

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS EN LA
SEPARACIÓN DE BIOMASAS DE MICROALGAS UTILIZADAS EN TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES POR MÉTODO DE CENTRIFUGACIÓN

ANTONINO ANTOLINEZ AUGELLO
JONATHAN RICARDO ACOSTA CRUZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA
2022

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS EN LA
SEPARACIÓN DE BIOMASAS DE MICROALGAS UTILIZADAS EN TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES POR MÉTODO DE CENTRIFUGACIÓN

ANTONINO ANTOLINEZ AUGELLO
JONATHAN RICARDO ACOSTA CRUZ

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR:
PhD. ALEXANDER MENESES JACOME

ASESORA:
JASMIN LORENA DURAN ORTIZ
MICROBIÓLOGA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA
2022

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga 01 de junio de 2022

CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Interés y Aplicaciones.....	9
1.2 Estado del arte de separación o cosecha de las microalgas	10
1.2.1 Especies de microalgas de interés para el presente estudio	10
1.2.2 Métodos de separación físico-mecánica de biomosas tipo microalga	11
1.3 Orientación del Estudio.....	11
1.3.1 Objetivo General.....	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
2. MARCO TEÓRICO.....	13
3. METODOLOGÍA	14
3.1 Métodos, técnicas y parámetros experimentales del estudio	14
3.1.1 Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	14
3.1.2 Sólidos Disueltos Totales (SDT)	14
3.1.3 Filtración al vacío	14
3.1.4 Floculación.....	15
3.1.5 Prueba de Jarras	15
3.1.6 Centrifugación.....	15
3.1.7 Espectrofotometría.....	16
3.1.8 Agua sintética.....	17
3.1.9 Medios de cultivo.....	17
3.1.10 Reactor de columna.....	17
3.2 Etapas metodológicas.....	18
3.2.1 Objetivo 1: Cultivo de microalgas	18
3.2.2 Objetivo 2: Separación de biomasa.....	20
3.2.3 Objetivo 3: Escalado de la operación de centrifugación a nivel de laboratorio.....	22
4. RESULTADOS.....	28
4.1 Resultados estudio exploratorio	28
4.2 Resultados del Cultivo de microalgas.....	29
4.3 Resultados de la Etapa de separación de biomasa	30
4.4 Resultados de Escalado de la operación de centrifugación	32
4.4.1 Cálculo energético del modelo de centrífuga semiindustrial.....	32

4.4.2 Consumo energético de la centrífuga semiindustrial	33
5. CONCLUSIONES	35
6. RECOMENDACIONES.....	36
REFERENCIAS.....	37
7. ANEXO.....	39
7.1 Concentraciones medios de cultivo	39
7.2 Composición agua residual sintética.....	40

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Equipo de filtración al vacío.....	15
Imagen 2. Filtros de celulosa y de fibra de vidrio.	15
Imagen 3. Centrífuga Universal 320R.	16
Imagen 4. Spectroquant Pharo 300.	16
Imagen 5. Reactores de columna.	17
Imagen 6. Medios de cultivo líquidos Bristol, Bold´s basal y Zarrouk.	18
Imagen 7. <i>Chlorella vulgaris</i> en medio sólido.	19
Imagen 8. Biorreactores de columna de <i>A. platensis</i> , <i>S. ternata</i> , <i>S. obliquus</i> y <i>C.vulgaris</i>	19
Imagen 9. Cultivo de <i>Chlorella</i> en agua residual sintética	19
Imagen 10. Filtro con biomasa algal para realizar SST	20
Imagen 11. Proceso previo y posterior a la separación de la biomasa.....	20
Imagen 12. Prueba de jarras con alumbre y cloruro férrico para <i>C. vulgaris</i>	21
Imagen 13. Vista al microscopio de <i>C. vulgaris</i> en su estado normal y con alumbre.	21
Imagen 14. Centrífuga semiindustrial modelo OTC 2-02-137.[24]	23

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultado centrifugación <i>Arthrospira platensis</i>	28
Gráfica 2. Curva de crecimiento <i>C. vulgaris</i>	29
Gráfica 3. SST en diferentes condiciones de operación.	31
Gráfica 4. Porcentaje de eficiencia en diferentes condiciones de operación.	31

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características centrífuga modelo GEA Westfalia OTC 2-02-137.	26
Tabla 2. Conductividad medios de cultivo	28
Tabla 3. Concentraciones SST teóricas y experimentales.	29
Tabla 4. Resultados prueba de jarras de alumbre y cloruro férrico.	30
Tabla 5. Consumo energético de la centrífuga del laboratorio	32
Tabla 6. Datos experimentales de caudal de la centrífuga.....	33
Tabla 7. Concentraciones medio Bold's Basal.....	39
Tabla 8. Concentraciones medio Zarrouk.....	39
Tabla 9. Concentraciones medio Bristol.....	40

RESUMEN

En el presente proyecto se plantea evaluar de manera experimental el consumo energético de la técnica de separación por centrifugación para la obtención de biomasa micro algal cultivada en medios o substratos conocidos o agua residual sintética representativa de efluentes de interés y otros caldos enriquecidos con sales; teniendo en cuenta el crecimiento paulatino de estas biomásas, dicho crecimiento se obtuvo aplicando la técnica de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y absorbancias a través de espectrofotometría, probando distintas condiciones de separación como lo son variables de velocidad y tiempos además del uso no de un floculante coagulante comercial para facilitar la separación. Estas mediciones se realizan para poder determinar condiciones para una separación eficiente y poder obtener resultados esperados.

PALABRAS CLAVES: CENTRIFUGACIÓN / BIOMASA / SEPARACIÓN / MICROALGA

ABSTRACT

In the present project we propose to experimentally evaluate the energy consumption of the centrifugal separation technique to obtain microalgal biomass cultivated in known media or substrates or synthetic wastewater representative of effluents of interest and other broths enriched with salts; Taking into account the gradual growth of these biomasses, such growth was obtained by applying the technique of Total Suspended Solids (TSS) and absorbances through spectrophotometry, testing different separation conditions such as speed and time variables in addition to the use of a commercial coagulant flocculant to facilitate the separation. These measurements are performed in order to determine the conditions for an efficient separation and to obtain the expected results.

KEY WORDS: CENTRIFUGATION / BIOMASS / SEPARATION / MICROALGAE

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el interés por los biocombustibles y la búsqueda de nuevas fuentes de energías renovables se ha convertido en un propósito mundial, debido al agotamiento de los combustibles fósiles y al calentamiento global. Esto ha renovado el interés por las microalgas para producción de combustibles alternativos, debido a sus características de reproducción, siendo que esta biomasa puede crecer más rápido y producir más aceite por unidad de superficie y por unidad de tiempo que las biomásas energéticas terrestres, además de crecer en entornos o ambientes complejos para su cultivo [1], [2].

La utilización de microalgas en el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, agrícola y/o industrial también ha retomado gran interés, como alternativa para la separación y remoción de la carga biológica y de los nutrientes que estos puedan contener, mediante la asimilación nutricional de macronutrientes y micronutrientes; nutrientes que se encuentran disueltos o suspendidos en los efluentes contaminados y de llegar a cuerpos de agua superficiales, pueden promover fenómenos o eventos de eutrofización e hipereutrofización en estos receptores [3], [4]. Simultáneamente, la remoción de la contaminación orgánica y por nitrógeno por medio de esta tecnología, representa una forma de reducir precursores de emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a reducir el calentamiento global. [5].

El desarrollo de tratamiento de aguas residuales basados en cultivos de microalgas depende fundamentalmente de factores como la disponibilidad de nutrientes, una adecuada exposición a la luz, rangos óptimos de pH, compatibilidad entre las cepas y el efluente a tratar, entre diversos factores, que finalmente tienen no solo influencia en el crecimiento de la biomasa algal, sino en el desarrollo de características en este tipo de biomasa, que facilitan su posterior cosecha [6]–[8].

A principios del siglo XX, se observó que las microalgas aumentaban la eficacia del tratamiento de las aguas residuales al airear el agua y consumir los residuos. Pero aun así el interés en esa época estaba fijado hacia otras tecnologías haciendo que finalmente fuera casi abandonado y solo un puñado de investigadores continuaron con sus investigaciones en este campo. En la actualidad este campo de estudio fue retomado trayendo consigo avances visibles tanto en tratamiento de aguas domésticas como industriales.

No obstante, en ambos casos se ha identificado que el principal cuello de botella se encuentra en el método de separación, al cual se le atribuyen costos energéticos mayores por unidad de masa separada o volumen de agua tratado, disminuyendo su potencial de implementación en plantas de tratamiento aguas residuales, pues a pesar de poder generar energía con la biomasa recolectada, esta puede llegar a no ser suficiente para suplir el gasto de la separación por medios mecánicos, haciendo que el balance energético impida un cierre económico más satisfactorio y plantea un claro problema que necesita ser atendido para el avance de la tecnología [9], [10].

1.1 Interés y Aplicaciones

El Gobierno de Colombia en su apuesta de Estrategia Nacional de Economía Circular, emitió el 28 de septiembre de 2020 una política de economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales, que busca la adopción de un modelo o modelos para la

implementación de la gestión integral y sostenible y conjunta del ciclo urbano del agua, es decir de los servicios o sistemas de acueducto y saneamiento, referido a principios de economía circular, que entre otros estimulen el reúso de aguas residuales con el fin de garantizar la oferta hídrica a largo plazo y la recuperación de recursos a partir de los subproductos de dichos sistemas [11].

Al querer estimular el reúso de aguas residuales y la utilización de los subproductos derivados del tratamiento, se busca estimular la recuperación de energía, de las fuentes de agua, de los nutrientes disponibles en estos efluentes y de los microorganismos, como posibles fuentes de materias primas para la economía circular. Es en este contexto donde la tecnología del tratamiento de agua con microalgas recobra interés en nuestro medio, dada su capacidad o potencial de ofrecer simultáneamente servicios de saneamiento y la producción de una biomasa multipropósito, que además genera expectativas para la generación de nuevas cadenas de valor a partir de la biomasa algal cosechada, sea en la forma de bioenergía, bioproductos o nutrientes (nitrógeno, fósforo) recuperados

1.2 Estado del arte de separación o cosecha de las microalgas

Según un estudio realizado previamente por estudiantes de la UNAB, donde se realizó la revisión de 44 artículos científicos, en relación con la media de crecimiento de las algas *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis occulata* y *Scenedesmus dimorphus* en $25,55 \text{ g/m}^2/\text{día}$ con una desviación estándar del 86,03% de dispersión con 17 datos, equivalente a $21,98 \text{ g/m}^2/\text{día}$, [12]

Con estas tasas de crecimiento se espera obtener una alta concentración de biomasa en el proceso de cultivo, lo que implica el uso de tecnologías para la separación de la biomasa microalga que demandan mayor eficiencia y por ende altos consumos de energía, ya que en este caso la tecnología prevalente para esta operación es la de centrifugación.

Existen otros métodos para la recuperación de la biomasa como los son la sedimentación, filtración, floculación, flotación, entre otras, los cuales son más económicos y se han combinado con la de centrifugación para reducir los consumos y costos energéticos. [12]

La biomasa cosechada en estas tecnologías varía entre 1.3 g/L a 50 g/L, mientras que en los diferentes métodos de separación por centrifugación se encuentran rangos de separación más altos, entre 50 g/L a 240 g/L, estos datos evidencian que los métodos alternativos a la centrifugación no son tan eficientes al momento de la separación de los efluentes y las microalgas [12], [13]. Debido a la naturaleza de las microalgas, es decir a no formar gránulos o estructuras de fácil sedimentación natural, tienden a evitar una floculación o granulación adecuada en los procesos de separación del agua tratada, aumentando el consumo energético, y es así como se estima que la tecnología de centrifugación puede acusar consumos superiores a 194.4 kWh/Ton de biomasa microalgal cosechada. También se obtuvieron datos para la filtración de vacío con consumos superiores a 5900 kWh/Ton debido a su requerimiento continuo de la bomba, acompañado de un frecuente reemplazo de las membranas [9], [10], [12].

1.2.1 Especies de microalgas de interés para el presente estudio

En el presente trabajo de grado, se tomaron cuatro cepas de microalgas como punto de partida para

el desarrollo experimental: *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Spirogyra ternata* y *Scenedesmus obliquus*.

Esta selección de microalgas se realizó con base en su disponibilidad en el laboratorio del Centro de Investigaciones en Bioeconomía Circular (ϵ -BiO) de la UNAB y antecedentes en su aplicación en aguas residuales domésticas. En general, estas especies cuentan con antecedentes bibliográficos sobre su cultivo, recolección e información sobre los floculantes utilizados en ellas para mejorar los métodos de separación de forma mecánica [14]

1.2.2 Métodos de separación físico-mecánica de biomasa tipo microalga

La biomasa microalgal puede ser recuperada o cosecha a través de diferentes métodos como lo son la centrifugación, filtración, flotación, floculación y sedimentación. En algunos casos se puede optar por una combinación de los métodos mencionados.

La separación de biomasa microalgal presenta dificultades principalmente por el tamaño de las estas que ronda entre 2 y 200 μ m, por lo que en determinados casos se recomienda un proceso previo de floculación. Algunos reportes muestran que el costo de recolección de biomasa microalgal representa más de un 20% del costo total de la producción de biomasa, por lo cual es de gran importancia para el balance económico del proyecto la selección del método de separación a utilizar; siendo así relevante tener conocer, caracterizar el proceso y diferenciar los distintos métodos.

Métodos como la sedimentación, flotación y floculación se perfilan como los más eficientes en relación con su efectividad y costo de ejecución, pero son inviables para procesos de mayor escala debido a sus tiempos de trabajo, costos de materiales a gran escala y efectos negativos en el grado de pureza. La filtración siendo un método comúnmente utilizado para la separación resulta poco eficiente para especies de tamaño menor como el caso de *Chlorella* y *Scenedesmus*, otro factor negativo es su costoso consumo de energía debido a su bombeo continuo.

La centrifugación por otro lado es un método de separación de biomasa microalgal que puede ser rápido y eficaz, obteniendo porcentajes de remoción altos (>90%). También es un proceso de separación costoso que tiene una alta demanda energética superando consumos de 190kWh por tonelada de biomasa removida, aún así es el método predominante en la recuperación de biomasa microalgal.

1.3 Orientación del Estudio

La orientación de este estudio es experimental exploratoria, para evaluar la separación de algunas biomasa microalgales por medio de la técnica de centrifugación, y que han sido cultivadas en medios conocidos para estimular el rendimiento de este tipo de microorganismos o en aguas residuales sintéticas, que asemejan algunas macro características de efluentes municipales, así se ha buscado proyectar eficiencias de separación y establecer consumos energéticos, con el fin de validar con los rangos teóricos determinados en un estudio monográfico precedente realizado por estudiantes del PIEE de la UNAB. [12]. Esta orientación se desarrolla en concordancia con los siguientes objetivos:

1.3.1 Objetivo General

Evaluar experimentalmente el consumo energético de la centrifugación como técnica de separación de biomasa micro algal cultivada en medios o substratos conocidos o agua residual sintética representativa de efluentes de interés.

1.3.2 Objetivos específicos

- Cultivar tres cepas de microalgas diferentes en reactores a escala de laboratorio, haciendo seguimiento a su crecimiento (rendimiento celular) mediante el parámetro SST (sólidos suspendidos totales).
- Realizar experimentos de separación de las biomásas microalgales cultivadas mediante la operación de centrifugación a escala de laboratorio, tomando como referencias variables de: tiempo y velocidad de la centrifugación, uso o no de un coagulante-floculante comercial, estableciendo la eficiencia de separación de los distintos experimentos y el consumo energético de la operación de separación por centrifugación para las condiciones experimentales que evidencien las mejores eficiencias de separación.
- Aplicar técnica de escalado al proceso de centrifugación de laboratorio para la obtención de datos de operación industrial y realizar cálculo de energía consumida por metro cubico de agua tratada.

2. MARCO TEÓRICO

Este marco teórico se dedica a complementar el estado del arte presentado anteriormente, donde en un estudio monográfico realizado por estudiantes de la UNAB realizaron una revisión de aproximadamente 44 artículos científicos donde evaluaron el desempeño energético de diferentes tecnologías para la cosecha de la biomasa algal obtenida a partir de tratamiento de aguas residuales con fines de producción de biogás.

Actualmente la crisis del agua y la preocupación por la contaminación ambiental han llevado a investigar y explorar nuevas alternativas para la mejora de los procesos convencionales del tratamiento de agua residual, utilizando las microalgas que se benefician de la carga orgánica que llevan efluentes cuyas características determinan la adaptabilidad de las especies, siendo esto un gran reto para diseñar y optimizar procesos de tratamiento que logren altas eficiencias de remoción con bajos costos. [15]

Las microalgas tienen diferentes aplicaciones que van desde productos farmacéuticos, cosméticos, suplementos, combustibles, así como fuente de alimento para humanos y animales. La ampliación de la producción de microalgas para satisfacer el consumo mundial no se ha realizado aún, debido a su alto costo de producción que puede reducirse cultivándolas en fuentes de aguas residuales donde están ampliamente disponibles y al mismo tiempo pueden conducir a la biorremediación de aguas residuales.[16]

El crecimiento de la contaminación del mundo incrementa la demanda de agua, alimentos, energía y tecnología, lo que a su vez conducen a una mayor cantidad de aguas residuales domésticas e industriales. Estas diferentes aguas residuales contienen una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, que pueden causar graves problemas ambientales si son liberados sin tratamiento. Las microalgas son candidatos prometedores ya que son capaces de reducir la cantidad de nitrógeno, fosfatos y otros componentes tóxicos. [17]

Finalmente es relevante aclarar que se ha considerado conveniente que otros aspectos como parámetros, técnicas, métodos, materiales y definiciones dentro del estudio se han explicado en la metodología para así construir una estructura adecuada para la lectura y entendimiento del estudio por parte de los lectores.

3. METODOLOGÍA

Antes de proceder con la descripción de los componentes metodológicos de cada objetivo específico es importante definir los principales métodos, técnicas y parámetros experimentales utilizados en este estudio para facilitar su comprensión.

3.1 Métodos, técnicas y parámetros experimentales del estudio

3.1.1 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Según Standard Methods 2540D, para la determinación de los SST se basa en el incremento de peso que experimenta un filtro microporoso, tras un proceso de filtración al vacío de una muestra líquida con sólidos en suspensión que son retenidos en dicha barrera y que posteriormente se seca a 105°C. El aumento de peso del filtro representa los sólidos suspendidos totales retenidos y dan una idea aproximada de la cantidad de biomasa representada en los SST [18], [19]

$$mg \text{ sólidos suspendidos totales} / L = \frac{(A - B) \times 1000}{\text{volumen de la muestra, mL}}$$

Donde,

A= Peso final del residuo seco y el recipiente, mg.

B= Peso del recipiente, mg.

3.1.2 Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Según Standard Methods 2040C, los sólidos disueltos totales son el residuo resultante de la evaporación de una muestra de agua, en este caso residual, previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio de 47mm con poros de una abertura de 1.5µm. El agua o sustancia es evaporada a 180°C junto al residuo, reportándose así el resultado en SDT mg/L/. Estos sólidos incluyen sales, minerales, metales y compuestos orgánicos o inorgánicos que se encuentran disueltos. Una definición más simple de los sólidos disueltos totales es la porción de sólidos totales en la muestra de agua que travesó el filtro con un poro nominal de 2µm o menos. [19]

$$mg \text{ sólidos disueltos totales} / L = \frac{(A - B) \times 1000}{\text{volumen de la muestra, mL}}$$

Donde,

A= Peso final del residuo seco y el recipiente, mg.

B= Peso del recipiente, mg.

3.1.3 Filtración al vacío

Técnica de separación donde se utiliza un equipo de filtración en polisulfona con capacidad de 300 ml y una bomba de vacío de hasta 1/12 HP. Ver imagen 1.



Imagen 1. Equipo de filtración al vacío.
Fuente: Autor

Esta técnica es utilizada para poder separar las biomazas microalgales cosechadas en un medio líquido. Consiste en el vertimiento de la mezcla en un embudo que cuenta con un filtro microporoso. Se probaron dos tipos de filtro, unos de celulosa con un tamaño de poro de $0.45\mu\text{m}$ y otros de fibra de vidrio con un tamaño de poro de $1.2\mu\text{m}$. Finalmente se escogió el de filtro de fibra de vidrio que asegura una mayor capacidad para retener los SST. Ver imagen 2.



Imagen 2. Filtros de celulosa y de fibra de vidrio.
Fuente: Autor

3.1.4 Floculación

Técnica de separación que consiste en la adición de sustancias denominadas floculantes (cloruro férrico y alumbre), que permiten la agrupación de partículas pequeñas que conforman los llamados flóculos que posteriormente facilitan la decantación y el posterior proceso de separación de biomasa.

3.1.5 Prueba de Jarras

Procedimiento de la Norma Técnica Colombiana NTC3903 para el ensayo de floculación que determina la dosis óptima del reactivo químico que se ensaya. Consiste en agitar la muestra de manera rápida en corto tiempo y luego de manera lenta durante 20 minutos. Posteriormente se mide la turbidez resultante. [20]

3.1.6 Centrifugación

Esta técnica de separación se define como la separación de sustancias mediante diferencia de densidades, a través de la aplicación de energía cinética, esto mediante una aceleración determinada en revoluciones por minuto adicionando una fuerza adicional a la gravedad que se

llama fuerza centrífuga. A nivel de laboratorio, en este estudio, se utilizó la centrifuga de Hettich Universal 320R tipo 1406-01, que se muestra en la imagen 3.

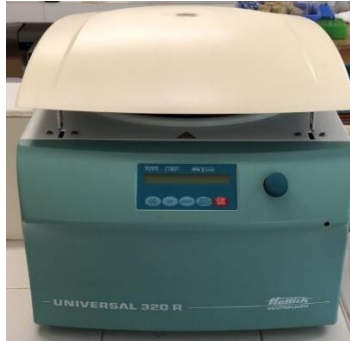


Imagen 3. Centrífuga Universal 320R.
Fuente: Autor

Las características de la centrífuga son:

- Velocidad máxima de 16000 RPM
- Aceleración de 24900 RCF
- Densidad máxima 1.2 kg/dm³
- Tensión de 115-127V
- Corriente de 8A
- Potencia de 950VA (aprox. 760W)
- Dimensiones ancho 407mm, profundidad 698mm y altura 346mm
- Diámetro del rotor 40.1 cm

3.1.7 Espectrofotetría

Es una técnica de medición la cual por absorbancia de la luz que pasa a través de una celda de vidrio o de cuarzo, se mide la concentración de un compuesto en una solución en función de una longitud de onda. [21]Ver imagen 4.



Imagen 4. Spectroquant Pharo 300.
Fuente: Autor

En este experimento se determina la presencia de pigmentos de clorofila-a a 440 nanómetros y 560 nanómetros para determinar la concentración de biomasa en el cultivo algal. [22]

3.1.8 Agua sintética

Un agua residual sintética es una mezcla artificial que simula agua residual doméstica realizada con cálculos que determinan el requerimiento de DQO (demanda química de oxígeno) y la cantidad de reactivos los cuales son referenciados como: son 200 mg/L de DQO, 5 mg/L de P (fosforo) y 36 mg/L de N (nitrógeno). [23]. El agua sintética preparada para este trabajo se validó con los anteriores parámetros en el laboratorio de estudios ambientales de la UPB.

3.1.9 Medios de cultivo

Los medios de cultivo son mezclas preparadas de nutrientes que simulan un ambiente idóneo de crecimiento de las microalgas, esta disolución acuosa contiene los nutrientes inorgánicos necesarios en cantidades suficiente, además debe estar exento de microorganismos contaminantes para el desarrollo normal de las microalgas. Estos nutrientes son agua, carbono, oxígeno, nitrógeno y fósforo. El suministro del medio y las concentraciones de nutrientes que pueden ser necesarios depende exclusivamente de las especies y es importante tenerlo presente para evitar producir limitaciones que disminuyan la producción de biomasa. Las microalgas seleccionadas en este estudio, *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis* y *Scenedesmus obliquus* fueron cultivadas en medios Bristol, Zarrouk y Bold's Basal.

3.1.10 Reactor de columna

Los reactores utilizados para la bioaumentación de las microalgas son de tipo columna, como se muestran en la imagen 5; funcionan como contenedores cilíndricos de vidrio con una inyección de aire por burbujeo en el fondo, que además de oxígeno permiten el mezclado del caldo de cultivo y las microalgas inoculadas. Sus especificaciones son 80 cm de altura, 5.5 cm de diámetro y un flujo continuo de aire de aproximadamente 1.5 L/min. El factor de aireación es importante ya que sin ningún tipo de medio de aireación o mezcla genera que las células mueran o no se pueda registrar más crecimiento.



Imagen 5. Reactores de columna.
Fuente: Autor

3.2 Etapas metodológicas

Para cada objetivo específico hay un componente propio a nivel de la metodología y se describen a continuación:

3.2.1 Objetivo 1: Cultivo de microalgas

- Preparación de los medios de cultivo líquido Zarrouk, Bristol y Bold's basal:
 1. Disolver los componentes de cada medio en agua destilada.
 2. Medir el pH. Rango [8-12].
 3. Esterilizar en autoclave a 121°C, 15 libras de presión por 15 minutos.



Imagen 6. Medios de cultivo líquidos Bristol, Bold's basal y Zarrouk.

Fuente: Autor

- Inoculación de las algas en los medios líquidos específicos para cada una en condiciones de aireación y luz natural.
 1. Las cepas de cada alga a experimentar, cultivadas en medios sólidos (agar-agar) fueron entregadas por el Centro E-Bio de la cual se extrajeron colonias y sembradas en 3 ml de medio líquido durante 2 semanas con luz natural sin aireación para su multiplicación. Las algas se sembraron en los siguientes medios: *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* en medio Bristol, *Arthrospira platensis* en medio Zarrouk. y *Spirogyra ternata* en medio Bold's basal. Ver imagen 7.
 2. Posteriormente se toma 1 ml del alga inoculada en medio líquido y se lleva un frasco con 99 ml del mismo medio, durante 2 semanas.
 3. Posteriormente este último crecimiento se lleva a los reactores de columna con 900 ml de medio y 100 ml de alga en crecimiento durante 4.5 semanas. Ver imagen 8.
- Siembra de *Chlorella vulgaris* y *Arthrospira platensis* en agua residual sintética con igual procedimiento anterior y en luz natural y aireación. Ver imagen 9.
- Parámetro de medición SST. El crecimiento se midió cada 7 días. Ver imagen 10.



Imagen 7. *Chlorella vulgaris* en medio sólido.
Fuente: Autor



Imagen 8. Biorreactores de columna de *A. platensis*, *S. ternata*, *S. obliquus* y *C.vulgaris*.
Fuente: Autor



Imagen 9. Cultivo de *Chlorella* en agua residual sintética
Fuente: Autor



Imagen 10. Filtro con biomasa algal para realizar SST
Fuente: Autor

3.2.2 Objetivo 2: Separación de biomasa

De acuerdo con el seguimiento para determinar el rango más alto de concentración biomasa microalgal con los parámetros anteriores se realizan los siguientes procesos para la separación de la biomasa:

- **Proceso sin coagulante**

1. Medición de absorbancia y SST iniciales.
2. Se retira la oxigenación y se desmontan los biorreactores.
3. Se reparten 40 ml en tubos falcón.
4. Se centrifuga a 2500, 4500 y 6500 rpm y tiempos de 4, 6, 8 minutos a temperatura de 15°C.
5. El sobrenadante se filtra para determinar SST y absorbancia finales. Ver imagen 11.

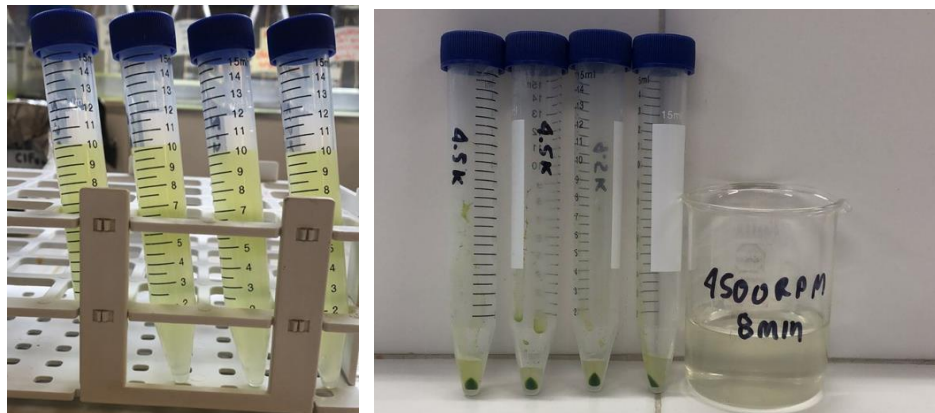


Imagen 11. Proceso previo y posterior a la separación de la biomasa.
Fuente: Autor

- **Proceso con coagulante**

Se utilizan dos tipos de coagulantes comerciales en base a estudios experimentales y sugeridos en la norma NTC 3903 los cuales son el alumbre y el cloruro férrico. Las concentraciones del floculante fueron variadas desde valores mínimos aceptables de eficiencia (>60%) hasta los valores más altos (>90%) hallados en la literatura [10], [20].

Para el alumbre se establecieron 3 concentraciones: 200 mg/L, 250 mg/L y 300 mg/L y para el Cloruro férrico fueron de 150 mg/L, 200 mg/L y 250 mg/L. [10]. Ver imagen 12.



Imagen 12. Prueba de jarras con alumbre y cloruro férrico para *C. vulgaris*.

Fuente: Autor

A nivel microscópico se observan las células de *C. vulgaris* aglomeradas por efecto del alumbre. Ver imagen 13.

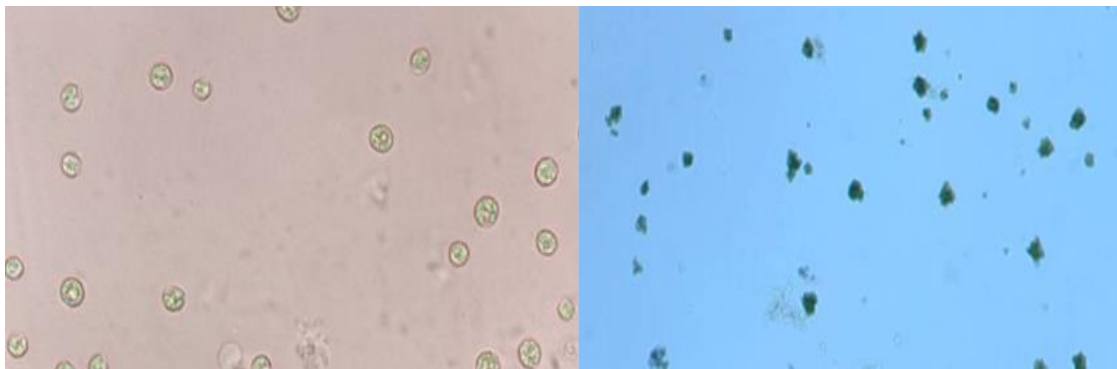


Imagen 13. Vista al microscopio de *C. vulgaris* en su estado normal y con alumbre.

Fuente: Autor

El proceso se realizó en los siguientes pasos:

1. Medición de absorbancia y SST iniciales
2. Se retira la oxigenación y se desmontan los biorreactores.
3. Se realiza la prueba de jarras para determinar el coagulante más eficiente
4. Se reparten 40 ml en tubos falcón con la muestra y coagulante en el mejor dato obtenido en la prueba de jarras con 2 floculantes y 3 dosis ppm
5. Se centrifuga a 2500, 4500 y 6500 rpm y tiempos de 4, 6, 8 minutos a temperatura de 15°C.
6. El sobrenadante se filtra para determinar SST y absorbancia finales.

- **Cálculo de la eficiencia de separación y remoción:**

Con los datos obtenidos de las absorbancias iniciales y finales en los distintos experimentos, se determina la eficiencia de separación mediante la fórmula:

$$\frac{Abs_0 - Abs_1}{Abs_0} \times 100 = \%$$

Abs₀ = Absorbancia inicial.

Abs₁ = Absorbancia final

- **Cálculo consumo energético del proceso de separación:**

El consumo energético a nivel de laboratorio del proceso se realizó utilizando las especificaciones técnicas de cada equipo utilizado en el proyecto, se tuvieron en cuenta sus potencias y sus voltajes y corrientes consumidas. Los equipos que no brindaban datos de potencia de manera que se calcularon con la siguiente formula:

$$P = V \times I$$

Donde:

P = Potencia [kW]

V = Voltaje [V]

I = Corriente [A]

Ya obtenida la potencia, se hizo un promedio del tiempo de uso para cada equipo, para lograr determinar la potencia consumida al día, mediante la siguiente fórmula:

$$Potencia \times Horas \ de \ uso = [kWh]$$

Dicho resultado se multiplicará por treinta (30) días, para finalmente obtener el consumo energético del proceso mensualmente.

3.2.3 Objetivo 3: Escalado de la operación de centrifugación a nivel de laboratorio

3.2.3.1 Selección de centrífuga para condiciones de operación real

Es importante recordar que las pruebas de separación de la biomasa algal del medio líquido a nivel de laboratorio se hicieron en la centrífuga anteriormente caracterizada, pero en la industria los tratamientos de separación por centrífuga de biomasa disueltas en corrientes líquidas se hacen en centrífugas de flujo continuo, por esta razón lo primero que se debe hacer es tratar de hacer una proyección adecuada de la centrífuga que operará en condiciones reales en relación a la utilizada como fuentes de datos de referencia la cual es la centrífuga del laboratorio.

En este sentido y antes de realizar cualquier proyección del consumo energético de una unidad de centrifugación para separar biomasa algales de medios líquidos es importante orientar una adecuada selección del tipo de dispositivo que se recomendaría utilizar en la operación real a partir de un estudio realizado con un dispositivo de laboratorio.

Después de realizar una revisión técnica y de determinar que lo más conveniente para el proyecto era seleccionar la más usada o la más común en la industria de la obtención de biomasa a base de microalgas, se seleccionó una centrífuga de discos de la marca GEA Westfalia, como un buen

posible referente de este criterio, en concreto el modelo OTC 2-02-137, la cual trabaja con flujo continuo cuyo rango de operación en caudal va hasta los 900 L/h o bien $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$. Ver imagen 14.



Imagen 14. Centrífuga semiindustrial modelo OTC 2-02-137.[24]

Otro criterio que se tuvo en cuenta para la selección de esta centrífuga fue el que guardara algunos de los principios de semejanza que se reconocen en los métodos de escalado de dispositivos y máquinas para extrapolar datos de un equipo a escala de laboratorio con relación a uno de escala semiindustrial o industrial. En este caso se ha privilegiado la escogencia de una centrífuga con una disposición de rotor vertical y geometría cónica para salvaguardar el principio de semejanza geométrico y mecánica. Estos y otros de los principios de los criterios de semejanza en escalado de los dispositivos se amplían a continuación:

3.2.3.2 Modelos y principios de semejanza

Para realizar el escalado de una centrífuga de laboratorio a una centrífuga industrial se tomaron como referencia los “Modelos y los principios de semejanza” este modelo tiene como base diferentes principios llamados “semejanza o similaridad” que se deben tener en cuenta para poder desarrollar o llevar a cabo un escalado de un aparato natural (prototipo) a otro objeto (modelo); La “semejanza o similaridad” puede ser:

- **Semejanza geométrica:** Cuando prototipo y modelo son semejantes en su geometría y se diferencian solamente por escala, cualquier dimensión puede obtenerse multiplicando las dimensiones de la otra por un factor de escala. [25]
- **Semejanza cinemática:** Se refiere a que en un fenómeno con movimiento semejante las trayectorias de las partículas en el prototipo y en el modelo deben ser similares; Sin embargo, hay que distinguir fenómenos de movimiento a macro y micro escala, es decir, dos fenómenos pueden parecerse en tipo de flujo (continuo, discontinuo), pero ser diferentes a nivel de régimen de flujo (laminar, transición, turbulento, etc.), pero también puede suceder que dos fenómenos con tipos de flujos diferentes compartan a nivel de trayectoria de partícula a pequeña escala (micrómetros o nanómetros) mecanismos de movimientos similares (movimiento por control de fuerza centrífuga, movimiento Browniano, control difusivo, etc.). [25]

- **Semejanza de tiempos:** Partículas semejantes en sistemas con similitud geométrica y cinemática recorren espacios semejantes en tiempos que corresponden a una relación constante. Esta constante en los tiempos de recorrido, es llamada homología o semejanza de tiempos. En algunos casos es importante identificar situaciones donde un sistema puede estar controlado por dos y raramente hasta tres tiempos característicos que influyen en el diseño; Es el caso de los sistemas de tratamientos de aguas donde las partículas líquidas obedecen al denominado tiempo de retención hidráulica y las partículas sólidas (sólidos suspendidos, microorganismos) se rigen por el llamado tiempo de retención de lodos (SRT por sus siglas en inglés).[25]
- **Semejanza de constantes físicas:** Dos partículas semejantes o el medio o fluido objeto de estudio, están caracterizadas por una relación constante de sus propiedades físicas; En sentido estricto se presenta cuando los experimentos en prototipo y modelo se realizan con el mismo fluido y por consiguiente parámetros fisicoquímicos tales como la viscosidad, densidad, viscosidad cinemática son idénticos. [25]

Teniendo en cuentas las definiciones anteriores, se puede llegar a la conclusión que el prototipo y modelo en este caso no cumple con la semejanza cinemática a nivel macrofluidico puesto que la centrífuga de laboratorio funciona como modelo batch dado que el medio a separar está atrapado en los tubos de centrifugación y la fracción solida queda en el fondo de dichos tubos al final del proceso, es decir las partículas de microalgas realizan su trayectoria dentro del fluido en el tubo de centrifugado; En contra parte la centrífuga semiindustrial trabaja en flujo continuo donde el medio ingresa y luego sale separado en dos corrientes de manera constante, una líquida y una semilíquida enriquecida con la biomasa de microalgas a separar. Por esta misma razón tampoco hay semejanza de tiempos, en el caso de la centrífuga de laboratorio el tiempo característico sería el tiempo de operación para realizar una separación batch y en la semiindustrial obedecería a un tiempo de retención hidráulica.

No obstante, a nivel microfluidico la trayectoria de las partículas sólidas (microalgas) dentro de los tubos de la centrífuga de laboratorio y en su trayectoria hacia las paredes en la centrífuga semiindustrial es igualmente controlada por la fuerza centrífuga y esto se puede caracterizar por un modelo simple:

$$\Delta x = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

Donde:

Δx = Fuerza centrífuga experimentada por el objeto

V_0 = Velocidad de sedimentación

t = Tiempo de operación

a = Aceleración aplicada

Donde los términos de velocidad de sedimentación y aceleración aplicada se reemplazarían de la siguiente manera para un desarrollo ideal de la ecuación propuesta:

$V_0 = \omega r = \text{Velocidad aplicada} \times \text{Radio del rotor}$

$$a = w^2 r = (\text{Velocidad aplicada})^2 \times \text{Radio del rotor}$$

Teniendo así la ecuación de la siguiente manera:

$$\Delta x = wrt + \frac{1}{2} w^2 r t^2$$

Se procede a realizar la igualación de la fuerza centrífuga para ambas maquinas, donde obtendríamos que:

$$\Delta x_1 = \Delta x_2$$

Donde:

$$\Delta x_1 = \text{Prototipo}$$

$$\Delta x_2 = \text{Modelo}$$

Para la obtención de la ecuación final:

$$(w_1^2 r_1)(t_1^2) = (w_2^2 r_2)(t_2^2)$$

3.2.3.3 Enfoque de escalado

Debido a que el prototipo utilizado a escala de laboratorio es una centrífuga batch y el modelo semiindustrial escogido es una centrífuga de flujo continuo donde no hay una analogía exacta en los criterios de semejanza de tiempos y cinemática como se ha explicado anteriormente, la relación de semejanzas previamente explicada no se puede utilizar de forma directa ya que está demostrado que cuando prototipo y modelo trabajan en tipos de flujo diferente (batch vs. continuo) el enfoque de escalado requiere dos números adimensionales (i.e. N_{Re} , factor de criticidad), con lo cual tendríamos como resultado la siguiente ecuación planteada, teniendo como base la ecuación final mostrada en el capítulo anterior:

$$\left(\frac{n_1^2}{\theta_1^2}\right)L_1\theta_1^2 = \left(\frac{n_2^2}{\theta_2^2}\right)L_2\theta_2^2$$

Donde:

$$n = \text{Velocidad}$$

$$\theta = \text{Tiempo}$$

$$L = \text{Longitud o radio del rotor}$$

En este caso no se cuenta con un análisis dimensional riguroso para establecer el modelo de analogía entre prototipo y modelo pero siguiendo la técnica de agrupación de variables, sugerida por el teorema de Buckingham que es el enfoque más simple de escalado se escogió la alternativa de igualar el modelo de la fuerza centrífuga en prototipo experimental y modelo semiindustrial, realizando un ajuste a ambos lados de la ecuación para dar cuenta de la diferencia del tipo de flujo en uno y otro y validar el modelo a través de una variable de operación de la centrífuga

semiindustrial para la cual se dispone de información en un estudio previo, esto es poniendo de manifiesto la intervención del flujo másico en el modelo de la centrífuga industrial.

De esta manera la ecuación planteada anteriormente se corrige multiplicando por el flujo másico del lado correspondiente al modelo semiindustrial y al prototipo por lo que sería su equivalente en flujo másico, es decir, la masa contenida en los tubos de la centrífuga sobre el tiempo de operación, obteniendo así, la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{m_1}{t_1}\right)(RPM_1^2)(R_1) = (RPM_2^2)(R_2)(\dot{m})$$

Al tener un rango de velocidad similar en el rotor cada una de las centrífugas, procedemos a cancelar las RPM teniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{m_1}{t_1}\right)(R_1) = (R_2)(\dot{m})$$

Despejamos para obtener la ecuación final a resolver:

$$\dot{m} = \frac{\left(\frac{m_1}{t_1}\right)(R_1)}{(R_2)}$$

Donde:

m_1 = Masa contenida en los tubos de la centrífuga de laboratorio.

t_1 = Tiempo de operación con mejores resultados de separación.

$R_1 = \frac{A_c = \text{Área característica de la geometría recorrida por la partícula}}{\lambda = \text{Trayectoria libre media de una partícula a escala molecular}}$

R_2 = Radio hidráulico de la centrífuga semiindustrial

\dot{m} = Flujo másico

Para validar este enfoque de escalamiento, se requiere verificar que las condiciones de operación de la centrífuga del laboratorio (prototipo) estén dentro del rango de operación de la centrífuga semiindustrial (modelo) [24], de la cual se tienen datos disponibles de caudal máximo obtenidos de la ficha técnica en tabla 1.

Tabla 1. Características centrífuga modelo GEA Westfalia OTC 2-02-137.

Modelo	GEA Westfalia OTC 2-02-137
Caudal máximo de operación (l/h)	900
Velocidad del rotor (r.p.m.)	10000
Potencia eléctrica (kW)	1,1
Material	Acero inoxidable
Dimensiones (mm)	640 x 640 x 710

Se espera obtener un resultado de flujo másico que esté dentro de este rango de operación de la centrífuga semiindustrial (900 L/h o $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ máximo).

4. RESULTADOS

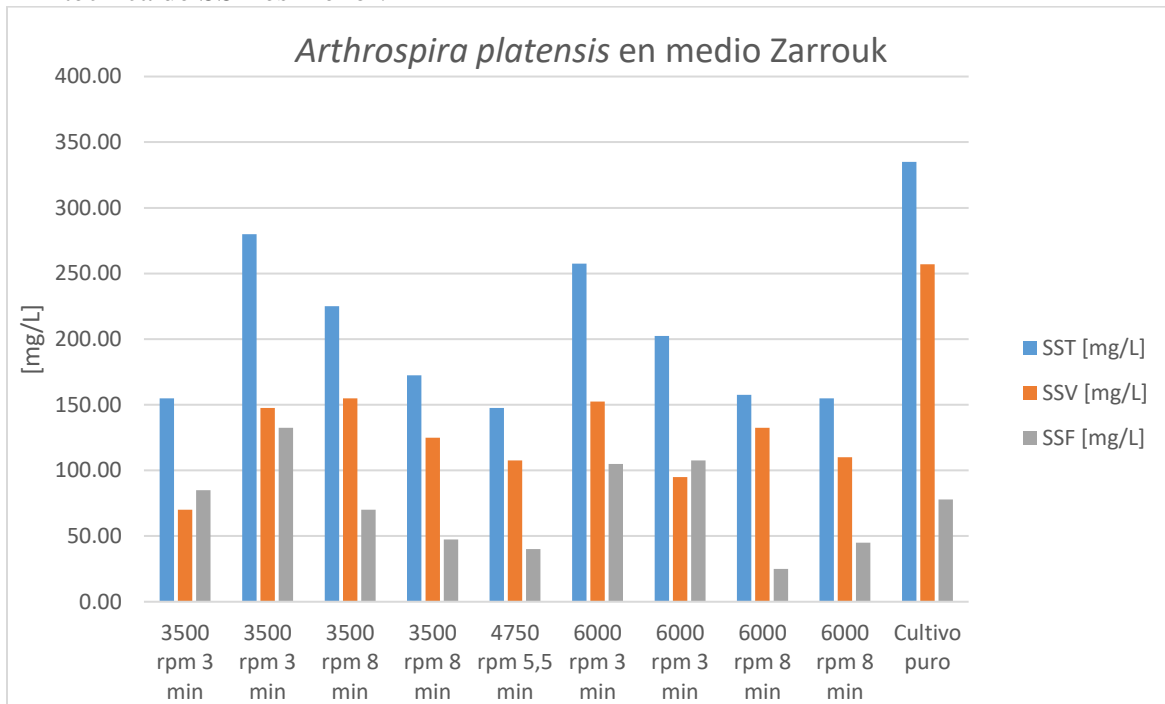
4.1 Resultados estudio exploratorio

- Mediante los estudios experimentales con diferentes medios de cultivo para las diferentes especies se logra visualizar a simple vista y a nivel microscópico un mayor crecimiento celular de las microalgas en medio Bristol, que además la variable medida de conductividad se encuentra en un rango cercano a la del agua residual doméstica pretratada extraída de una Ptar en Bucaramanga. Tabla 2.

Tabla 2. Conductividad medios de cultivo

Conductividad		
Bold's Basal	1160	[mS]
Bristol	0.39	[mS]
Chlorella 14-02 cultivo puro	11.77	[mS]
ARD	0.635	[mS]
Zarrouk	10.87	[mS]
ARS	0.456	[mS]

- A través del estudio previo se pudo comparar rangos de operación para las diferentes cepas donde se combinaban velocidad y tiempos a partir de una guía general de condiciones de centrifugación para las microalgas. Mediante la gráfica se puede establecer una relación entre SST y SSV, donde este último corresponde al 65% del primero, permitiendo avanzar de manera más rápida en los siguientes experimentos ya que el tiempo de realización de la técnica de SST es menor.



Gráfica 1. Resultado centrifugación *Arthrospira platensis*.

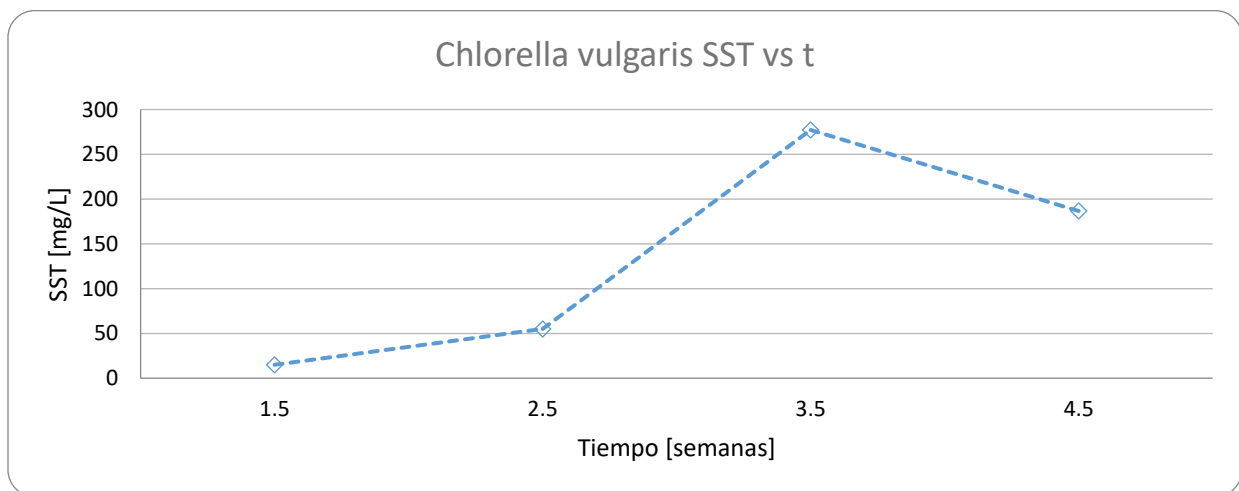
- El seguimiento realizado al crecimiento celular de las microalgas nos permite encontrar tiempos de crecimiento óptimos para la cosecha, arrojando datos relevantes en la concentración de 340 SST mg/L de la *Arthrospira platensis* el cual nos indica que se pueden alcanzar rangos similares a los encontrados en la literatura.

Tabla 3. Concentraciones SST teóricas y experimentales.

Especie microalga	Concentración SST [mg/L]	
	Literatura	Experimental
<i>Arthrospira platensis</i>	817	340
<i>Chlorella vulgaris</i>	495	41
<i>Scenedesmus obliquus</i>	500	69

4.2 Resultados del Cultivo de microalgas

- En base a los ensayos previos realizados para el crecimiento de las algas en los diferentes medios de cultivo: Zarrouk, Bold's basal, Bristol y agua sintética residual, se seleccionó el medio Bristol como el sustrato más adecuado para la continuidad del proyecto.
- Mediante observación visual y microscópica, se destaca el crecimiento de *Chlorella vulgaris* en medio Bristol frente a los cultivos de *Scenedesmus obliquus*, *Arthrospira platensis* y *Spirogyra ternata* las cuales no presentaron buen desarrollo.
- *Chlorella vulgaris* se desarrolló en agua residual sintética, pero este crecimiento no fue constante y se detuvo al poco tiempo.
- El parámetro de medición SST, en cuanto a la concentración de biomasa se determinó únicamente para *C. vulgaris* el cual se observa en la gráfica 1, con una concentración máxima de biomasa a las 3.5 semanas de crecimiento con 277.14 mg/L de SST.



Gráfica 2. Curva de crecimiento *C. vulgaris*.

4.3 Resultados de la Etapa de separación de biomasa

A partir de la prueba de jarras realizada a los dos tipos de coagulante, alumbre y cloruro férrico, se obtuvieron datos de porcentaje de eficiencia de remoción mediante la absorbancia y se encuentran plasmados en la tabla 2.

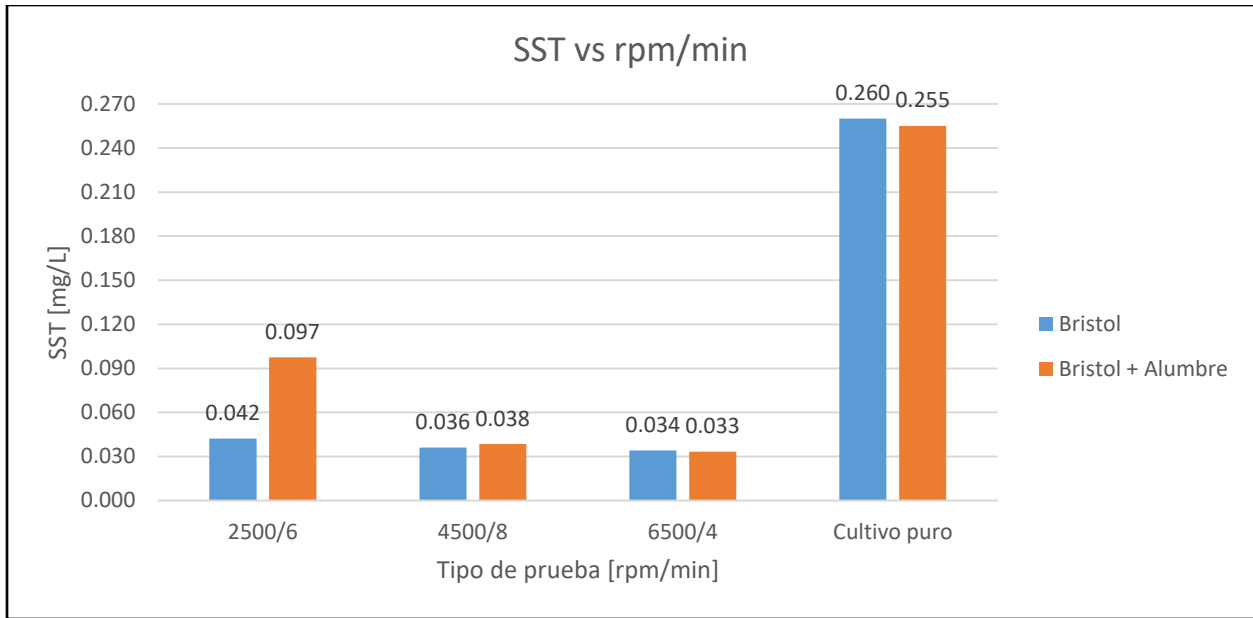
Tabla 4. Resultados prueba de jarras de alumbre y cloruro férrico.

Coagulante	Concentración [mg/L]	Absorbancia [560nm]		Porcentaje de remoción
		Inicial	Final	
Alumbre	200	0.436	0.407	6.65%
	250		0.404	7.34%
	300		0.409	6.19%
Cloruro férrico	150		0.447	I.C.
	200		0.458	I.C.
	250		0.457	I.C.

I.C. = Interferencia por color – más dispersión.

Según la tabla 2 se observa inicialmente un contraste en los resultados de ambos coagulantes, donde el cloruro férrico no funcionó debido a que este dispersó la biomasa y afectó la coloración del medio obteniendo una mayor absorbancia, por otro lado, el alumbre a una concentración de 250 mg/L obtuvo el mejor resultado de remoción logrando mayor sedimentación y creación de flóculos de la biomasa microalgal.

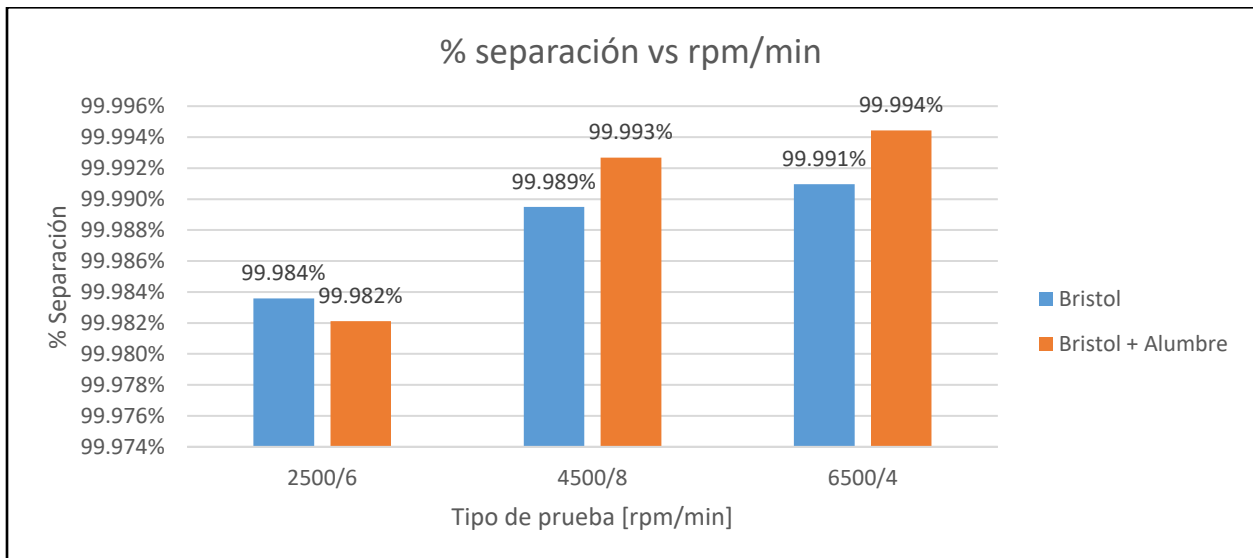
En las distintas pruebas de separación de la biomasa de *Chlorella vulgaris* se midieron los SST y la absorbancia, de acuerdo con las velocidades y tiempos aplicados en la centrífuga a los cultivos con coagulante y sin él. Estos resultados se observan en las siguientes gráficas:



Gráfica 3. SST en diferentes condiciones de operación.

En la gráfica 2, se observa que los resultados de SST en **medio con alumbre** son superiores al **medio sin alumbre** en 2500 rpm en 6 minutos. En los rpm de 4500 a 8 minutos y 6500 rpm a 4 minutos se encuentran en rangos similares y la separación en estos frente a los cultivos puros evidencian una eficiente separación.

- **Cálculo de la eficiencia de separación**



Gráfica 4. Porcentaje de eficiencia en diferentes condiciones de operación.

Se observa en la gráfica 3, que el **medio con alumbre** presentó mayor eficiencia de separación a las condiciones de 6500 rpm en 4 minutos seguido de 4500 rpm por 8 minutos. En el **medio sin alumbre** fue mejor a 2500 rpm a 6 minutos.

- **Cálculo del consumo energético del proceso de separación a nivel laboratorio**

Mediante la fórmula planteada para hallar la energía consumida, se observa que la energía consumida mensual es de 16.56 kWh/mes

Tabla 5. Consumo energético de la centrífuga del laboratorio

Dispositivo electrico	Corriente [A]	Voltaje [V]	Tiempo se uso [Horas]	Días de uso	Energia consumida mensual [kWh/mes]
Centrifuga	8	115	0.60	30	16.56

4.4 Resultados de Escalado de la operación de centrifugación

Datos de las variables de la última fórmula presentada en “enfoque de escalado”:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 40 \text{ gr.} \\
 t_1 &= 4 \text{ min.} \\
 R_1 &= 46281,57 \text{ cm.} \\
 R_2 &= 32,04 \text{ cm.} \\
 \dot{m} &= ?
 \end{aligned}$$

Se procede a reemplazar las variables en la ecuación:

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= \frac{(40 \text{ gr}/4 \text{ min})(46281,57 \text{ cm})}{(32,04 \text{ cm})} \\
 \dot{m} &= 14444,94 \text{ gr}/\text{min} \\
 \dot{m} &= 866,53 \text{ L}/\text{h}
 \end{aligned}$$

Al obtener un resultado final de 866,53 L/h se estaría verificando que los datos de la mejor operación en la centrífuga de laboratorio (prototipo) y con mejores resultados de separación, estarían dentro del rango de operación de la centrífuga semiindustrial.

4.4.1 Cálculo energético del modelo de centrífuga semiindustrial

Al evidenciar que los parámetros de operación de la centrífuga de laboratorio están dentro del rango de operación de la centrífuga semiindustrial, se procede a realizar el cálculo del consumo energético en un proceso de separación, realizado en un proyecto el cual fue ejecutado para la obtención de biomasa microalgal, donde se cuentan con datos experimentales [24], los cuales se

utilizaron para la realización de este cálculo energético, el dato utilizado se mostrará a continuación en la tabla 3:

Tabla 6. Datos experimentales de caudal de la centrífuga.

Mes	Q_{ϵ} (m3/h)	X_{ϵ} (Kg/m3)	\dot{m}_{ϵ} (kg/h)
Enero	0,243	30	7,291
Febrero	0,326	30	9,778
Marzo	0,427	30	12,806
Abril	0,492	30	14,751
Mayo	0,555	30	16,647
Junio	0,593	30	17,786
Julio	0,593	30	17,802
Agosto	0,547	30	16,395
Septiembre	0,451	30	13,523
Octubre	0,368	30	11,033
Noviembre	0,269	30	8,059
Diciembre	0,222	30	6,650

Se escoge el dato del caudal con mejores resultados a la hora de obtención de biomasa, de un registro realizado en el anterior proyecto mencionado que realizaron mes a mes. En este registro se evidencia que al tener la centrífuga en operación con un caudal de $0,593 \text{ m}^3/\text{h}$ obtuvieron un flujo de biomasa de $17802 \text{ kg}/\text{h}$.

Teniendo este dato y después de explicada la escogencia de este, se plantea la siguiente ecuación para la obtención del consumo energético:

$$\frac{(1300 \text{ J}/\text{seg}) \left(\frac{1 \text{ kWh}}{3600000 \text{ J}} \right)}{Q[\text{m}^3/\text{h}]}$$

Donde:

Q = Caudal con mejor obtención de biomasa

Con la formula anteriormente expresada se desea hallar la energía consumida por metro cubico de líquido separado, es decir kWh/m^3 en el denominador.

4.4.2 Consumo energético de la centrífuga semiindustrial

Datos de las variables presentadas en la fórmula expresada anteriormente:

$$Q = 0,593 \text{ m}^3/\text{h}$$

Se reemplaza en la ecuación:

$$Q = \frac{(1300 \text{ J/seg}) \left(\frac{1 \text{ kWh}}{3600000 \text{ J}} \right)}{0,593 [\text{m}^3/\text{h}]}$$

Se obtiene un resultado final de:

$$2,19 \text{ kWh}/\text{m}^3$$

El escalado del proceso de centrifugación se llevó a cabo de manera satisfactoria, pues el valor de rpm escalado de la centrífuga de laboratorio, se encuentra dentro del rango de operación de la centrífuga semiindustrial seleccionada y con este mismo dato obtenido se halló el valor de consumo energético por metro cúbico en tratamiento de aguas residuales, el cual fue un resultado aceptable de $2,19 \text{ kWh}/\text{m}^3$ comparándolo con los consumos de esta industria encontrados en la literatura, los cuales varían de $0,2 \text{ kWh}/\text{m}^3$ a $2 \text{ kWh}/\text{m}^2$. [26]

5. CONCLUSIONES

1. Se determina que el medio Bristol fue el más favorable para el crecimiento de *Chlorella vulgaris*, ya que se obtuvo abundante formación de colonias beneficiando su aglomeración, condición que permite mejorar los procesos posteriores de separación.
2. Existe una correlación directa entre los resultados de absorbancia y los sólidos suspendidos totales SST, lo cual confirma la tendencia que a mayores velocidades de centrifugación se obtienen mayores eficiencias de separación hasta cierto punto (4500 rpm), donde su aumento no es significativo. Es así como, comparando las velocidades y tiempos de 4500 rpm y 6500 rpm se pueden determinar diferencias poco notables en los rangos de eficiencia de separación, siendo más significativo el consumo energético haciendo que se opte por la de menor consumo de 4500 rpm.
3. Un aumento inferior al 1% en la separación mediante la aplicación de flocculante no demuestra una mejora importante, que respalde su uso en el proceso como combinación de métodos de separación para el mejoramiento de la operación. Los esfuerzos deben estar enfocados en definir las condiciones de operación que favorezcan el proceso de centrifugación.
4. Comparando con el estudio previo de búsqueda literaria realizado por estudiantes UNAB, donde el rango de consumo energético varía de 190 kWh/Ton hasta 25000 kWh/Ton de biomasa separada, afirmamos esta incertidumbre energética mencionada anteriormente, pues el dato obtenido en este proyecto de energía consumida que fue de 2,19 kWh/m³ se ve representada por 7900 kWh/Ton de biomasa separada.

6. RECOMENDACIONES

- Explorar modificaciones a los medios de cultivo o buscar nuevas formas de cultivar con el objetivo de mejorar la productividad de las microalgas, es decir, determinar la composición de los medios de cultivo dependiendo de los requerimientos de la especie usada, adaptar variables como la aireación, luz y pH para aumentar el crecimiento de la biomasa microalgal.
- Realizar una mejor trazabilidad del crecimiento de la microalga, para tomar mediciones en periodos más cortos para obtener una mayor concentración de biomasa en el medio con lo que se espera una mejor eficiencia de remoción y por consiguiente un menor consumo energético en la operación.
- Implementar un diseño experimental a partir de los resultados exploratorios del presente trabajo, que permita precisar rangos o combinaciones de tiempos y velocidad para cada especie que beneficie su separación en la centrifuga; además de no sobrepasar el límite donde ocurre el rompimiento celular provocando dispersión, efecto contrario al esperado.
- Explorar una gama más amplia de coagulantes para el estudio, estos pudiendo ser orgánicos o inorgánicos y evaluar de manera más rigurosa variables como las concentraciones, pH y volúmenes de aplicación al medio.

REFERENCIAS

- [1] G. C. Dismukes, D. Carrieri, N. Bennette, G. M. Ananyev, and M. C. Posewitz, “Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels,” *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 19, no. 3, pp. 235–240, Jun. 2008, doi: 10.1016/J.COPBIO.2008.05.007.
- [2] Y. Chisti, “Biodiesel from microalgae,” *Biotechnology Advances*, vol. 25, no. 3, pp. 294–306, May 2007, doi: 10.1016/J.BIOTECHADV.2007.02.001.
- [3] J. P. Maity, J. Bundschuh, C.-Y. Chen, and P. Bhattacharya, “Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives – A mini review,” *Energy*, vol. 78, pp. 104–113, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.04.003.
- [4] E. J. Olguín, “Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery,” *Biotechnology Advances*, vol. 30, no. 5, pp. 1031–1046, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.05.001.
- [5] M. Arumugam, “Editorial: Advanced Technologies and Perspectives on Sustainable Microalgae Production,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 10, Feb. 2022, doi: 10.3389/fbioe.2022.841261.
- [6] J. U. Grobbelaar, “Algal Nutrition - Mineral Nutrition,” in *Handbook of Microalgal Culture*, Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2003, pp. 95–115. doi: 10.1002/9780470995280.ch6.
- [7] A. Richmond, “Biological Principles of Mass Cultivation,” in *Handbook of Microalgal Culture*, Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2003, pp. 125–177. doi: 10.1002/9780470995280.ch8.
- [8] J. B. K. Park, R. J. Craggs, and A. N. Shilton, “Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production,” *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 1, pp. 35–42, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.158.
- [9] P. L. Gupta, S. M. Lee, and H. J. Choi, “Integration of microalgal cultivation system for wastewater remediation and sustainable biomass production,” *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 32, no. 8. Springer Netherlands, Aug. 01, 2016. doi: 10.1007/s11274-016-2090-8.
- [10] S. Koley, S. Prasad, S. K. Bagchi, and N. Mallick, “Development of a harvesting technique for large-scale microalgal harvesting for biodiesel production,” *RSC Advances*, vol. 7, no. 12, pp. 7227–7237, 2017, doi: 10.1039/C6RA27286J.
- [11] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, “ECONOMÍA CIRCULAR EN LA GESTIÓN DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y MANEJO DE AGUAS RESIDUALES ,” *CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES*, Bogotá, Sep. 28, 2020.
- [12] G. M. Cruz Torrado and K. A. Camargo Gómez, “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.,” 2020.
- [13] S. E. Mera Proaño, “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CENTRIFUGACIÓN PARA SEPARAR BIOMASA PROVENIENTE DE MICROALGAS,” Quito, 2015.

- [14] M. del M. Morales Amaral, "Tratamiento de aguas residuales con microalgas en reactores abiertos," Doctoral, Universidad de Almería, Almería, 2016.
- [15] K. Li *et al.*, "Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review," *Bioresource Technology*, vol. 291, p. 121934, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121934.
- [16] N. S. Mat Aron, K. S. Khoo, K. W. Chew, A. Veeramuthu, J.-S. Chang, and P. L. Show, "Microalgae cultivation in wastewater and potential processing strategies using solvent and membrane separation technologies," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 39, p. 101701, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101701.
- [17] M. Plöhn *et al.*, "Wastewater treatment by microalgae," *Physiologia Plantarum*, vol. 173, no. 2, pp. 568–578, Oct. 2021, doi: 10.1111/ppl.13427.
- [18] C. Alberto, S. Sierra, M. E. Castillo Bertel, R. Leonor, and A. Barrios, "Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas," Cartagena, 2013. [Online]. Available: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/index.htm>
- [19] R. Baird, A. Eaton, and R. Eugene, "Standard Methods for the examination of water and wastewater," *American Public Health Association*, vol. 23, 2017, doi: doi.org/10.2105/SMWW.2882.029.
- [20] ICONTEC, "Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras NTC 3903," Bogotá, Apr. 2010.
- [21] N. Abril Díaz *et al.*, "8. Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas."
- [22] A. L. Morocho-Jácome, S. Sato, and J. C. M. de Carvalho, "Ferric sulfate coagulation and powdered activated carbon adsorption as simultaneous treatment to reuse the medium in *Arthrospira platensis* cultivation," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 91, no. 4, pp. 901–910, Apr. 2016, doi: 10.1002/jctb.4655.
- [23] G. M. Martínez Deusa and C. A. Pascichaná Hernández, "Desarrollo de un sustrato sintético que simula agua residual domestica para fines de investigación," 2019, Accessed: May 23, 2022. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/17802>
- [24] Ignacio Invernón Santiago, "Diseño de una planta de producción de biomasa microalgal," Universidad de Cádiz, Cádiz, 2017.
- [25] C. Gonzalez Sabogal and M. Alvarez Cifuentes, *Estequiometría*, 1st ed., vol. 1. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1985.
- [26] A. Colzi Lopes, A. Valente, D. Iribarren, and C. González-Fernández, "Energy balance and life cycle assessment of a microalgae-based wastewater treatment plant: A focus on alternative biogas uses," *Bioresource Technology*, vol. 270, pp. 138–146, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.005.

7. ANEXO

7.1 Concentraciones medios de cultivo

Las concentraciones utilizadas para los medios de cultivos son las siguientes:

Tabla 7. Concentraciones medio Bold's Basal.

Bold's Basal	
Componente	Concentración [g/L]
NaNO ₃	25.00
CaCl ₂ *2H ₂ O	2.50
MgSO ₄ *7H ₂ O	7.50
KH ₂ PO ₄	7.50
K ₂ HPO ₄	17.50
EDTA	50.00
NaCl	2.50
KOH	31.00
FeSO ₄ *7H ₂ O	4.98
H ₂ SO ₄	1.00
H ₃ BO ₃	11.42
ZnSO ₄ *7H ₂ O	8.82
MnCl ₂ *4H ₂ O	1.44
MoO ₃	0.71
CuSO ₄ *5H ₂ O	1.57
Co(NO ₃) ₂ *6H ₂ O	0.49

Tabla 8. Concentraciones medio Zarrouk.

Zarrouk	
Componente	Concentración [g/L]
NaHCO ₃	16.80
K ₂ HPO ₄	0.50
NaNO ₃	2.50
K ₂ SO ₄	1.00
NaCl	1.00
MgSO ₄ *7H ₂ O	0.20
CaCl ₂	0.04
FeSO ₄	0.01
Na-EDTA	0.08
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ *4H ₂ O	1.81
ZnSO ₄ *7H ₂ O	0.22
Na ₂ MoO ₄ *H ₂ O	0.01
CuSO ₄ *5H ₂ O	0.08

Tabla 9. Concentraciones medio Bristol.

Bristol	
Componente	Concentración [ml/L]
NaNO3	10
(CaCl2)(2H2O)	10
(MgSO4)(7H2O)	10
K2HPO4	10
KH2PO4	10
KH2PO4	10
NaCl	10

7.2 Composición agua residual sintética

Se preparó un agua residual sintética como medio de cultivo de las microalgas, para la cual se debieron realizar algunos cálculos que determinaron el requerimiento de DQO (demanda química de oxígeno) y la cantidad exacta de reactivos para poder simular un agua residual urbana.

Glucosa (DQO)

$$C_6H_{12}O_6 = 180,156 \frac{g}{mol} \cong 180 \frac{g}{mol}$$

$$a) 20mg \frac{DQO}{L} \left(\frac{180000 \text{ mg Glucosa}}{192000 \text{ mg DQO}} \right) \times \left(\frac{20 \text{ mg DQO}}{L} \right) \times 15L = [281,25 \text{ mg Glucosa}]$$

$$b) 50mg \frac{DQO}{L} \left(\frac{180000 \text{ mg Glucosa}}{192000 \text{ mg DQO}} \right) \times \left(\frac{50 \text{ mg DQO}}{L} \right) \times 15L = [703,125 \text{ mg Glucosa}]$$

$$c) 100mg \frac{DQO}{L} \left(\frac{180000 \text{ mg Glucosa}}{192000 \text{ mg DQO}} \right) \times \left(\frac{100 \text{ mg DQO}}{L} \right) \times 15L = [1406,25 \text{ mg Glucosa}]$$

$$d) 150mg \frac{DQO}{L} \left(\frac{180000 \text{ mg Glucosa}}{192000 \text{ mg DQO}} \right) \times \left(\frac{150 \text{ mg DQO}}{L} \right) \times 15L = [2109,375 \text{ mg Glucosa}]$$

$$e) 200mg \frac{DQO}{L} \left(\frac{180000 \text{ mg Glucosa}}{192000 \text{ mg DQO}} \right) \times \left(\frac{200 \text{ mg DQO}}{L} \right) \times 15L = [2812,5 \text{ mg Glucosa}]$$

Fosfato diamónico (Fósforo total)

$$(NH_4)_2HPO_4 = 132,06 \frac{g}{mol} \cong 132,1 \frac{g}{mol}$$

$$a) \left(5 \text{ mg} \frac{P}{L} \right) \times \left(\frac{132,1 \text{ mg}(NH_4)_2HPO_4}{31 \text{ mgP}} \right) \times 15L = [319,59 \text{ mg } (NH_4)_2HPO_4]$$

$$b) \left(8 \text{ mg} \frac{P}{L} \right) \times \left(\frac{132,1 \text{ mg}(NH_4)_2HPO_4}{31 \text{ mgP}} \right) \times 15L = [511,35 \text{ mg } (NH_4)_2HPO_4]$$

$$c) \left(12 \text{ mg} \frac{P}{L} \right) \times \left(\frac{132,1 \text{ mg}(NH_4)_2HPO_4}{31 \text{ mgP}} \right) \times 15L = [767,03 \text{ mg } (NH_4)_2HPO_4]$$

Urea (Nitrógeno total)

$$CH_4N_2O = 60,06 \frac{g}{mol} \cong 60,1 \frac{g}{mol}$$

$$a) \left(32,5 \text{ mg} \frac{N}{L} \right) \times \left(\frac{60,1 \text{ mg}(NH_4)_2HPO_4}{14 \text{ mgP}} \right) \times 15L = [2092,76 \text{ mg } CH_4N_2O]$$

$$b) \left(36 \text{ mg} \frac{N}{L} \right) \times \left(\frac{60,1 \text{ mg}(NH_4)_2HPO_4}{14 \text{ mgP}} \right) \times 15L = [2318,14 \text{ mg } CH_4N_2O]$$

$$c) \left(39 \text{ mg} \frac{N}{L} \right) \times \left(\frac{60,1 \text{ mg}(NH_4)_2HPO_4}{14 \text{ mgP}} \right) \times 15L = [2511,32 \text{ mg } CH_4N_2O]$$