	82,27 - 100%	[4, 5, 7, 8, 11, 13, 17]	20 - 50	[4, 7, 12, 17]	1 - 30%	[8, 11, 12, 14, 18]	7,5 - 357	[4, 7, 12, 17]
	Floculación orgánica	90 - 96%	[11, 13, 15]	8	[15]	0,6 - 15%	[3, 11, 15, 18]	20	[15]
	Floculación electrolítica	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	3 - 5%	[18]	N.R.	N.R.
	Floculación magnética	98%	[13]	N.R.	N.R.	4,4%	[18]	N.R.	N.R.
	Floculación de coagulación asistida por rociado de aire (ASACF)	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	3%	[2]	N.R.	N.R.
	Hidrociclón	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	0,4%	[13, 18]	N.R.	N.R.
	Flotación por aire disuelto (DAF)	90 - 95%	[6, 11, 13, 16]	15 - 50	[9, 10, 16]	1 - 10%	[5, 6, 11, 13, 16, 18]	1,5 - 100	[9, 10]
	Flotación electrolítica	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	3 - 5%	[18]	N.R.	N.R.
	Flotación por aire suspendido (SAF)	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	1,4 - 5%	[18]	N.R.	N.R.
	Flotación por espuma	90%	[13]	N.R.	N.R.	1,4 - 2,4%	[13]	N.R.	N.R.
	Agregación acústica	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	7,6%	[18]	N.R.	N.R.
Recolección secundaria	Centrifugación por decantación	95%	[6, 11]	180	[10, 19]	12 - 30%	[6, 11, 13, 18]	1,5 - 18	[10, 19]
	Centrifugación por pila de disco	95 - 98%	[10, 11, 20]	120	[10]	10 - 22%	[3, 11, 18, 20]	2,4	[10]
	Centrifugación por rotor en placa espiral (SPR)	95%	[11]	50 - 240	[1, 9, 17]	5 - 31,5%	[1, 2, 5, 7, 9, 11, 12, 14, 17, 18]	5 - 16	[1, 9, 17]
	Separador de placa autolimpiante	95%	[6, 13]	N.R.	N.R.	12%	[6, 13]	N.R.	N.R.

	Filtración por microfiltros	89 - 90%	[6, 11]	200	[4]	1,5 - 3%	[6, 18]	48	[4]
	Filtración natural	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	1 - 6%	[13]	N.R.	N.R.
	Filtración a presión	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	5 - 40%	[11, 13, 14]	N.R.	N.R.
	Filtración combinada (Micro/Ultra/TFF)	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	2 -27%	[5, 18]	N.R.	N.R.
	Filtración por flujo tangencial (TFF)	89%	[6, 13]	N.R.	N.R.	2,5 - 10%	[6, 13]	N.R.	N.R.
	Filtración por prensa de correa	89%	[6, 13]	N.R.	N.R.	10 - 90%	[5, 6, 18]	N.R.	N.R.
	Filtración por prensa de cámara	89%	[6, 13]	N.R.	N.R.	5 - 27%	[6, 18]	N.R.	N.R.
	Filtración por correas de vacío	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	9,5 - 30%	[5, 13, 18]	N.R.	N.R.
	Filtración por pantalla vibratoria	89%	[6, 13]	N.R.	N.R.	1 - 10%	[6, 18]	N.R.	N.R.
	Filtración rotativa a presión	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	20 - 50%	[3, 11]	N.R.	N.R.
	Microfiltración sumergida	98%	[13]	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.
	Camas de secado solar	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	30 - 50%	[5, 11]	N.R.	N.R.
C¹	Floculación + DAF	90%	[10]						

*El factor de sedimentabilidad es adimensional ya que es una relación

¹ C: combinadas.

5.2.3. Etapa de conversión de la biomasa cosechada

Para esta sección de resultados solo se mostrarán los parámetros de ruta, proceso, fase, producto y NER.

Los procesos que se llevan a cabo en la etapa de conversión dependen de la ruta seleccionada, ya que para cada ruta tiene condiciones diferentes y se obtienen productos diferentes. Las fases se identifican en el desarrollo de este proyecto a partir de los procesos realizados a la biomasa algal.

Con respecto a los pretratamientos, los estudios manejan procesos como secado térmico o mecánico, microfiltración, molino de bolas y disrupción celular, de los cuales la mayoría prefieren el secado térmico de cinta, mientras otros utilizaron el secado en horno rotativo, representando una tecnología eficiente con 85% y comercialmente demostrada. Otros artículos utilizaron el secado solar, siendo una de las alternativas propuestas de baja demanda de energía, aunque requiriendo grandes superficies para el secado [3] [11].

Como fase de tratamiento el proceso corresponde a la extracción de aceite y lípidos, en donde los autores prefieren la extracción de lípidos, ya que los productos obtenidos a partir del procesamiento de los lípidos tienen valores de HHV más altos que los productos a partir de aceites. Lo anterior se comprueba con los reportes para este proyecto del componente energético de los productos, de los cuales en promedio de HHV para el biogás a partir de lípidos es 41,45 MJ/kg, en contraste con 25 MJ/kg para biogás a partir de aceite.

En concordancia con lo anterior, los procesos de conversión en su mayoría son digestión anaerobia (DA), transesterificación (TRNS) y pirólisis (PR), de las cuales DA se reporta principalmente como proceso bioquímico para la ruta húmeda con extracción de lípidos, obteniendo biogás como producto principal.

Como última fase, para el postratamiento los procesos reportados son actualización del biogás, hidrotreatmento y combustión directa, en donde este último se da generalmente para la quema del biogás producido para reciclar el calor generado a otros procesos que lo requieran y utilizar la electricidad producida para el consumo del sistema. Sin embargo, reciclar el biogás aumenta el requerimiento de energía ya que la biomasa es un combustible de menor calidad que el carbón, requiriendo mayor cantidad de biomasa y afectando el balance energético [8].

De acuerdo con lo establecido para el cálculo del NER, los resultados muestran que los procesos energéticamente eficientes de conversión de la

biomasa algal corresponden a la producción de biogás en ruta húmeda, con un valor de NER promedio de 2,88, donde el mayor valor es 5,07.

La siguiente tabla plantea los parámetros más importantes para la etapa de conversión, en donde se evidencia los resultados de los cálculos de los valores de NER que contrastan la selección de la ruta de producción de biogás definida en el marco referencial.

Tabla 10. Parámetros generales de conversión

Ref.	RUTA	PROCESO	FASE	PRODUCTO	NER		
[1]	Húmeda	Digestión anaeróbica	Conversión	Biogás	2,3		
		Actualización del biogás	Postratamiento	Electricidad			
		Combustión					
[2]	Seca	Extracción de lípidos	Tratamiento	Biodiesel	0,25		
		Transesterificación	Conversión				
[3]	Seca	Secado mecánico	Pretratamiento	Biodiesel	0,94		
		Secado térmico					
		Extracción de lípidos	Tratamiento				
		Transesterificación	Conversión			Glicerol	0,094
		Pirólisis				Biogás	0,27
	Húmeda	Secado mecánico	Pretratamiento	Diesel verde	1,52		
						Extracción de lípidos	Tratamiento
		Hidrotratamiento	Conversión			Otros gases	1,43
		Gasificación de agua supercrítica (SWG)					
[4]	Microalga: Haematococcus pluvialis	Microfiltro	Pretratamiento	Biodiesel	0,21		
		Molino de bolas					
		Transesterificación	Conversión			Biogás	0,21
		Digestión anaeróbica					
	Microalga: Nannochloropsis	Secado	Pretratamiento	Biodiesel	0,15		
		Extracción de lípidos	Tratamiento				
		Transesterificación	Conversión			Biogás	0,047
		Digestión anaeróbica					
[8]	Seca	Secado	Pretratamiento	Gas	0,44		
		Pirólisis	Conversión			Aceite de pirolisis	
						Char	
		Húmeda	Fermentación			Postratamiento	Etanol
							Ácido succínico
	Etanol						
	[9]	Húmeda	Licuefacción hidrotermal	Conversión	Bio-aceite	0,52	
					Gases	0,18	
					Char		

		Quema de gases y recuperación de calor	Postratamiento	Fase acuosa Energía	
	Seca	Secado en horno rotativo	Pretratamiento		
		Pirólisis	Conversión	Bio-aceite	
				Gases	0,406
				Char	1,41
				Fase acuosa	
		Combustión de subproductos		Energía	
	Húmeda/Seca	Estabilización del bio-aceite	Postratamiento	Bio-aceite mejorado	
		Hidro procesamiento		Biodiesel	0,55
[10]	Húmeda	Digestión anaeróbica	Conversión	Biogás	3,5
[12]	Seca	Secado	Pretratamiento		
		Extracción de aceite	Tratamiento		
		Procesado del aceite			
		Pirólisis	Conversión	Bio-aceite	
				Char	
				Gas	
		Hidrotratamiento	Postratamiento	Biodiesel	0,37
	Húmeda	Extracción de aceite	Tratamiento		
		Procesado del aceite			
		Licuefacción hidrotermal	Conversión	Líquido hidrotermal (HTL)	
		Hidrotratamiento	Postratamiento	Biodiesel	0,28
		Hidrogenación del aceite			
[15]	Seca	Secado	Pretratamiento		
		Extracción supercrítica	Tratamiento		
		Transesterificación		Biodiesel	0,54
		Purificación			
		Digestión anaeróbica	Conversión	Biogás	0,36
	Húmeda	Digestión anaeróbica			5,06
[16]	Húmeda	Anaerobio de aguas residuales	Pretratamiento	Biogás	2,52
		Digestión anaeróbica	Conversión		
		Actualización del biogás	Postratamiento		
[17]	Seca	Disrupción celular	Pretratamiento		
		Secado			
		Molienda			
		Extracción de lípidos	Tratamiento	Lípidos/torta algal	
		Transesterificación		Biodiesel	0,37
				Glicerol	0,17-0,22
		Gasificación	Conversión	Biogás	0,25
				Bio-aceite	0,26
				Bio-char	0,65
	Húmeda	Licuefacción hidrotermal		Biogás	0,058

			Bio-aceite	1,81	
			Bio-char	1,03	
		Estabilización de bio-aceite	Postratamiento	Bio-aceite	2,01
		Hidro procesamiento		mejorado	1,67
[19]	Seca	Secado	Pretratamiento		
		Pirólisis	Conversión	Biodiesel	2,58
		Transesterificación			
[20]	Húmeda	Disrupción celular	Pretratamiento		
		Extracción de lípidos	Tratamiento		
		Digestión anaeróbica	Conversión	Biogás	1,02
		Secado	Pretratamiento	Biomasa seca	
		Extracción de proteínas	Tratamiento	Proteína en polvo	

5.3. Técnica de Granulación ALBA como alternativa de mejoramiento de sistemas convencionales de microalgas

5.3.1. Consorcio de microalgas y bacterias

Con el paso de los años se ha visto que la presencia de las bacterias en los cultivos de microalgas no solo debe verse como un tipo de contaminación causante de problemas en su proceso de crecimiento y en el sistema [33], ya que mediante la observación y experimentación se ha notado que estos microorganismos pueden llegar a formar asociaciones llamados consorcios los cuales, en ciertos casos, son más ventajosos que perjudiciales.

Para que estos consorcios puedan ser formados, tiene que tomarse en cuenta las condiciones climáticas y sustancias que hay en el medio, el hábitat original donde los microorganismos se encontraban y la calidad de los componentes que secretan cada una de las partes, esto más que todo debido a la posible presencia de especies de microalgas que puedan llegar a ser auxotróficas¹ de ciertos componentes liberados por las bacterias como las fitohormonas (auxinas) y vitaminas (biotinas y tiaminas) [34] [35], siendo un total del 25 % de las especies autotróficas para la tiamina y 8% para la biotina [36].

Cabe resaltar que esta asociación de microorganismos también se da en gran parte gracias a una interacción biológica llamada simbiosis [34], la cual en este caso consiste en que las microalgas, al ser seres autótrofos proveen de oxígeno a las bacterias, facilitando la mineralización de la materia orgánica que se encuentre en el medio y gracias a esta oxidación de la materia la bacteria puede producir CO₂, el cual a su vez sirve para el crecimiento fotoautótrofo de las microalgas. Proceso ilustrado en la figura 3.

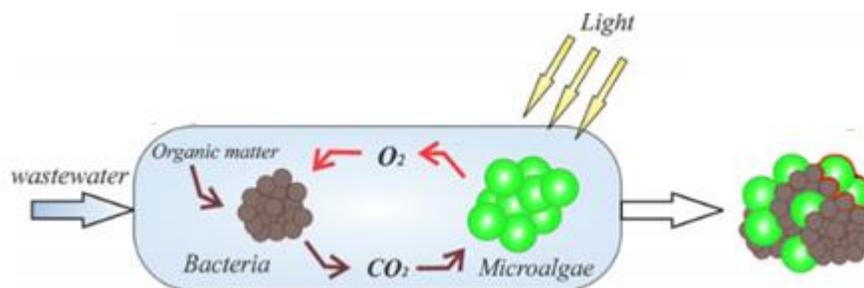


Figura 4. Ilustración de formación de consorcio microalga bacteria (tomado de: [12])

Pero este tipo de relación co-metabólica, no solo se limita al intercambio previamente descrito, ya que las células microalgales proveen a su simbionte (bacteria) un hábitat estable en donde pueda prosperar y concentrando materiales orgánicos que sirven de sustrato [37] [38], logrando su biodisponibilidad para su posterior degradación por parte de la bacteria [39].

Un aspecto que se debe tener en cuenta antes de proseguir al campo de la aplicación en las tecnologías de cosecha de este tipo de biomasa ALBA es que en el consorcio ningún microorganismo debe prevalecer en sentido estricto sobre el otro, aunque las proporciones entre uno y otros alcanzan proporciones bien establecidas. Así, por ejemplo, se estima que en ALBA puede haber una bacteria por cada 5 células microalgales, esto con el fin de evitar la depredación y el desarrollo de interacciones dominantes entre bacterias, que podrían reducir la eficiencia de la agregación y la de productividad de la biomasa [40].

5.3.2. Escenario alternativo para la(s) tecnología(s) de cosecha

Al haber establecido las variables y parámetros que se hacen presentes en las tecnologías de cosecha de biomasa algal en el apartado 5.1 se identificó cuál de ellas tenían un margen de mejora, posibilitando la implementación de un escenario alternativo de menor uso de recursos, especialmente de energía.

Como se menciona en la sección 2.2.2, la sedimentación mediante biofloculación es una de ellas; se trata de una tecnología a la que se le atribuye bajo consumo de energía y no requiere de aditivos o sistemas de soporte extra, que implicaría más costos de capital, pero que presenta la eficiencia más baja de todas las tecnologías de cosecha reportadas. Sin embargo, con la evolución del concepto de consorcios ALBA, una variante de la biofloculación, que hace que este grupo de tecnologías recobre interés y potencial de aplicación.

Para poder analizar el impacto que tendrá la implementación de este escenario se consideró las ventajas y desventajas que este conlleva, para esto, se debe entender que las bacterias toman un papel importante en la biofloculación ya que gracias a la secreción de sustancias como polímeros (ácido poly- gamma-gluta mic) cuyo contenido son ácidos grasos y polisacáridos son usados como floculantes [16], los cuales se usan para reducir las fuerzas de repulsión entre las cargas de los compuestos facilitando la formación de flóculos.

Otro aspecto a tener en cuenta al analizar las ventajas aportadas por la implementación del consorcio es que gracias a que la eficiencia de esta tecnología es baja, esta se puede llegar a aumentar, pues el proceso de crecimiento del floculo se llega a ver afectado, mediante una mejor absorbancia de los nutrientes presentes en el medio y al metabolismo extracelular producido por la bacteria causando que los flóculos sean mucho más largos y densos, lo que sumados al paso del tiempo resultan en flóculos que se pueden llegar a sedimentar de un modo más fácil y estos son los que en última estancia se podrán cosechar.

Ahora debemos preguntarnos si la mejora de la sedimentación nos provee de un mejor desarrollo del sistema y la respuesta es que gracias a que se tiene una mejor sedimentación se llega a dar un mejor control del tiempo de retención de sólidos el cual da paso a que el sistema opere en mejores condiciones causando un alto impacto en las tasas de nitrificación (realizado por el consorcio) dando paso a una reducción del área que abarca al sistema ya que el mismo proceso se puede llevar a cabo en menos espacio y tiempo lo que conlleva a una reducción de recursos.

5.3.3. Comparación entre sistemas que poseen implementación ALBA y los convencionales

El análisis de la información relacionada con granulación ALBA en relación a los convencionales, muestra que la mayor parte de estudios experimentales, se centran en cepas puras de microalgas, sin considerar los microorganismos que de manera natural se pueden encontrar en los efluentes residuales siendo tratados.

Otra característica es la baja o incluso nula similitud de las condiciones que presentan los diferentes ensayos, lo que dificulta la comparación de resultados y la estandarización de valores operacionales de referencia. Algunas causas de estos son la composición variable de las aguas residuales utilizadas de un estudio a otro y la existencia de una gran diversidad de consorcios ALBA que pueden ser formados entre distintas especies de microalgas y bacterias.

Esto a su vez redundaría que todavía la mayor parte de investigaciones se realizan a escala de laboratorio y emplean condiciones de cultivo que todavía suelen ser distantes de las condiciones de operación de las plantas de tratamiento de agua residual a escala real. Algunos de los parámetros que están directamente relacionados con el cultivo y que pueden ser más variables entre los distintos estudios son: pH [38], intensidad lumínica [12], tiempos de retención [41], inyección de nutrientes [38] y tipo de especie microbiana utilizada en la interacción con las microalgas [12] [37].

Un estudio reciente analizó la selección de especies, acorde a la capacidad de remoción de nutrientes, en diversos tipos de aguas residuales con rangos de nutrientes amplios y distintos. Además de buscar microorganismos adaptables, también exploraron la necesidad de aplicar pretratamientos al efluente, para facilitar la formación y adaptación de consorcios, cuya biomasa sea adecuada para obtener productos de alto valor energético [16].

En otros trabajos se evaluó la implementación de diferentes consorcios microalgales en efluentes municipales, sintéticos, y de la ganadería, bajo condiciones controladas de temperatura, volumen de reactor, tiempo de cultivo e intensidad lumínica; mostrando eliminación de N y P mejorados un 60% y 20% respectivamente frente al uso exclusivo de microalgas [34] [35].

Otros estudios se enfocan en el seguimiento del consorcio mediante el control de la cantidad de sólidos suspendidos, ya que estos funcionan como indicador de la calidad del efluente y de capacidad de sedimentación de los gránulos ALBA, cuya formación mostró ser influenciada por la intensidad de aireación, periodos de exposición a la luz y la configuración específica del reactor, cuya base sería un PBR [38] [42].

Como se evidencia, el poco desarrollo y estudio de la puesta en marcha de esta tecnología, todavía limita un conocimiento y análisis más profundo sobre ella, que permita avanzar en su implementación, convirtiéndose en una barrera que permita determinar concluyentemente si pudiese llegar a ser más eficiente, una opción más viable, óptima y sustentable.

Sin embargo, un estudio reciente propone que bajo ciertos métodos de análisis, orientados a entender la estructura, el comportamiento y el estado biológico de los microorganismos mediante técnicas de microscopía, sería posible esclarecer detalles del rol de las microalgas en las asociaciones mutualistas y el nanosims, la determinación de las capacidades metabólicas de las células individuales presentes en cada consorcio, o entender los flujos citométricos en el comportamiento de las comunidades microbianas que se presentan en un consorcio [36].

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con la estructura metodológica, esta sección se ha organizado, estableciendo las conclusiones derivadas para cada objetivo específico, respaldándose así en los resultados obtenidos en el proyecto.

- En relación con el primer objetivo específico, los parámetros más determinantes en la recolección de biomasa algal son la eficiencia de sedimentación, la concentración de la biomasa sedimentada, el factor de sedimentabilidad y el consumo de energía de las tecnologías de cosecha, debido a la relación de mayor concentración de biomasa por menor consumo de energía, representándose en un balance de energía positivo.
- Después de estandarizar las unidades energéticas originalmente reportadas en los distintos estudios consultados, para el segundo objetivo específico se puede establecer que los rangos de consumo típico de energía en la cosecha son de $0,00084 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ a $40 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ para la recolección primaria y de $0,012 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ a $10,8 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ para la recolección secundarias.
- A partir de lo anterior y teniendo en cuenta el análisis estadístico realizado, se demuestra la alta dispersión en el reporte de datos, siendo para recolección primaria 111,18% y para recolección secundaria 113,1%, lo cual es ocasionado por la gran diversidad de tecnologías reportadas. También permite evidenciar una contradicción respecto al tipo de recolección de mayor consumo de energía, en donde en la literatura se define como la recolección secundaria, pero que, según los resultados de este proyecto, correspondería a la de recolección primaria con una media de $6,45 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ en contraste con el $2,42 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de la recolección secundaria.
- Otro aspecto a tener en cuenta para el segundo objetivo es la ruta de valorización energética seleccionada, la cual para este proyecto se definió inicialmente en el estudio exploratorio como producción de biogás y, según el análisis de la etapa de conversión se comprueba y justifica dicha selección, ya que los resultados de los cálculos del NER/FER muestran valores positivos para todas las rutas de producción de biogás mediante digestión anaerobia en ruta húmeda, con un promedio de 2,88, donde el mayor valor es 5,07.
- En lo que respecta al tercer objetivo específico, se confirma que la técnica de granulación ALBA ofrece ventajas en cuanto a la remoción de nutrientes para el tratamiento de aguas residuales, con una mayor eliminación de nitrógeno (N) y fósforo (P) con 60% y 20% respectivamente en comparación con el uso exclusivo de microalgas

como sistema de postratamiento de efluentes; también se reporta regularmente una formación de flóculos de mayor tamaño, siendo favorable para su sedimentación. Sin embargo, la investigación en este campo es precaria en cuanto a la valoración de los consumos de energía en la cosecha para sistemas ALBA.

- Por lo tanto, para el cuarto objetivo específico, donde se postula la comparación entre sistemas sin y con granulación ALBA respecto al desempeño energético de la etapa de cosecha para la producción de biogás, no puede ser desarrollado en sentido estricto. Además, cuando se desea implementar un proceso de tipo ALBA, la exigencia sobre la calidad de sedimentación debe ser muy similar a los que se logran en una unidad de lodos activados tradicional, donde la eficiencia de sedimentación es de 99%, generalmente asociada a consumos energéticos en la deshidratación del lodo de purga del orden de 0.15 a 0.3 kWh.m⁻³, producto de unidades centrífugas. Esto se explica y es congruente con el hecho de que las mejores eficiencias de sedimentación reportadas para ciertos tipos de microalgas, siendo del orden de 92% y parecer muy buenos, están relacionados con consumos de energía por lo menos 3 a 4 veces mayores, mostrando la gran influencia de excesos en el contenido de agua sobre la energía de separación requerida.

7. RECOMENDACIONES

A partir de las anteriores conclusiones, se proponen ciertas recomendaciones para próximas investigaciones, desarrollos o experimentos basados en este proyecto.

- Para una mejor comprensión y viabilidad en futuras comparaciones entre las tecnologías de recolección de biomasa algal se sugiere estipular una unidad estándar para el reporte de los consumos de energía, facilitando el análisis y permitiendo establecer de manera concreta, concisa y más acertada la tecnología más eficiente. También se sugiere revisar la clasificación de las tecnologías de recolección en función de la denominación primaria o secundaria, ya que se identificó ciertas incongruencias en los reportes para dicha clasificación.
- Algunos estudios postulan la idea de la biorrefinería a partir de la biomasa obtenida de microalgas, por lo que, teniendo en cuenta la favorabilidad de la producción de biogás, se sugiere profundizar la investigación en dicha idea para aprovechar los residuos de los procesos de conversión en la producción de productos de alto valor o recirculación y mejorando el balance energético y económico al tener más ingresos por los subproductos.
- Para un adecuado análisis entre sistemas con y sin granulación ALBA para posibles futuras comparaciones, se sugiere mayor investigación en las interacciones de los consorcios microalga-bacteria sobre los consumos de energía y la eficiencia sedimentación, como también su relación con el porcentaje de humedad de la biomasa algal cosechada y su posterior conversión en biocombustibles.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Collet, A. Hélias Arnaud, L. Lardon, M. Ras, R. A. Goy, and J. P. Steyer, "Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 207–214, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.154.
- [2] H. H. Khoo, P. N. Sharratt, P. Das, R. K. Balasubramanian, P. K. Naraharisetti, and S. Shaik, "Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae-to-biodiesel: Preliminary results and comparisons," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 10, pp. 5800–5807, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.02.055.
- [3] E. P. Bennion, D. M. Ginosar, J. Moses, F. Agblevor, and J. C. Quinn, "Lifecycle assessment of microalgae to biofuel: Comparison of thermochemical processing pathways," *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 1062–1071, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.009.
- [4] J. Yuan, A. Kendall, and Y. Zhang, "Mass balance and life cycle assessment of biodiesel from microalgae incorporated with nutrient recycling options and technology uncertainties," *GCB Bioenergy*, vol. 7, no. 6, pp. 1245–1259, 2015, doi: 10.1111/gcbb.12229.
- [5] L. Xu, D. W. F. Wim Brillman, J. A. M. Withag, G. Brem, and S. Kersten, "Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 8, pp. 5113–5122, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.066.
- [6] L. F. Razon and R. R. Tan, "Net energy analysis of the production of biodiesel and biogas from the microalgae: *Haematococcus pluvialis* and *Nannochloropsis*," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3507–3514, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.12.052.
- [7] I. Udom *et al.*, "Harvesting microalgae grown on wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 139, pp. 101–106, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.04.002.
- [8] J. R. Seth and P. P. Wangikar, "Challenges and opportunities for microalgae-mediated CO₂ capture and biorefinery," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 112, no. 7, pp. 1281–1296, 2015, doi: 10.1002/bit.25619.
- [9] R. R. Soomro, T. Ndikubwimana, X. Zeng, Y. Lu, L. Lin, and M. K. Danquah, "Development of a two-stage microalgae dewatering process – A life cycle assessment approach," *Front. Plant Sci.*, vol. 7, no. FEB2016, pp. 1–12, 2016, doi: 10.3389/fpls.2016.00113.
- [10] M. K. Weschler, W. J. Barr, W. F. Harper, and A. E. Landis, "Process energy comparison for the production and harvesting of algal biomass as a biofuel feedstock," *Bioresour. Technol.*, vol. 153, pp. 108–115, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2013.11.008.

- [11] P. Collet, A. Hélias, L. Lardon, J. P. Steyer, and O. Bernard, "Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels," *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 1089–1102, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.056.
- [12] J. Lee, D. H. Cho, R. Ramanan, B. H. Kim, H. M. Oh, and H. S. Kim, "Microalgae-associated bacteria play a key role in the flocculation of *Chlorella vulgaris*," *Bioresour. Technol.*, vol. 131, pp. 195–201, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2012.11.130.
- [13] D. Maga, "Life cycle assessment of biomethane produced from microalgae grown in municipal waste water," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1007/s13399-016-0208-8.
- [14] N. Deconinck, K. Muylaert, W. Ivens, and D. Vandamme, "Innovative harvesting processes for microalgae biomass production: A perspective from patent literature," *Algal Res.*, vol. 31, no. September 2017, pp. 469–477, 2018, doi: 10.1016/j.algal.2018.01.016.
- [15] O. Tiron, C. Bumbac, E. Manea, M. Stefanescu, and M. N. Lazar, "Overcoming Microalgae Harvesting Barrier by Activated Algae Granules," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-05027-3.
- [16] E. J. Olguín, "Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery," *Biotechnol. Adv.*, vol. 30, no. 5, pp. 1031–1046, 2012, doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.05.001.
- [17] N. Prémat, S. E. Taelman, S. De Meester, F. Allais, and J. Dewulf, "Identification of microalgae biorefinery scenarios and development of mass and energy balance flowsheets," *Algal Res.*, vol. 45, no. June 2019, p. 101737, 2020, doi: 10.1016/j.algal.2019.101737.
- [18] P. Collet *et al.*, "Biodiesel from microalgae - Life cycle assessment and recommendations for potential improvements," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 525–533, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.06.009.
- [19] A. H. Shimako *et al.*, "Environmental assessment of bioenergy production from microalgae based systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 139, no. 2016, pp. 51–60, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.003.
- [20] R. Octavio, "Eliminación de nutrientes para el tratamiento biológico de agua residual en crecimiento autotrófico, heterotrófico y mixotrófico.," 2009.
- [21] P. Soriano, "Planta demostración de depuración de aguas residuales con microalgas," pp. 1–22, 2014.
- [22] J. A. Posada, L. B. Brentner, A. Ramirez, and M. K. Patel, "Conceptual

design of sustainable integrated microalgae biorefineries: Parametric analysis of energy use, greenhouse gas emissions and techno-economics,” *Algal Res.*, vol. 17, pp. 113–131, 2016, doi: 10.1016/j.algal.2016.04.022.

- [23] N. Pragma and K. K. Pandey, “Life cycle assessment of green diesel production from microalgae,” *Renew. Energy*, vol. 86, pp. 623–632, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.08.064.
- [24] A. Hernández-Pérez and J. I. Labbé, “Microalgas, cultivo y beneficios,” *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, vol. 49, no. 2, pp. 157–173, 2014, doi: 10.4067/S0718-19572014000200001.
- [25] H. C. Greenwell, L. M. L. Laurens, R. J. Shields, R. W. Lovitt, and K. J. Flynn, “Placing microalgae on the biofuels priority list: A review of the technological challenges,” *J. R. Soc. Interface*, vol. 7, no. 46, pp. 703–726, 2010, doi: 10.1098/rsif.2009.0322.
- [26] Gobierno de España, *Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica*, AST Ingeni. Gijón, Asturias, 2013.
- [27] H. Mendoza, A. De la Jara, and E. Portillo, *Planta Piloto De Cultivo De Microalgas*, no. June 2016. 2011.
- [28] B. B. Marangon, T. A. Silva, M. L. Calijuri, S. do C. Alves, V. J. dos Santos, and A. P. de S. Oliveira, “Reuse of treated municipal wastewater in productive activities in Brazil’s semi-arid regions,” *J. Water Process Eng.*, vol. 37, no. June, p. 101483, 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101483.
- [29] G. G. Zaimes and V. Khanna, *Life cycle sustainability aspects of microalgal biofuels*. Elsevier Inc., 2015.
- [30] F. Arcigni, R. Friso, M. Collu, and M. Venturini, “Harmonized and systematic assessment of microalgae energy potential for biodiesel production,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 101, no. February 2018, pp. 614–624, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.024.
- [31] A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter, and K. Varmuza, “Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 544, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 191–198, 2005, doi: 10.1016/j.aca.2005.01.041.
- [32] D. Fozer, N. Valentinyi, L. Racz, and P. Mizsey, “Evaluation of microalgae-based biorefinery alternatives,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, no. 2, pp. 501–515, 2017, doi: 10.1007/s10098-016-1242-8.
- [33] V. V. Unnithan, A. Unc, and G. B. Smith, “Mini-review: A priori considerations for bacteria-algae interactions in algal biofuel systems receiving municipal wastewaters,” *Algal Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 35–40,

2014, doi: 10.1016/j.algal.2013.11.009.

- [34] J. C. M. Pires, M. C. M. Alvim-Ferraz, F. G. Martins, and M. Simões, "Wastewater treatment to enhance the economic viability of microalgae culture," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 20, no. 8, pp. 5096–5105, 2013, doi: 10.1007/s11356-013-1791-x.
- [35] E. Posadas, P. A. García-Encina, A. Soltau, A. Domínguez, I. Díaz, and R. Muñoz, "Carbon and nutrient removal from concentrates and domestic wastewater using algal-bacterial biofilm bioreactors," *Bioresour. Technol.*, vol. 139, pp. 50–58, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.04.008.
- [36] I. A. Perera, S. Abinandan, S. R. Subashchandrabose, K. Venkateswarlu, R. Naidu, and M. Megharaj, "Advances in the technologies for studying consortia of bacteria and cyanobacteria/microalgae in wastewaters," *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 39, no. 5, pp. 709–731, 2019, doi: 10.1080/07388551.2019.1597828.
- [37] A. Mark Ibekwe, S. E. Murinda, M. A. Murry, G. Schwartz, and T. Lundquist, "Microbial community structures in high rate algae ponds for bioconversion of agricultural wastes from livestock industry for feed production," *Sci. Total Environ.*, vol. 580, pp. 1185–1196, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.076.
- [38] L. Liu, H. Fan, Y. Liu, C. Liu, and X. Huang, "Development of algae-bacteria granular consortia in photo-sequencing batch reactor," *Bioresour. Technol.*, vol. 232, pp. 64–71, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.02.025.
- [39] K. Paranjape, G. B. Leite, and P. C. Hallenbeck, "Effect of nitrogen regime on microalgal lipid production during mixotrophic growth with glycerol," *Bioresour. Technol.*, vol. 214, pp. 778–786, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.05.020.
- [40] R. J. Powell and R. T. Hill, "Rapid Aggregation of Biofuel-Producing Algae by the Bacterium *Bacillus* sp. Strain RP1137," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 79, no. 19, pp. 6093–60101, 2013, doi: 10.1128/AEM.01496-13.
- [41] J. S. Arcila and G. Buitrón, "Microalgae–bacteria aggregates: effect of the hydraulic retention time on the municipal wastewater treatment, biomass settleability and methane potential," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 91, no. 11, pp. 2862–2870, 2016, doi: 10.1002/jctb.4901.
- [42] J. M. Valigore, P. A. Gostomski, D. G. Wareham, and A. D. O'Sullivan, "Effects of hydraulic and solids retention times on productivity and settleability of microbial (microalgal-bacterial) biomass grown on primary treated wastewater as a biofuel feedstock," *Water Res.*, vol. 46, no. 9, pp. 2957–2964, 2012, doi: 10.1016/j.watres.2012.03.023.

- [43] J. F. López, “Medidas de dispersión,” *Economipedia*.
<https://economipedia.com/definiciones/medidas-de-dispersion.html>.
- [44] Flottweg, “Modo de funcionamiento de una centrífuga decantadora.”
<https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/centrifugas/funcionamiento-de-las-centrifugas/>.

9. ANEXOS

9.1. Método estadístico para el análisis de datos

Teniendo los registros de cada parámetro de acuerdo con las secciones establecidas y sus respectivas tablas con toda la data documentada, se realizó un análisis estadístico previo al análisis objetivo del proyecto, con el fin de proporcionar más herramientas de análisis para entender la información desde todos los puntos de vista, como el promedio de los valores, la desviación estándar y la dispersión de datos

Se definieron los datos como no agrupados, los cuales son los datos sin procesar y tomados exactamente de la fuente de información, como en este caso que son registros de reportes de la literatura sin ningún patrón, orden o esquema, siendo la organización uno de nuestros objetivos a cumplir. Los parámetros para analizar son tasa de crecimiento, GCV, eficiencia de sedimentación, concentración de biomasa sedimentada, concentración de sólidos totales, factor de sedimentabilidad y consumo energético de la cosecha, al ser parámetros que ofrecen valores comparables; aquellos parámetros que se enfocaron en las tecnologías de cosecha, se manejaron los tipos de recolección (primaria y secundaria) por separado, realizándole los cálculos respectivos a cada uno para posteriormente poder compararlos entre sí.

Para el análisis estadístico primero se elaboraron otras tablas en donde se ordenaron todos los valores para cada parámetro de menor a mayor sin importar si se repetían. Al ordenarse, se contabilizó la cantidad de datos y se calculó el rango a partir de la siguiente fórmula:

$$Rango = X_{m\acute{a}ximo} - X_{m\acute{i}nimo} \quad (1)$$

El rango es un valor numérico que indica la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de una población o muestra estadística [43]. El resultado sirve para calcular la amplitud o intervalo de clase (I), pero para ello primero se debe calcular la cantidad de clases, que son los segmentos o grupos en que se dividen todos los datos. Las fórmulas para el número de clases y la amplitud son:

$$\#clases = 1 + 3,33 * \log(n) \quad I = \frac{Rango}{\#clases} \quad (2)$$

Donde n = tamaño de la muestra

Por conveniencia, la cantidad de clases se asume mínimo 5 si el resultado del cálculo da menor a este valor.

Una vez calculado el #clases y la amplitud, se elaboró la tabla de distribución de frecuencia para cada parámetro y tipo de recolección correspondiente, en la cual se registraron las clases, el rango de clase, el promedio de cada rango de clase (X_i), la frecuencia de valores que pertenecen a cada rango de clase (F_i) y la media de todos los datos (\bar{X}). Las fórmulas correspondientes para las anteriores medidas de dispersión son:

$$\text{Rango de clase}_{\#} = (\text{Limite}_{inferior} - \text{Limite}_{superior})_{\#} ; \text{Lim}_{sup} = \text{Lim}_{inf} + I \quad (3)$$

$$X_i = \frac{\text{Lim}_{inf} + \text{Lim}_{sup}}{2} \quad (4)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i * F_i}{n} \quad (5)$$

Con los cálculos anteriores realizados, se rellenó el resto de la tabla de distribución con operaciones matemáticas necesarias para los cálculos de desviación estándar y dispersión de datos. Dichos cálculos son:

- El valor absoluto de la resta del promedio de cada clase menos la media de datos $\rightarrow |X_i - \bar{X}|$
- La multiplicación de la frecuencia de cada rango de clase por el resultado de la anterior operación $\rightarrow |X_i - \bar{X}| * F_i$
- La elevación al cuadrado de la resta entre el promedio de cada clase menos la media de datos $\rightarrow (X_i - \bar{X})^2$
- La multiplicación de la frecuencia de cada rango de clase por el resultado de la anterior operación $\rightarrow (X_i - \bar{X})^2 * F_i$

Finalmente se calcularon la desviación estándar (S) y la dispersión de datos, representada en el coeficiente de variación (Cv). Para el cálculo de la desviación estándar primero se debe calcular la varianza (S^2). Las fórmulas necesarias son:

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2 * F_i}{n - 1} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2 * F_i}{n - 1}} \quad (7)$$

$$Cv = \frac{S}{\bar{X}} * 100\% \quad (8)$$

Los resultados tenidos en cuenta para el análisis estadístico son la media de datos (\bar{x}), la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (Cv). La \bar{x} permite tener un valor promedio que represente el conjunto de datos de cierto parámetro; la S permite identificar cuán desviados están los datos respecto a la media representado en un valor puntual con la unidad que maneje cada parámetro, y el Cv es la representación de la desviación estándar en valor porcentual y adimensional, midiendo la dispersión de los datos.

Además del análisis estadístico, se realizó un cálculo porcentual para las cantidades de artículos que reportaran un parámetro en específico, en donde el 100% representaba el total de artículos analizados con reporte para cada sección. Los valores se muestran entre paréntesis en seguida de la mención de la cantidad de artículos.