

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Evaluación del efecto del color de luz sobre la producción de biomasa de la
Chlorella vulgaris asociado al tratamiento de aguas residuales como medio
de cultivo y subsecuente producción de biodiesel como alternativa de
economía circular**

Tesis presentada por las Bachilleres:

Colque Phocco, Isabel

ORCID: 0009-0006-9132-1353

Del Carpio Concha, Katheryne Brisseth

ORCID: 0009-0001-9901-8299

para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor (a):

Mg. Tejada Meza, Kevin

ORCID: 0000-0002-9716-7821

Arequipa – Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 23 de Mayo del 2025

Dictamen: 008194-C-EPIA-2025

Visto el borrador del expediente 008194, presentado por:

2016240122 - COLQUE PHOCCO ISABEL

2016701772 - DEL CARPIO CONCHA KATHERYNE BRISSETH

Titulado:

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL COLOR DE LUZ SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA
DE LA CHLORELLA VULGARIS ASOCIADO AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMO
MEDIO DE CULTIVO Y SUBSECUENTE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL COMO
ALTERNATIVA DE ECONOMÍA CIRCULAR**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**29727348 - LAZARTE ARREDONDO SONIA
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



**E0085162 - COLINA ANDRADE GILBERTO DE JESUS
DICTAMINADOR**



Evaluación del efecto del color de luz sobre la producción de biomasa de la *Chlorella vulgaris* asociado al tratamiento de aguas residuales como medio de cultivo y subsecuente producción de biodiesel c

INFORME DE ORIGINALIDAD

26% INDICE DE SIMILITUD	22% FUENTES DE INTERNET	17% PUBLICACIONES	13% TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	---------------------------------------

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
3	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	2%
5	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	1%
6	alab.com.pe Fuente de Internet	1%
7	www.minem.gob.pe Fuente de Internet	1%
8	repositorio.unbosque.edu.co Fuente de Internet	1%
9	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	1%
10	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
11	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
12	ECOLOGY YASJOMI E.I.R.L.. "PAD de la Subestación Eléctrica de Transformación - S.E.T. Carhuaz 66/13.8 kV-IGA0017543", R.D. N° 0024-2022-MINEM/DGAAE, 2022 Publicación	1%

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico a todo el esfuerzo, dedicación, sacrificio, voluntad, motivación, interés de consolidarme en el mundo de la ingeniería ambiental y compromiso dado para el desarrollo de la presente investigación.

Asimismo, a mi familia que es la base y pilar de toda mi formación como persona y profesional. Además, por acompañarme en esta travesía y tolerancia de este logro significativo.

La guía espiritual que está en casa, esperándome con el mismo entusiasmo del primer día, que es el refugio incondicional en situaciones críticas.

Isabel Colque Phocco

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y salud para alcanzar esta meta.

A mi familia, por ser mi mayor pilar de apoyo. A mis padres, por enseñarme el valor del esfuerzo, la constancia y el amor incondicional.

A mi esposo por su paciencia, comprensión y apoyo inquebrantable en cada paso de este camino.

A mi hija, mi más grande motivación e inspiración. Cada sacrificio ha valido la pena por el deseo de brindarte un ejemplo y un futuro mejor.

Finalmente, dedico este logro a todas las personas que creyeron en mí y me acompañaron en este desafío, confiando en mis capacidades y alentándome a dar siempre lo mejor de mí.

Katheryne Brisseth Del Carpio Concha

Agradecimientos

Agradecemos a Dios al destino y universo por permitirnos culminar esta etapa académica que es el primer eslabón para continuar con nuestra vida profesional

Agradecemos a nuestros padres por darnos su apoyo incondicional en este recorrido de nuestra culminación de vida universitaria.

Asimismo, agradecemos al Ingeniero Kevin Tejada Meza por el apoyo y tolerancia frente al desarrollo de la investigación mediante su orientación y haber brindado una parte de su tiempo para el término de esta investigación

Agradecemos a las personas que conocimos en el proceso del desarrollo de la experimentación, que fueron nuestra compañía y apoyo de días críticos y de gozo.

Agradecemos a nuestros amigos y amigas de la carrera que se presentaron en el momento exacto para mostrarnos su apoyo y guía para seguir al frente y no desistir del proceso.

Isabel Colque Phocco y Katheryne Brisseth Del Carpio Concha

RESUMEN

La crisis ambiental provocada por la extracción de combustibles fósiles viene generando grandes desafíos ambientales. Esto ha impulsado el interés en alternativas sostenibles, como las energías renovables, entre las cuales destaca la producción de biodiésel a partir de microalgas. Sin embargo, este enfoque presenta un reto significativo que es el cultivo de microalgas el cual requiere un alto consumo de agua. Por otro lado, un gran desafío ambiental es la producción de aguas residuales, debido a que suelen ser vertidas en cuerpos de agua sin un tratamiento adecuado o procesadas en plantas de tratamiento que resultan costosas y poco viables. Ante esta problemática, esta investigación propone aprovechar la *Chlorella vulgaris* para tratar aguas residuales domésticas mientras y utilizar la biomasa residual generada en el proceso para producir biodiésel. Esta estrategia permite abordar simultáneamente los retos del tratamiento de aguas residuales y la producción sostenible de biocombustibles. Para ello, primero se inoculó el agua residual con *Chlorella vulgaris* en frascos de 1 L de capacidad, realizando cuatro repeticiones. Posteriormente, se colocaron los frascos en una caja de madera equipada con tiras LED de diferentes tipos de luz en cada lado. Cada experimento se evaluó durante dos semanas. Además, se llevó a cabo el conteo del crecimiento celular utilizando la cámara de Neubauer, mientras que el parámetro de DQO fue analizado diariamente. Una vez identificada la luz con mejor eficiencia, se escaló a 10 L utilizando un fotoreactor. En esta etapa, se volvió a evaluar el crecimiento celular y la reducción de DQO, realizando tres repeticiones. A continuación, se procedió a la separación y secado de la biomasa microalgal. Con la biomasa obtenida, se llevó a cabo la extracción de lípidos utilizando el método de Bligh & Dyer combinado con un equipo de baño de ultrasonido. Finalmente, se realizó la transesterificación con metóxido de sodio para producir biodiésel. Los resultados mostraron que la luz roja fue predominante respecto a los otros tipos de luz: azul, blanca y combinada (azul/rojo). El rendimiento del parámetro de DQO alcanzó el 84 %, lo que indicó un tratamiento óptimo, siendo este el parámetro más evaluado y cumpliendo, de igual manera, con la normativa vigente nacional. Posteriormente, se obtuvo un rendimiento de lípidos del 11.16 % utilizando 1 g de biomasa de *Chlorella vulgaris*, mientras que el rendimiento de la producción de biodiesel fue del 96 %. Por lo tanto, se concluye que la microalga *Chlorella vulgaris* es una alternativa prometedora para la economía circular, tanto para el tratamiento de aguas residuales y producción de biodiésel. En esta última, etapa es necesario realizar más investigaciones para reducir brechas a nivel costo-económico.

Palabras clave: *Chlorella vulgaris*, Agua residual doméstica, Biodiesel.

ABSTRACT

The environmental crisis caused by the extraction of fossil fuels has generated major environmental challenges. This has increased interest in sustainable alternatives, such as renewable energy sources. Among these alternatives, the production of biodiesel from microalgae stands out. However, this approach presents a significant challenge in the form of the high water consumption required for microalgae cultivation of microalgae. On the other hand, wastewater production is a major environmental challenge, as it is often discharged into bodies of water without adequate treatment, or processed in costly and unviable treatment plants. In response to these issues, this research proposes the utilisation of *Chlorella vulgaris* for the treatment of domestic wastewater with the residual biomass generated from biodiesel production. This strategy is designed to address two significant challenges: the treatment of wastewater and the sustainable production of biofuel. In order to accomplish this objective, domestic wastewater was first inoculated with *Chlorella vulgaris* in 1 L flasks, with four replicates being conducted. Subsequently, the flasks were then placed inside a wooden box equipped with LED strips emitting different types of light on each side. The evaluation of each experiment was conducted over a period of two weeks. Furthermore, cell growth was monitored using a Neubauer chamber, and the chemical oxygen demand (COD) parameter was analyzed daily. Once the most efficient light type was identified, the experiment was scaled up to 10 L using a photoreactor. In this stage, cell growth and COD reduction were reevaluated, with three replicates performed. Next, the microalgal biomass was separated and dried. Lipid extraction was carried out using the Bligh & Dyer method combined with an ultrasonic bath. Finally, the transesterification process was performed using sodium methoxide to produce biodiesel. The results showed that red light outperformed the other types: blue, white, and a blue/red combination. The COD removal rate reached 84 %, indicating optimal treatment efficiency and adherence to current national regulations. Consequently, it can be concluded that *Chlorella vulgaris* signifies a promising alternative within a circular economy framework, for both wastewater treatment and biodiesel production. In this final stage, further research is necessary to reduce cost-economic disparities.

Key words: *Chlorella vulgaris*, Domestic wastewater, Biodiesel.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN..... 1

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.1. Problemática de la investigación..... 4

1.2. Justificación..... 5

1.2.1. Social..... 5

1.2.2. Económico 5

1.2.3. Ambiental 6

1.2.4. Tecnológica..... 6

1.3. Hipótesis 6

1.4. Objetivos 7

1.4.1. Objetivo General..... 7

1.4.2. Objetivos Específicos 7

1.5. Variables e indicadores 7

CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO 9

2. FUNDAMENTO TEÓRICO 10

2.1. Antecedentes de la investigación 10

2.2. Marco Teórico..... 18

2.2.1. Aguas residuales 18

A. Aguas residuales municipales..... 18

B. Caracterización de aguas residuales municipales 18

C. Nutrientes contenidos en aguas residuales..... 18

D. Impacto ambiental de aguas residuales.....	19
2.2.2. Tratamiento de aguas residuales.....	19
A. Descripción de la PTAR.....	19
B. Tratamiento preliminar.....	20
C. Tratamiento secundario.....	20
D. Tratamiento terciario.....	20
2.2.3. Microalgas.....	20
A. Características de la microalga.....	20
B. Cultivo de microalgas.....	21
C. Parámetros de cultivo.....	21
D. Influencia de la luz en la calidad del crecimiento de cultivos de microalgas.....	22
E. Espectro de absorción.....	23
F. Crecimiento de las microalgas.....	23
G. Valoración energética de microalgas.....	24
2.2.4. Remediación de agua residual municipal con microalgas.....	24
2.2.5. <i>Chlorella vulgaris</i>	25
A. Características de la <i>Chlorella vulgaris</i>	25
2.2.6. Relación microalga – bacteria.....	25
2.2.7. Relación microalga- hongo.....	26
2.2.8. Eliminación de nutrientes.....	26
2.2.9. Reducción del DQO.....	26
2.2.10. Método de extracción de lípidos.....	27
A. El método Bligh & Dyer.....	27
B. Extracción asistida por ultrasonido.....	27
2.2.11. Biodiésel.....	27
2.2.12. Producción de biodiésel.....	28
2.2.13. Potencial de las microalgas para producción de biodiésel.....	29
2.3. Marco Legal.....	29

CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	30
3. METODOLOGÍA	31
3.1. Tipo y nivel de investigación.....	31
3.2. Diseño de la investigación	31
3.2.1. Unidad de Análisis	31
3.2.2. Población de estudio	31
3.2.3. Tamaño de la muestra	32
3.2.4. Selección de la muestra	32
3.2.5. Materiales y equipos.....	32
A. Materiales	32
3.3. Método de la investigación.....	36
3.3.1. Identificación del crecimiento de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> en condiciones de laboratorio con agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.....	36
A. Identificación y caracterización de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	36
B. Selección de parámetros para el crecimiento de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>.....	36
C. Acondicionamiento del cultivo de la cepa de microalga <i>Chlorella vulgaris</i> con agua residual.....	39
3.3.2. Determinación de las condiciones para el crecimiento y reducción del DQO por tipo de color de luz blanca, roja, azul y combinada (azul/roja) de la <i>Chlorella vulgaris</i> en muestras de agua residual doméstica de la PTAR Escalerrilla de Arequipa.....	39
A. Recolección del agua residual de la planta de tratamiento	39
B. Análisis de la composición del agua residual de la PTAR La Escalerilla.....	39
C. Acondicionamiento de las condiciones de cultivo en el agua residual	40
D. Medición de la concentración celular de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> y determinación de la concentración de DQO del agua residual.....	40

3.3.3. Evaluación de la eficiencia del efecto de luz utilizando la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> a escala laboratorio de 10 L en la reducción de DQO en muestras de agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa	42
A. Escalamiento a 10 L de agua residual inoculado con <i>Chlorella vulgaris</i>	42
B. Determinación del crecimiento y la concentración de DQO del agua residual doméstica con <i>Chlorella vulgaris</i> en escala de 10 L.....	42
C. Comparación de la concentración de DQO antes y después del tratamiento con microalgas.....	42
3.3.4. Evaluación del uso de la biomasa de <i>Chlorella vulgaris</i> para la producción de biodiésel derivado del tratamiento del agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.....	43
A. Separación de la microalga del agua residual	43
B. Secado de las microalgas residuales.....	43
C. Extracción del contenido de lípidos de la biomasa <i>Chlorella vulgaris</i> obtenidas de aguas residuales municipales	43
D. Rendimiento de la extracción de lípidos.....	44
E. Procesamiento de la transesterificación para obtener biodiésel	44
F. Rendimiento de la producción de biodiésel.....	45
CAPÍTULO IV RESULTADO Y DISCUSIÓN.....	47
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1. Identificación del crecimiento de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> en condiciones de laboratorio con agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.....	48
4.1.1. Identificación de <i>Chlorella vulgaris</i>	48
4.1.2. Evaluación del crecimiento de la <i>Chlorella vulgaris</i>	49
4.1.3. Resultado de caracterización de agua residual inicial.....	50
4.2. Determinación de las condiciones para el crecimiento y reducción del DQO por tipo de color de luz blanca, roja, azul y combinada (azul/roja) de la <i>Chlorella vulgaris</i> en muestras de agua residual doméstica de la PTAR Escalerrilla de Arequipa.	51

4.2.1. Evaluación del crecimiento celular de la <i>Chlorella vulgaris</i> por tipo de color de luz.....	52
4.2.2. Análisis de DQO por tipo de color de luz	58
4.2.3. Ruta bioquímica de <i>Chlorella Vulgaris</i> en el tratamiento de agua residual en el biorreactor.....	62
4.3. Evaluación de la eficiencia del efecto de luz utilizando la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> a escala laboratorio de 10 L en la reducción de DQO en muestras de agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.....	64
4.3.1. Crecimiento de microalga a escala de biorreactor	64
4.3.2. Remoción de DQO a escala de biorreactor	65
4.3.3. Balance de materia y energía del proceso de tratamiento de agua residual en el biorreactor.....	68
4.4. Evaluación del uso de la biomasa de <i>Chlorella vulgaris</i> para la producción de biodiésel derivado del tratamiento del agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.....	69
4.4.1. Separación de biomasa residual y extracción de lípidos	70
4.4.2. Rendimiento de lípidos	71
4.4.3. Rendimiento de biodiesel	72
4.4.4. Análisis costo-beneficio ambiental	73
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
5.1. Conclusiones.....	84
5.2. Recomendaciones.....	85
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
7. ANEXOS.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Variables e indicadores</i>	8
Tabla 2 <i>Equipos utilizados en la experimentación</i>	33
Tabla 3 <i>Materiales utilizados en la experimentación</i>	35
Tabla 4 <i>Composición química (g/L) del medio de cultivo (BBM)</i>	37
Tabla 5 <i>Programa de monitoreo</i>	38
Tabla 6 <i>Método estándar de DQO</i>	41
Tabla 7 <i>Resultados del análisis de laboratorio del agua residual antes del tratamiento</i>	51
Tabla 8 <i>Prueba de Kruskal-Wallis</i>	61
Tabla 9 <i>Resultados del Método LSD de Fisher y una confianza al 95 %</i>	61
Tabla 10 <i>Resultados del análisis de laboratorio comparando el agua residual no tratada y tratada con la microalga Chlorella vulgaris</i>	66
Tabla 11 <i>Costo total de la metodología aplicada en la investigación</i>	76
Tabla 12 <i>Reajuste de los costos estimados</i>	77
Tabla 13 <i>Proyección de ventas</i>	78
Tabla 14 <i>Comparativa de las metodologías de extracción de lípidos</i>	80
Tabla 15 <i>Comparación de costos de solvente y gasto energético de las metodologías</i>	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Reacción de transesterificación</i>	28
Figura 2 <i>Estructura de Cámara de Neubauer</i>	40
Figura 3 <i>Flujograma de la metodología realizada en la investigación</i>	46
Figura 4 <i>Medición de Chlorella vulgaris a medida de 40 X en el microscopio</i>	49
Figura 5 <i>Curva de crecimiento preliminar de Chlorella vulgaris</i>	50
Figura 6 <i>Curva de crecimiento del color de luz combinada (azul/rojo)</i>	54
Figura 7 <i>Curva de crecimiento del color de luz azul</i>	55
Figura 8 <i>Curva de crecimiento del color de luz roja</i>	56
Figura 9 <i>Curva de crecimiento del color de luz blanca</i>	57
Figura 10 <i>Curva remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	59
Figura 11 <i>Diferencias de medias del método LSD de Fisher</i>	62
Figura 12 <i>Ruta bioquímica de microalga Chlorella Vulgaris</i>	63
Figura 13 <i>Crecimiento celular de la Chlorella vulgaris en reactor de 10 L</i>	65
Figura 14 <i>Remoción de DQO del agua residual en reactor de 10 L</i>	66
Figura 15 <i>Diagrama de balance de materia y energía de biorreactor</i>	69
Figura 16 <i>Diagrama de flujo del proceso de la PTAR La Escalerilla</i>	101
Figura 17 <i>Georreferencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Escalerilla</i>	103
Figura 18 <i>Comparación del crecimiento celular de la microalga Chlorella vulgaris por tipo de color de luz</i>	105
Figura 19 <i>Instalaciones de la PTAR La Escalerilla</i>	127
Figura 20 <i>Zona de pretratamiento de la PTAR La Escalerilla</i>	127
Figura 21 <i>Toma de muestra de agua residual en la salida de la etapa de pretratamiento - primera parte</i>	127
Figura 22 <i>Toma de muestra de agua residual en la salida de la etapa de pretratamiento - segunda parte</i>	127
Figura 23 <i>Preparación para el conteo celular de la Chlorella vulgaris</i>	128
Figura 24 <i>Crecimiento de Chlorella vulgaris en botellas de 1L para prueba de adaptación de la microalga</i>	128
Figura 25 <i>Unidades experimentales con luz combinada rojo/azul</i>	128
Figura 26 <i>Unidades experimentales con luz blanca</i>	128
Figura 27 <i>Unidades experimentales con luz roja</i>	129
Figura 28 <i>Unidades experimentales con luz azul</i>	129
Figura 29 <i>Primer día de inocular Chlorella vulgaris con agua residual</i>	129

Figura 30 <i>Muestra de agua residual para análisis de DQO</i>	129
Figura 31 <i>Mezcla de muestra, solución digestora y ácido sulfúrico</i>	130
Figura 32 <i>Solución para medir absorbancia en el espectrofotómetro</i>	130
Figura 33 <i>Último día de crecimiento de Chlorella vulgaris en agua residual</i>	130
Figura 34 <i>Cultivo de microalga de 10L de agua residual</i>	130
Figura 35 <i>Envío de muestras de agua residual final</i>	130
Figura 36 <i>Separación de la Chlorella vulgaris con floculante</i>	130
Figura 37 <i>Centrifugación de la Chlorella vulgaris para obtener biomasa húmeda</i>	131
Figura 38 <i>Biomasa microalgal en la estufa a 60 °C</i>	131
Figura 39 <i>Molido de biomasa seca de Chlorella vulgaris</i>	131
Figura 40 <i>Utilización de ultrasonido para extraer lípidos</i>	131
Figura 41 <i>Uso de rotavapor para extraer el solvente</i>	131
Figura 42 <i>Filtración de la biomasa seca de la Chlorella vulgaris</i>	131
Figura 43 <i>Clarificación del lípido con carbón activado</i>	132
Figura 44 <i>Agitación del lípido con metóxido de sodio</i>	132
Figura 45 <i>Separación de fases para obtener biodiésel</i>	132
Figura 46 <i>Diseño del Reactor de 10 L</i>	134

INTRODUCCIÓN

La situación actual en torno a los combustibles está marcada por un consumo masivo impulsado por el desarrollo de la economía global, lo que ha llevado a un incremento progresivo en el uso de energías fósiles. Este tipo de energía libera grandes cantidades de gases de efecto invernadero, contribuyendo significativamente al cambio climático. Además, la creciente escasez de combustibles fósiles hace imprescindible buscar nuevas fuentes de energía. En este contexto, los biocombustibles surgen como una opción viable, ya que ayudan a mitigar los impactos negativos asociados al uso de combustibles fósiles y disminuir su contribución al calentamiento global. Estos provienen de las microalgas que presentan una notable capacidad para capturar gases de efecto invernadero, uno de los principales problemas ambientales actuales. Como el dióxido de carbono (CO_2), que contribuye a la destrucción de la capa de ozono, siendo las microalgas eficaces para mitigarlo. Además, se ha demostrado que son eficientes para reducir las emisiones contaminantes asociadas a la combustión de combustibles fósiles y evita el uso de cultivos alimentarios como materia prima. (Blanco Cornelio et al., 2022)

Es por eso que resulta fundamental adoptar nuevas tecnologías sostenibles, accesibles y eficientes. En este sentido, las microalgas se posicionan actualmente como una de las materias primas más prometedoras para la generación de biodiésel. A nivel mundial, se estima que existen aproximadamente 50.000 especies de microalgas, las cuales se encuentran ampliamente distribuidas en diversos ecosistemas (He et al., 2021). Estas microalgas son microorganismos fotosintéticos con una notable capacidad para fijar dióxido de carbono y liberando oxígeno como subproducto de la fotosíntesis. Así, la necesidad de altas cantidades de nitrógeno y fósforo para su crecimiento permite que puedan ser cultivadas en aguas que contengan estos componentes.

A principios del siglo XX, Caldwell llevó a cabo las primeras investigaciones sobre la posibilidad de utilizar microalgas como agentes para el tratamiento de aguas residuales. Esto se debe a su capacidad de aprovechar los nutrientes presentes en estas aguas como fuente de crecimiento, funcionando, así como un medio de cultivo. Durante las décadas de 1950 y 1960, científicos como Oswald y Hollister profundizaron en este campo (Salazar, 2005 como se citó en Manzaneda, 2023). Desde entonces, el empleo de microalgas se ha consolidado como un método prometedor para el tratamiento de aguas residuales, gracias a su eficacia en la eliminación de materia orgánica, nutrientes, micro contaminantes y metales pesados.

En este contexto, es posible llevar a cabo soluciones eficaces y sostenibles para abordar ambos problemas, dado que el manejo de las aguas residuales domésticas constituye un reto ambiental, social y de salud pública a nivel global. Según Agüero-Quiñones et al. (2023) indicaron que una gran cantidad de aguas residuales producidas diariamente por diversas fuentes, el 80 % se vierte al medio natural sin cumplir con los estándares óptimos de calidad del agua. Ocasionando graves consecuencias como contaminar los ecosistemas acuáticos, producir graves enfermedades y descuidar la preservación y

gestión responsable de los recursos hídricos para las generaciones futuras. No obstante, los métodos tradicionales presentan limitaciones significativas debido a su ineficiencia y altos costos operativos. Esto resalta la necesidad de desarrollar e implementar soluciones más económicas, sostenibles y adaptadas a las necesidades de cada región, asegurando así un tratamiento más efectivo y accesible para todas las comunidades.

Por lo tanto, el objetivo general de la investigación fue evaluar el efecto del color de luz sobre la producción de biomasa de la *Chlorella vulgaris* asociado al tratamiento de aguas residuales como medio de cultivo y subsecuente producción de biodiesel como alternativa de economía circular mientras que los objetivos específicos fueron evaluar el crecimiento y remoción de DQO de *Chlorella vulgaris* en aguas residuales domésticas; evaluar el efecto que produce cada tipo de luz sobre el crecimiento y remoción de DQO utilizando la biomasa de *Chlorella vulgaris*, así como su influencia la extracción de lípidos; y finalmente, evaluar la producción de biodiesel producto de biomasa de microalga proveniente del tratamiento de aguas residuales. Tomando como hipótesis que la biomasa de *Chlorella vulgaris* presenta una alta productividad de biomasa y producción de lípidos debido que son consideradas potenciales fuentes de combustibles alternativos como el biodiesel.





CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

Como se sabe, se viene produciendo una mayor demanda en la extracción de combustibles fósiles, el cual está generando una crisis ambiental, donde según el informe sobre la Calidad del Aire Mundial del 2019, el 90 % de la población mundial respira aire contaminado por encima de los objetivos establecidos por la World Health Organization: WHO, (2022). Asimismo, en otro estudio se encontró que la contaminación del aire, representó alrededor del 17.1 % siendo de 3 a 5 veces superior al límite establecido por la OMS, ubicándolo como el segundo factor de riesgo principal de morbilidad y mortalidad mundial. (IQAir, 2024)

Mientras que, de acuerdo con un reporte de la BBC (2021), el Perú figura entre los países latinoamericanos con mayores proporciones de muertes atribuibles a la contaminación por combustibles fósiles, alcanzando un 8.5 % de mortandad. También cabe señalar que el país depende en un 72 % de los hidrocarburos, manifestado la variación en relación con el uso de energías renovables. En tal sentido, se muestra la vulnerabilidad de la excesiva dependencia de los hidrocarburos y de un sólo gasoducto, además, agregado a la creciente importación de petróleo y derivados eleva la contaminación ambiental. Del mismo modo en la región Arequipa, el parque automotor es la principal fuente de emisiones contaminantes al aire, liberando dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxido nítrico y material particulado a la atmósfera (Flores, 2017 como se citó en Zeballos, 2019). Esta situación ha llevado a las autoridades sobre la importancia de frenar el uso de combustibles fósiles y tomar otras medidas tangibles para reducir los niveles de contaminación del aire. (World Health Organization: WHO, 2022)

Por eso se da el comienzo del cambio de los combustibles de origen fósil no renovable, por los biocombustibles, como el aprovechamiento de microalgas, que se consideran un recurso energético viable. Sin embargo, esta alternativa consume gran cantidad de agua para su proceso de cultivo. Lo cual, lleva a otro desafío que es la generación de aguas residuales, ya que el agua es uno de los recursos naturales más importantes, puesto que, es indispensable para el desarrollo de la vida y el medio ambiente, pero se trata de un bien escaso el cual se desperdicia, según la UNESCO se estima que en el mundo más del 80 % de las aguas residuales (más del 95 % en algunos países en desarrollo) se vierte al medio ambiente sin tratamiento alguno. En Perú en promedio de 3.28 millones de m³/día de agua residual son vertidos al alcantarillado y requieren tratamiento antes de su disposición en el medio ambiente o su reúso (SUNASS, 2022). No obstante, no todos los proyectos de tratamiento o reúso de aguas residuales son viables, ya sea en el pretratamiento, primario, secundario o terciario, debido que involucra diversos factores, como las instalaciones, la optimización del consumo del agua potable de parte de la población, entre otros. Quedando aún pendiente, tener una inversión adecuada para remediar estos impactos ambientales.

Por ello, es de importancia y necesario una nueva propuesta de tratamiento agregado de un enfoque de economía circular como la producción de biodiesel a base de microalgas con el fin de aprovechar el residuo del proceso, ya que aún no se registra la utilización de tal asociación a nivel nacional.

1.2. Justificación

1.2.1. Social

Ante el continuo aumento de enfermedades debido a la contaminación de la calidad del agua como el cólera, diarreas, disentería y la contaminación de la calidad del aire como riesgo de infecciones respiratorias, cáncer al pulmón, generando mayor vulnerabilidad en la salud de las personas es que mediante el presente estudio, se fomentará a contribuir a largo plazo la utilización de energías renovables el cual reducirá emisiones de gases de efecto invernadero, con la finalidad de proteger la salud y calidad de vida de las personas relacionado con objetivo 3 de desarrollo sostenible y garantizar el acceso a energía a la población y objetivo 7 el cual expone que la energía debe ser asequible, fiable, sostenible y moderna para todos, lo cual brindará un biocombustible a partir de la biomasa de la microalga. Así como también, una alternativa de tratamiento de agua residual que ayudará a la disminución de enfermedades.

1.2.2. Económico

En la actualidad, existen diferentes métodos para el tratamiento de aguas residuales (físicos, químicos o biológicos) según el tipo de agua residual, sin embargo, puede darse algunas desventajas como altos costos de inversión, operación o requerimientos operacionales complejos. Por lo que, si bien es cierto el cultivo de microalgas se le conoce como una alternativa costosa, la asociación de un tratamiento de agua residual y producción de biodiésel, genera costos más rentables, por ende, más accesibles para los actores involucrados. Además, de ser viable con el cumplimiento de normativas de calidad y con ello se podrá generar ingresos económicos a partir de los residuos producidos. Con el fin de contribuir a la disminución de la dependencia hacia los combustibles fósiles y diversificar el mercado actual con otra alternativa de energía renovable que pueda ser rentable a futuro, dado que los combustibles fósiles día a día incrementan su precio y las reservas de combustible del mundo empiezan a agotarse.

1.2.3. Ambiental

La actual crisis ambiental, presenta un incremento continuo de contaminación al aire por la generación de combustibles fósiles que emite gran cantidad de gases tóxicos como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO) y otros gases de efecto invernadero que, a su vez, atrapan el calor a la atmósfera, lo que los convierte en los principales responsables del calentamiento global y cambio climático. Ante ello la producción de biocombustibles a partir de microalgas es una alternativa sostenible al uso de combustibles fósiles, dado que su cultivo permite captar grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera generados por el sector automotriz, promoviendo medidas contra el cambio climático según el objetivo 13 de desarrollo sostenible. Además de proponer una alternativa de mejoramiento en la calidad de los efluentes domésticos contribuyendo con el objetivo 6 de desarrollo sostenible y realizar un reaprovechamiento de la biomasa residual para la generación de biocombustibles como el biodiesel dando una alternativa de economía circular a la presente investigación contribuyendo así con el objetivo 12, mediante este enfoque minimiza la generación de residuos y se adopta una producción más sostenible.

1.2.4. Tecnológica

El estudio de la utilización de microalgas es un campo que aún le falta mucho desarrollo, es necesario generar más investigaciones con la finalidad que sea una alternativa más sustentable para diversos proyectos a gran escala, además a nivel nacional no se tiene gran cantidad de investigaciones del uso de la microalga *Chlorella vulgaris* para el tratamiento de agua residual asociado con la producción de biodiesel. Sin embargo, con el fortalecimiento a la base científica para incentivar el desarrollo de investigación en energías renovables, con la producción de biocombustibles a partir del aprovechamiento de la microalga *Chlorella vulgaris* así como en nuevas alternativas de tratamiento de aguas residuales. Con esta investigación, también se tendrá mayor contribución a la investigación científica o conocimiento respecto a la asociación de dos procesos para futuras investigaciones relacionadas al tema dado.

1.3. Hipótesis

Dado que *Chlorella vulgaris* presenta una alta productividad de biomasa y lípidos, es probable que la misma pueda utilizarse de manera efectiva en un tratamiento para aguas residuales domésticas y posteriormente con su biomasa producir biodiésel, evaluando los efectos de distintos colores de luz y el agua residual como medio de cultivo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el efecto del color de luz sobre la producción de biomasa de *Chlorella vulgaris* asociado al tratamiento de aguas residuales como medio de cultivo y subsecuente producción de biodiesel como alternativa de economía circular.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* en condiciones de laboratorio con agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.
- Determinar las condiciones para el crecimiento y reducción del DQO por tipo de color de luz blanca, roja, azul y combinada (azul/roja) de la *Chlorella vulgaris* en muestras de agua residual doméstica de la PTAR Escalerilla de Arequipa.
- Evaluar la eficiencia del efecto de luz utilizando la microalga *Chlorella vulgaris* a escala laboratorio de 10 L en la reducción de DQO en muestras de agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.
- Evaluar el uso de la biomasa de *Chlorella vulgaris* para la producción de biodiésel derivado del tratamiento del agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.

1.5. Variables e indicadores

En la Tabla 1. se muestra las variables e indicadores que se usó en la presente investigación.

Tabla 1

Variables e indicadores

Tipo	Variable	Naturaleza	Indicador	Unidad
INDEPENDIENTE	Condiciones de cultivo: Tipo de color de luz	Cualitativa	Luz LED	-
	Porcentaje promedio final de remoción de DQO		$\%R = \left(\frac{C_o - C}{C_o} \right) \times 100$	%
DEPENDIENTE	Porcentaje del rendimiento de lípidos	Cuantitativa	$\text{Rendimiento de extracción de lípidos}(\%) = \frac{\text{Peso de extracción de aceite (g)}}{\text{peso de la biomasa de la microalga (g)}} \times 100$	%
	Porcentaje del rendimiento de biodiesel		$\text{Rendimiento de biodiésel}(\%) = \frac{\text{Masa de biodiésel (g)}}{\text{algas (g)} \times \text{contenido de aceite} (\%)} \times 100$	%



CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Aketo et al. (2020), el estudio tuvo como objetivo reducir costos a partir del cultivo de microalgas con aguas residuales las cuales contienen nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, importantes para su reproducción, por lo que procedieron a seleccionar a partir de cincuenta y ocho cepas de algas que fueron examinadas en términos de crecimiento celular, biomasa y producción de lípidos de las cuales veinte fueron seleccionadas para evaluar la capacidad de remoción de nutrientes tanto de nitrógeno como de fósforo así como de la producción de biomasa, Al realizar las pruebas necesarias las microalgas *P. kessleri* y *C. saccharophilum* demostraron alta productividad de lípidos adecuados para la aplicación de biodiésel y eliminación de materia orgánica, lo que indica que estas microalgas son prometedoras para el tratamiento de aguas residuales y la producción simultánea de lípidos.

Quispe (2023), evaluó la capacidad depuradora de las microalgas *Scenedesmus sp.* y *Chlorella sp.* para el tratamiento de aguas residuales domésticas a escala laboratorio en el distrito de Juliaca- Puno. Se aplicó una dosis de (5, 10, 15, 20, 25 y 30) % de microalgas en agua residual, que se realizó por 12 d y los análisis se dieron desde el día 8 hasta el día 12, mientras que el crecimiento celular se controló con la muestra continua de pH y temperatura. En los resultados pudo obtener con la microalga *Chlorella sp.* una reducción de 81.06 % en SST, 77.71% en DBO, 80.78% en DQO y 100% en coliformes termotolerantes, es resultados se dieron al trabajar con una dosis al 20%. Por ello se concluye que este tratamiento es eficiente para llevar a cabo otra alternativa de tratamiento en agua residual doméstica.

Krishnamoorthy et al. (2023), el presente estudio estableció analizar la optimización de método de ultrasonido el cual utilizó dos tipos de microalgas *Chlorella vulgaris* y *Nannochloropsis oculata* donde probó frecuencias ultrasónicas de 37 kHz y 80 kHz, tiempo de exposición de (10, 15, 20) min y tiempos de extracción de (2, 3 y 4) h, obteniendo un mejor rendimiento de lípidos con frecuencia de 80 kHz, 20 min de exposición y 4 h de extracción. En el resultado reportó un rendimiento de lípidos del 17.91 % en *Nannochloropsis oculata* mientras, que, con una frecuencia de 80 kHz, 15 min de exposición y 3 h de extracción dió un rendimiento de lípidos del 11.54 % en *Chlorella vulgaris*, por lo tanto, quedó demostrado la alta eficacia del método de ultrasonido para extraer lípidos de microalgas.

Salgueiro (2018), en este estudio los autores tomaron en cuenta problemas como la generación de aguas residuales y las reservas ilimitadas de combustibles fósiles, para mostrar una alternativa de solución emplearon dos especies de microalgas con mayor potencial en la actualidad, *Chlorella vulgaris* y *Pavlova lutheri*. La facilidad de cultivo, la adaptabilidad de las especies a diferentes medios, así como su elevado contenido en lípidos motivaron su elección. Dando como resultados que ambas especies son válidas para la obtención de biocombustibles líquidos, como el biodiésel, si bien el residuo resultante

tras el proceso de obtención de éste, todavía posee un gran potencial de valorización pudiendo ser utilizado para la elaboración de uno de los biocombustibles sólidos más demandados a día de hoy como los pellets.

López (2019), en este estudio se evaluó la capacidad de dos tipos de microalgas *Chlorella sp.* y *Desmodesmus sp.*, para el tratamiento de aguas residuales removiendo los nutrientes de nitratos y fosfatos. El cultivo de las microalgas fue realizado con el tipo “batch” o también conocido sistema por lotes, con el fin de conseguir una alta densidad de microalgas. También se determinó el crecimiento en cada reactor a través de la lectura de longitud de onda y la obtención de la densidad celular, así como el porcentaje final de remoción y la tasa promedio de remoción de ambas microalgas.

Oliveros et al. (2019), en el presente estudio se determinó la capacidad de remoción de nitratos y fosfatos en aguas residuales municipales por microalgas nativas del distrito de surco en Lima, donde se identificaron dos tipos *Chlorella sp.* y *Chlamydomonas sp.* y se evaluó su capacidad de remoción tanto de NO_3^- y PO_4^{3-} durante 10 d en el laboratorio, en aguas residuales como un tratamiento primario, con dos formas de tipo de cultivo, una libre y otra inmovilizada en discos de alginato de sodio al 4 %. Las cepas *Chlorella sp.* y *Chlamydomonas sp.* tuvieron un buen crecimiento en las aguas residuales, sobre todo *Chlamydomonas sp.*, la cual reportó los mayores valores en los parámetros cinéticos de crecimiento. Siendo el factor de mayor efecto de la forma de cultivo libre con mayor cantidad de remoción con (67 y 81) % de NO_3^- y PO_4^{3-} respectivamente.

Escalante & Vizcarra, (2019), la siguiente investigación se estudió la microalga *Chlorella sp.* bajo diferentes condiciones de temperatura (22, 25 y 28) °C, intensidad de color de luz (2000, 6000 10000) lx y pH 5, 7 y 9. Luego de un análisis estadístico de los resultados, se determinó que las condiciones óptimas en temperatura de 24.74 °C, intensidad de luz de 6599.51 lx y un pH de 8.25. Esto se realizó para la obtención de ésteres metílicos de ácidos grasos en un fotobiorreactor, donde se obtuvo un máximo porcentaje lipídico alcanzable de 79.39 %, que indica incremento de biomasa de la microalga cultivada en un fotobiorreactor a condiciones optimizadas de laboratorio y ambientales de Arequipa, además presentó mayor proporción de ácidos grasos insaturados, siendo los más relevantes el ácido palmitoleico y el linolénico.

Lee et al. (2023), investigaron el potencial de aguas residuales mixtas como medio de cultivo de la microalga *Chlorella sokoriniana*, con el fin de obtener un tratamiento sostenible de aguas residuales y producción de biodiesel. Para ello aplicaron la dilución de agua residual ganadera con agua residual doméstica e inocularon con la microalga en un fotobiorreactor de columna de burbujas. Mientras que en la extracción de lípidos aplicaron el método modificado de Bligh y Dyer con proporción de 1:2 de cloroformo y metanol luego usaron el baño de ultrasonido. Seguidamente para la transesterificación utilizaron hidróxido de sodio en 1 % de metanol. Por consiguiente, en los resultados reportaron que tanto la dilución al 75 % y en aguas residual doméstica propia obtuvieron una

concentración máxima de biomasa, con ello concluyeron que es una estrategia sostenible y rentable, sin embargo, se requiere mayor investigación para aplicar otros tipos de aguas residuales como medio de cultivo.

Arce (2018), la investigación tuvo como propósito obtener y caracterizar el biodiesel a partir de la microalga *Chlorella vulgaris* mediante un fotobiorreactor tubular, donde se desarrolló una comparación del crecimiento y la concentración de clorofila del cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris*, con un cultivo en condiciones de laboratorio y otro a condiciones ambientales, después se realizó una extracción y se determinó el contenido de lípidos por el método soxhlet, obteniendo un aporte interesante de la caracterización fisicoquímica de calidad del biodiesel, con una densidad de 0.88131 g/mL. Finalmente se comparó con las especificaciones técnicas de PETROPERÚ, el cual se mostró que el índice de diésel salió muy cercano a lo establecido por el organismo.

Iparraguirre & Zamora (2023) evaluaron las aguas residuales domésticas en la quebrada Shupishiña, región San Martín, que representan una problemática ambiental significativa. Utilizando la microalga *Chlorella sp.* donde se evaluó la Demanda Química de Oxígeno (DQO) inicial y final, en diferentes concentraciones de *Chlorella sp.* al (0, 10, 20, 30) % en 15 d por duplicado, para el tratamiento de estas aguas residuales domésticas. Obteniendo como resultado final que el tratamiento con una dosis del 30 % de microalga logró mayor eficiencia de remoción, alcanzando valores de (23.14 y 30.18) mg/L, correspondientes a reducciones del (96.37 y 95.26) %, respectivamente. De igual manera, las concentraciones (10, 20 y 30) % cumplieron con los estándares normativos.

Rubio et al. (2018), reportó el uso de microalgas provenientes de la laguna Limoncocha con diferentes consorcios provenientes de esta, los cuales fueron cultivados en laboratorio con fotobiorreactores, controlando los parámetros más importantes, donde se midió su crecimiento por Cámara de Neubauer y por espectrofotometría UV-visual la cual generó líneas en gráficos, también se realizó la extracción y cuantificación de lípidos por el método soxhlet, siendo el más convencional en diversas investigaciones, donde utilizaron como solvente cloroformo:metanol (1:2) dando como resultado, un eficiente consorcio de *Chlorella/Monoraphidium Contortum sp.* teniendo un mejor rendimiento para la producción de lípidos e identificándolos como anfipáticos a través de la cromatografía en capa fina T.L.C.

Kamolrat et al. (2023), estudiaron el crecimiento de la *Chlorella vulgaris* con luz LED azul el cual probaron fotoperiodos de luz de (24:0, 26:8 y 12:12) h y utilizaron como medio de cultivo fertilizantes comerciales. En los resultados pudieron constatar que con el fotoperiodo de 24:0 h presentó un mejor crecimiento, inicialmente se tuvo 1.6×10^5 cel/mL luego alcanzó hasta 1.64×10^7 cel/mL en el día 5 de cultivo, además, que la energía de la luz LED influyó en la temperatura debido que osciló entre (35.5-38.5) °C, por lo tanto, la luz LED estimuló el proceso fotosintético de la clorofila a y b en las células de la microalga, el cual generó un mayor crecimiento.

Pérez et al. (2018), el estudio tuvo como objetivo determinar la composición de lípidos de la *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.* usando el método gravimétrico; determinar la eficiencia de diferentes solventes para la extracción de lípidos con el método soxhlet; y comparar las productividades de recuperación de lípidos de la *Chlorella sp.* obtenidas con pretratamientos térmico y físico, el cual señala que no es necesario el uso de pretratamiento debido a su bajo aumento de eficiencia en la extracción de lípidos usando el autoclavado y la liofilización. Los resultados dieron a conocer mayor eficiencia con la microalga *Chlorella sp.* con un 20.37 % por muestra seca, donde se menciona que después de haber comparado diferentes combinaciones de solventes, utilizaron cloroformo: metanol en proporción 1:2 o metanol: hexano 1:3 para la extracción de lípidos que se realizó con el método Soxhlet usando un 1 g de muestra y 150 mL de solvente siendo estas cantidades las menores que se ha podido observar.

He et al. (2021) aplicaron luz LED rojo y azul para el crecimiento de la *Chlorella pyrenoidosa* y *Scenedesmus obliquus* en aguas residuales municipales, asimismo, se comparó el consumo energético de cada uno, resultando que la luz LED continua tuvo mejor efecto para el tratamiento de agua residual municipal el cual redujeron más del 78 % de DQO y mostró un mayor ahorro energético debido que el consumo fue 0.45 y 0.28 veces menor en comparación con la luz LED intermitente. Por otro lado, la luz LED roja continua obtuvo mayor contenido de biomasa en ambas microalgas en contraste con la luz LED azul, debido que absorben la luz LED roja mediante la clorofila y está relacionado con la fijación de carbono en las células.

Espinoza (2018), investigó sobre el uso de la microalga *Chlorella vulgaris* con el tratamiento de aguas residuales municipales, que desembocan en la laguna de oxidación de Cachiche. Para su uso en actividades agrícolas y forestales. Después de su evaluación se observó una remoción de metales pesados, con eficiencias de eliminación que oscilaron entre (2.83 y 92.60) %. Además, se logró una remoción del 89.65 % de nitratos y del 99.9 % de coliformes termotolerantes. Como también utilizó el Sulfato de Aluminio que ayuda a precipitar arrastrando las partículas en suspensión como los sólidos suspendidos, reduciendo de esta manera la turbidez.

Maltsev et al. (2021) analizaron cómo distintos tipos de luz afectan el crecimiento de microalgas como *Chlorella vulgaris* producción de lípidos, carotenoides y ácidos grasos, con el uso de iluminación LED que contribuye con reducción del gasto energético de la producción, siendo parecido en composición espectral al sol. Donde se indicó que el uso de luz roja y azul aumentan la productividad de biomasa y un aumento en la intensidad de la luz conlleva un aumento en la síntesis de lípidos. Así como al modificar la duración del fotoperiodo y la intensidad de la luz, es posible cambiar la composición bioquímica de las microalgas.

Vellaiyan (2024), investigó la integración de tratamiento de aguas residuales y cultivo de microalgas para extraer biodiesel y analizar su rendimiento en el mercado comercial. Para ello empleó la microalga *Chlorella vulgaris* para su cultivo, aplicó varias dosis de agua y orina debido a los

nutrientes. Mientras que para la producción de biodiésel aplico el método Bligh y Dyer con 250 ml de metanol y 125 mL de cloroformo, en la transesterificación usó la proporción (6:1) y en catalizador hidróxido de sodio al 1 %, luego lo paso hacia la pera de decantación para su separación. Los hallazgos demostraron de remoción en Ca, Mg, K, y N con (48.8, 73.1, 58.6 y 61.1) %. Además, indicó que una mezcla de cantidad regular de diésel con el biodiesel producido, generó una baja huella de carbono, sin embargo, se tuvo un impacto negativo en el rendimiento y emisión de óxido de nitrógeno, por ello se aplicó el combustible emulsionado en agua lo cual fomento más eficiencia.

Wong & Shahirah (2019), realizaron una extracción soxhlet asistidas por ultrasonidos para la obtención de aceite de microalgas usando diferentes disolventes individuales apolares como cloroformo y hexano, disolventes polares como el etanol con 300 mL y binarios en la combinación de cloroformo/etanol con una proporción (1:1) y otra combinación (1:2) utilizando 10 g de biomasa de microalgas en polvo, donde se aclara que de (7 a 8) h es el mejor momento para hacer la extracción porque entre esos intervalos de tiempo, el aceite se encontró en el máximo rendimiento ,mientras que en el tiempo de extracción por encima de las 8 h, resultando que el lípido no mostró ningún cambio. Por ello se concluye, que el disolvente con mayor rendimiento fue el cloroformo y etanol con una proporción (1:2) para la producción de biodiésel.

Ma & Jian (2023), evaluaron la factibilidad del tratamiento de aguas residuales domésticas y acumulación de la biomasa mediante modelo cinético para analizar el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* el cual se colocó en tiempo de luz de 24 h y temperatura de 25 °C, el cual emplearon el fotobiorreactor. En los resultados demostraron que el uso de la materia renovable de agua residual mejora significativamente la sostenibilidad del cultivo de microalgas, por ello la tasa de eliminación de los nutrientes alcanzó el 85 % de remoción. Además, el modelo logístico indicó mejor el crecimiento de la microalga, sin embargo, tales modelos no describen de forma completa cada etapa de crecimiento como cambio de nutrientes, muerte celular y la competencia entre especies, por consiguiente, es necesario realizar mejoras en los modelos cinéticos.

Merma et al. (2017), la investigación tuvo como finalidad la producción de biodiésel a partir de otra alternativa que es la biomasa algal, para ello se realizó una serie de etapas, una de ellas es la transesterificación, el cual consta de un calentado que se mezcló con metóxido de sodio llevando al agitador por 45 min, produciendo así a la glicerina y aceite, luego se realizó la separación y lavado para la obtención de biodiésel. Dando como resultado que la *Chlorella vulgaris* presentó mayor biomasa húmeda, teniendo como rendimiento del 83.3 % y por último se verificó la calidad del biodiesel obteniendo un pH de 5.5, densidad de 0.884 g/mL, viscosidad de 0.36 cp, índice de refracción de 1400 valores dados a una temperatura de 25 °C el cual indica que cumple con los estándares internacionales.

Damián & Vásquez, (2021), investigaron que la *Chlorella sp.* es eficiente en la producción de biodiesel, además el aumento de la concentración del medio de cultivo genera mayor productividad de

biomasa y lípidos, también determinaron que las especies más utilizadas son *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella minutissima* y *Chlorella vulgaris* debido que componen de ácidos grasos poli-insaturados, también se concluyó que los principales parámetros para el medio de cultivo son la temperatura, pH, intensidad lumínica y tiempo, además se obtuvo 800 mg/L en productividad de biomasa y 51.7 % en contenido de lípidos.

Goicochea (2021), examinó la capacidad de obtención de producción de biodiesel de la *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus*, el cual mostró un mayor crecimiento con *Chlorella vulgaris* en condiciones de pH 7 y 22 °C, mientras que la biomasa de lípidos fue similar entre las dos especies de acuerdo a estudios, *Scenedesmus acutus* tuvo mayor rendimiento en la producción de biodiésel debido que a partir de 278.87 mg/L de lípidos género 244.54 mg/L y *Chlorella vulgaris*, a partir de 218.65 de mg/L de lípidos género 191.76 mg/L.

Gómez & Rodríguez (2019), en el presente estudio obtuvieron la eficiencia en la remoción de nutrientes de aguas residuales, producción de biomasa, lípidos y cálculo teórico de la producción de biodiésel. Determinaron que el medio más óptimo para mayor obtención de biomasa de microalga *Chlorella vulgaris* fue en aguas residuales industriales, por ende, se tuvo un mayor porcentaje de producción de biodiésel al analizarse y evaluarse teóricamente, teniendo una producción de 156.31 mg/L, mientras que en aguas enriquecidas y medios de cultivo fue de 85.20 mg/L y 49.21 mg/L. Además, la microalga se adaptó fácilmente y tuvo una disminución del DQO, fosfato y nitrato.

Ge et al. (2018), estudiaron el crecimiento y remediación de aguas residuales con *Chlorella vulgaris* en condiciones heterótrofas, autótrofas y mixotróficas el cual indicó que las condiciones mixotróficas tuvieron un mayor crecimiento de biomasa, también se analizó la alimentación con glicerol que resultó dando una mayor cantidad de biomasa al agregarlo en la última etapa de crecimiento exponencial, además se demostró un proceso integrado de autotrófico- mixotrófico y el agregado del glicerol como una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

Fal et al. (2021) analizaron la combinación del tratamiento de aguas residuales con la producción de biodiésel el cual resultaron con un alto potencial para la eliminación de nutrientes de aguas residuales y siendo un medio adecuado para el crecimiento de la microalga. Además, se comparó tipo de microalgas siendo la mayoría adecuados para la producción. En cuanto, al efluente fue clarificado, filtrado y esterilizado, la microalga tuvo una agitación de 145 rpm, 25 °C e iluminación continua de 6000 lx con lámparas fluorescentes por 26 d el cual se evaluó dos veces la densidad óptica a 680 nm en el espectrofotómetro, también indicaron que se puede combinar con el biosecuestro de CO₂ para tratamientos de efluentes gaseosos industriales.

Kaulodas et al. (2021), investigó la importancia de los factores bióticos, abióticos de la cepa de algas para su adecuada eficiencia en fitorremediación en aguas residuales, mencionaron los factores indispensables para la remediación como la intensidad de luz, temperatura, valor pH y CO₂ el cual la

agitación es un parámetro indispensable debido que genera una buena circulación y se tiene mejor exposición a la luz de la superficie. También se discutió los sistemas para el tratamiento de aguas residuales como abierto y cerrado, siendo el primero más accesible, por su diseño, operación y bajo costo de mantenimiento en especial para países en desarrollo, disminuyendo así la huella de carbono.

Mamoori et al. (2020), realizaron biorremediación de agua residuales de una planta de tratamiento en Irak, en el que se usó la *Chlorella vulgaris* el cual, se agregó en la proporción de 500 mL algas con 500 mL de agua residual por tres repeticiones teniendo en cuenta la muestra control y las réplicas, además cada dos días por un periodo de 14 d se midió la concentración de fosfato y nitrito. La absorción se midió con el espectrofotómetro a 540 nm a diario para obtener la densidad de las células. El resultado esperado fue eficaz donde la remoción de fósforo fue a 100 % mientras que nitratos fue 88.17 %, indicando que la *Chlorella vulgaris* es muy activa para tal tratamiento.

He et al. (2023), investigaron los efectos de la calidad de luz blanca, luz azul, luz roja y luz mixta azul/roja tipo LED en agua residual de acuicultura con la microalga *Chlorella sorokiniana*. Los resultados demostraron que diferentes tipos de luz influyen en su crecimiento, nutrientes, remoción y composición bioquímica, el cual la luz roja fomentó el uso del nitrógeno, crecimiento celular e incremento de la biomasa con alto contenido de lípidos, la luz azul promovió el uso de nitrógeno, producción del pigmento y disminución del DQO, la luz mixta removió con mayor efectividad el nitrógeno total y nitrato mientras que la luz blanca tuvo alta productividad de la biomasa, ácidos grasos y alta remoción en los fosfatos ,con ello concluyeron en una estrategia más sostenible para la producción de microalgas en la eliminación de nutrientes en aguas residuales.

Hashmi et al. (2025), evaluaron diferentes colores de luz que afectaron el crecimiento de la microalga y la eficiencia de un sistema de filtración por membrana para la cosecha de biomasa. Los resultados mostraron que el cultivo en aguas residuales promovió el crecimiento de la microalga siendo la luz roja la que produjo mayor crecimiento, además contribuyó al tratamiento de las aguas residuales al reducir la concentración de nutrientes como el 100 % de nitrógeno, 98.77 % de fósforo y 77.21 % de DQO en el día 15. Seguido de la luz azul con alta efectividad del proceso y de manera moderada la luz blanca y violeta.

Coronado-Reyes et al. (2020), en la presente investigación realizaron una revisión sobre el estudio de la microalga *Chlorella vulgaris* en cual describe la morfología y su característica mixotrófica ya que tiene la capacidad de crecer en energía absorbida de luz o fuentes de carbono, también indican los factores principales para su desarrollo como la intensidad de luz, temperatura, pH, CO₂, así como las aplicaciones que se tiene en la actualidad como la producción de biodiesel ,que se encuentra entre un (20-50) % del peso seco de biomasa, sin embargo por su alto costo es una buena opción utilizarlo en conjunto con el tratamiento de aguas residuales, ante ello ,las microalgas tienen una buena adaptabilidad

así como remoción de metales durante 7 d, por lo tanto la *Chlorella vulgaris* es óptima ya que tiene un metabolismo diverso y muy adaptable ante cualquier medio de cultivo.

Aguilar (2022), estudio el uso de la microalga *Chlorella vulgaris* en aguas residuales municipales en un biorreactor, analizando su crecimiento por 17 días, evaluando la temperatura y pH, además se evaluó tanto al inicio como al final los contaminantes DQO, DBO, fosfatos, nitratos y metales pesados, donde se obtuvieron resultados positivos como en la remoción de DBO y fosfatos. A diferencia del DQO que presentó un aumento debido a que las microalgas iniciaron la fase de muerte celular y a la vez se produjo la respiración endógena por parte de las bacterias, mientras que el aumento de nitrato se debió a la competencia entre las bacterias nitrificantes y las microalgas por el nitrógeno en forma de amonio. Donde se concluyó que la microalga si puede llegar a biorremediar aguas residuales municipales.

Martínez de la Cruz et al. (2022), evaluaron el crecimiento de la *Chlorella vulgaris* a partir de diferentes tipos de luz como blanca ,azul, violeta y roja para ello se utilizó cuatro botellas de PET como foto biorreactores con dos bombas de aire para la agitación, 5 Barras LED en la parte trasera y 5 en la delantera, en los lados se utilizaron 3 lámparas fluorescentes de 1.3 W de 0.55 M de largo, distribuidas de manera horizontal, con la finalidad de obtener $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y fotoperiodos de 12:12 h. El cual se monitoreo la densidad celular cada 24 h. Como resultado, obtuvieron valores similares, no se observó algún daño por la fotoinhibición de la intensidad lumínica propuesta y finalmente se obtiene que el espectro de luz blanca es el más óptimo para la producción de biomasa microalgal para que posteriormente se puedan elaborar otros productos de importancia como lípidos.

Cebrian (2015), demostró que las especies de microalgas tienen un factor que diferencia las condiciones de cultivo más que otros, como es la luz que mejora el crecimiento, desarrollo y producción de la biomasa. Por lo que, evaluó la especie *Scenedesmus sp*, la cual fue expuesta a diferentes radiaciones LED de emisión en blanco, azul, rojo y un tratamiento control en cajas de madera que constituían una unidad de cultivo. De los cuales se tomó muestra todos los días la producción de biomasa, densidad celular y velocidad de crecimiento de la microalga. Las muestras se tomaron con ayuda de un espectrofotómetro. Dando como resultado, que la luz roja aumento la producción de biomasa, con la luz azul mostró mayor densidad celular y el tratamiento control más peso celular. Dando como conclusión que una mezcla de diferentes tipos de longitud de onda en diferentes fases del crecimiento de la microalga elegida puede conseguir buenos resultados.

Rodríguez (2017), realizó una comparación de métodos de extracción de aceite de la microalga, entre ellos (etanol-hexano por acidificación, etanol-hexano por ultrasonido y método Bligh & Dyer) presentaron alto grado de rendimiento con etanol/hexano por ultrasonido con 17.38 % a comparación de los otros métodos. Considerando factores importantes como el tiempo de maceración y temperatura

lo cual influyó en la extracción de lípidos. También se recalcó el uso de carbón activado para la eliminación de la clorofila y otros contaminantes de la microalga, para luego ser filtrado.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Aguas residuales

El agua residual presenta compuestos contaminantes, entre ellos materia orgánica, sólidos en suspensión, compuestos inorgánicos y/o xenobióticos. Por ello, existe la necesidad de inversión y mejora en los procesos de recogida, tratamiento y eliminación de aguas residuales (García et al., 2015).

A. Aguas residuales municipales

Las aguas residuales son derivadas de la actividad humana, como alimentos, limpieza, lavado de ropa y de servicios higiénicos presentan coloración amarilla al pasar por el proceso de fermentación son de color gris. Principalmente se componen de nitrógeno, ácido fosfórico y también presenta compuestos inorgánicos como tierra, papel, etc (López, 2019).

B. Caracterización de aguas residuales municipales

Es el principal contribuyente a la contaminación del agua ya que generan graves peligros para el medio ambiente y la salud de las personas. Principalmente contiene microorganismos, nutrientes orgánicos e inorgánicos, metales pesados entre otros (Tripathi et al., 2019).

Se categorizan por ser una mezcla de efluentes industriales (5-20) % y efluentes domésticos (80-95) %. Tanto los elementos orgánicos, inorgánicos y artificiales son los principales compuestos de aguas residuales. Gran parte contiene materiales orgánicos como nitratos, fosfatos, DBO y DQO. Mientras que en el inorgánico está el cobre, mercurio, zinc, cromo, amonio, magnesio, calcio y metales pesados. (Aguilar, 2022)

C. Nutrientes contenidos en aguas residuales

Los principales nutrientes de aguas residuales son el nitrógeno que si se realiza un tratamiento por lodos activos se transforma en amoniacal orgánico mientras, que por aireación se tiene nitratos que son fáciles de asimilar por las plantas, con ello, permite un mejor desarrollo de los ecosistemas acuáticos y no son altamente contaminados. Principalmente proviene de la descarga de inodoros y el agua de lluvia. Mientras que el fósforo también deriva de los lodos fecales que queda retenido en el suelo, por el proceso de sedimentación una de las ventajas de tratar el fósforo es que se puede eliminar en su totalidad mediante la precipitación/cristalización. (Rivadiavia, 2019)

D. Impacto ambiental de aguas residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales se han establecido como la fuente potencial de estos gases de efecto invernadero, por lo tanto, es causa directa del cambio climático y la contaminación del aire. El carbono orgánico, presente en las aguas residuales, tiene un mecanismo que consiste en que se oxida directamente a CO₂ y se incorpora a la biomasa mediante la purificación biológica. (Iasimone et al., 2017)

El principal impacto del efluente de las PTAR es que frecuentemente afecta a aguas receptoras con el alto contenido de nutrientes. Aunque se asuma que las PTAR están reguladas en la descarga y no contribuyan significativamente a las cargas de contaminantes, sin embargo, no es tan cierto para los nutrientes. Diversos sistemas acuáticos tienen concentraciones menores de nutrientes generando que pequeños cambios en la carga de nutrientes pueden ser perjudiciales en la estructura de la comunidad acuática. (Ménesguen et al., 2018)

2.2.2. Tratamiento de aguas residuales

A. Descripción de la PTAR

La PTAR La Escalerilla se encarga del tratamiento de aguas residuales recolectadas del sector del Cono Norte de Arequipa Metropolitana, ubicado en los distritos de Cerro Colorado y Yura. Se encuentra ubicada en las coordenadas 219,728.76 E y 8'189,082.24 N (punto de inicio del Emisor Cono Norte) y 219 125.74 E y 8'188,306.97 N (salida del efluente tratado de la PTAR escalerilla). La superficie disponible para la implantación de la planta de tratamiento dispone de una superficie de 5 ha.

Con el fin de la disminución de la contaminación de las aguas del río Chili, ya que dichas aguas ocasionan problemas de salud en la población expuesta al uso de las mismas, así como un deterioro del medio ambiente y pérdidas económicas para los agricultores por no cumplir con estándares de calidad ambiental para uso de riego. (Apaza et al., 2020)

Como se muestra en el Anexo 1 la PTAR La Escalerilla cuenta con un sistema avanzado en su proceso de desinfección, mediante filtración y ultravioleta. Asimismo, para el secado de los biosólidos provenientes de lodos residuales, cuenta con un secador térmico solar que permiten un secado óptimo para su reaprovechamiento, en fines agrícolas y almacenamiento. lo que implica la creación de microorganismos que se encargan de la descontaminación de las aguas sin aplicación de químicos.

B. Tratamiento preliminar

El principal objetivo de esta etapa es separar los residuos sólidos por lo cual son operaciones físicas entre los más conocidos son el filtrado, trampa de grasas, desbase y desarenadores. Dos bombas de extracción de arena, que conduce ésta a un clasificador de arena común para ambas líneas. Canal de extracción de grasas que comunica con un separador de grasas común para ambas líneas. Se ejecuta esta etapa porque esos materiales de gran tamaño generar problemas de operación y mantenimiento a los equipos y/o tecnologías implementadas en las posteriores etapas. (López, 2019)

C. Tratamiento secundario

Se elimina principalmente la materia orgánica, para ello se realiza un proceso de oxidación biológica y luego la sedimentación, entre las estructuras más usadas son filtros de arena, percoladores, estanques de fangos activos o lagunas de estabilización con aireación prolongada. El proceso biológico consta de utilizar bacterias aeróbicas el cual debe pasar por el tanque de aireación donde se da la degradación de materia orgánica y luego pasa a un segundo tanque de sedimentación y por último se da la descarga para seguir el tratamiento terciario. (López, 2019)

D. Tratamiento terciario

El objetivo del proceso es eliminar todos los iones orgánicos y residual de manera biológica o químicamente. Otros tratamientos como la precipitación química, ozonización, ósmosis inversa o adsorción de carbono incluyen procesos diseñados para eliminar nutrientes particulares, como el fósforo y/o nitrógeno, que generan la eutrofización. Se da una desinfección en canal por ultravioleta. El tratamiento terciario biológico da mejores resultados en comparación con los químicos que mayormente son costosos y que también conducen a una contaminación secundaria. (Abdel-Raouf et al., 2012)

2.2.3. Microalgas

A. Características de la microalga

Las microalgas poseen múltiples capacidades biotecnológicas, entre las que destaca la eficiencia fotosintética diez veces mayor a la de las plantas. Son capaces de eliminar diversos nutrientes presentes en aguas residuales lo que las convierte en organismos altamente eficaces para procesos de biorremediación. Además, presentan una notable versatilidad metabólica, ya que pueden desarrollarse bajo modos fotoautótrofos, mixotrófico y heterotrófico. Donde en condiciones fotoautótrofas requieren de menor energía para su crecimiento y son de gran

adaptabilidad para crecer en condiciones extremas. También tienen la capacidad de fijación de CO_2 en el proceso de la fotosíntesis, contribuyendo a su mitigación. A partir de su biomasa, es posible obtener compuestos de alto valor agregado de origen biológico incluyendo biohidrógeno, biohidrocarburos, bioalcoholes y otros. (Abdelfattah et al., 2023)

Es por eso que las microalgas, son ideales para ejercer el doble beneficio, es decir son aptas para el tratamiento de las aguas residuales y producción de biomasa mediante la conversión de nutrientes de biomasa y lípidos. Las algas tienen capacidades bactericidas que consiste en reducir la proliferación de bacterias. Por ello, los sistemas de algas se emplean en el proceso terciario del tratamiento de aguas residuales. (Rawat et al., 2011)

B. Cultivo de microalgas

El cultivo de microalgas en aguas residuales puede realizarse mediante sistemas abiertos o cerrados. Los sistemas abiertos, como los estanques de baja profundidad, son más económicos y operativamente sencillos; sin embargo, presentan una mayor susceptibilidad a la contaminación por agentes externos. En contraste, los sistemas cerrados, como los fotobiorreactores, permiten un control más preciso de variables clave para el desarrollo de las microalgas, tales como la temperatura y la intensidad lumínica, lo cual favorece su crecimiento. No obstante, estos sistemas implican mayores costos asociados a su instalación y operación. (Aguilar, 2022)

Hay beneficios de cultivar algas en las aguas residuales, ya que absorbe nutrientes y reduce así el costo del tratamiento. También, asimila carbono orgánico para producir su biomasa, para luego producir biodiesel. Es una de las formas más factibles de reducir el costo económico y ambiental. (Ahmad et al., 2013)

C. Parámetros de cultivo

- Temperatura

La temperatura es un factor importante para el crecimiento de la microalga y la fitorremediación, se conoce que el rango óptimo es entre $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ mayormente en sistemas cerrados aumenta la temperatura llegando algunas veces hasta los $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ generando mayores costos para estabilizar en sistemas abiertos puede ocasionar evaporación. De la misma manera puede ser perjudicial en temperaturas bajas ya que genera la fotoinhibición por estrés al frío generando que se disminuya la absorción de los nutrientes, por ello es necesario monitorear la temperatura de los procesos de fitorremediación. (Kaulodas et al., 2021)

- pH

El pH óptimo para el crecimiento de microalgas es de 7 a 9 sin embargo, el pH puede aumentar por la acumulación de CO_2 , causando la muerte de virus, bacterias y microalgas afectando el crecimiento de algas y tratamientos posteriores. Este parámetro es de gran importancia debido a que ayuda en la regulación y estimula una mayor producción de biomasa. (Kaulodas et al., 2021)

- CO_2

Las microalgas necesitan de CO_2 para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, para ello la principal fuente son las bacterias que descomponen los nutrientes de aguas residuales por respiración aeróbica para liberar CO_2 y este es utilizado para el crecimiento de microalgas. El agregado de CO_2 también favorece a la mayor producción de biomasa algal entre ellos puede ser HCO_3 que asimila este compuesto las algas y libera CO_2 dándose que aumente el crecimiento de las microalgas. La agitación del agua y el pH también genera CO_2 por ello, es fundamental su uso. (Kaulodas et al., 2021)

D. Influencia de la luz en la calidad del crecimiento de cultivos de microalgas

La vida en la tierra depende en gran medida de organismos autótrofos fotosintéticos, capaces de convertir la energía lumínica en biomasa, mediante procesos que promueven el crecimiento celular, la síntesis de compuestos bioquímicos y la acumulación de lípidos. Durante la fase luminosa de la fotosíntesis, las microalgas utilizan la luz para descomponer el agua en oxígeno, protones y electrones (Liu et al., 2024). Por ende, la luz es reconocida como el factor con mayor importancia durante el cultivo de microalgas, esta puede ser naturales o artificiales de las cuales la luz solar presenta deficiencias, variaciones diarias, estacionales, en función del tiempo atmosférico, además no se puede controlar algunas de sus características como el fotoperiodo, longitud de onda, su intensidad de luz entre otros, que influyen en la producción de biomasa y contenido intracelular, el contenido de pigmento, la cantidad de proteína y la cantidad de lípidos en las microalgas (Centeno, 2021; Martínez de la Cruz et al., 2022). Siendo las luces LED que pueden contribuir a una producción continua de energía lumínica. El inconveniente del control de la luz es que no contempla un único parámetro, debido a las intensidades, frecuencia de cambio luz-oscuridad, proporción de duración de los ciclos, hidrodinámica. (Martínez de la Cruz et al., 2022)

Por lo que actualmente, la luz artificial tipo LED son la que presentan ciertas ventajas sobre otras fuentes de luz, como emitir una longitud de onda única con muy baja dispersión, son de pequeño tamaño, larga duración, poseen una alta eficiencia de conversión de electricidad, producen menor radiación de calor, poseen una mayor vida útil que la luz convencional, tiene

un bajo consumo energético y la luz es proyectada a la microalga directamente debido a su ángulo de emisión menor a 180 °C. (Fuentes, 2019; Centeno, 2021)

Además, diferentes estudios han evaluado que hay longitudes de onda óptimas para cada tipo de especies de microalgas, aunque se han obtenido resultados contradictorios sobre las diferentes longitudes de onda de LED en el crecimiento de microalgas. Mientras que un tipo de luz roja es más efectiva para una microalga, la luz azul puede ser mejor para especie de microalga. (Kim et al., 2014)

E. Espectro de absorción

Las longitudes de onda específicas de la luz son absorbidas por los pigmentos fotosintéticos presentes en las microalgas, particularmente la clorofila. Estos pigmentos son fundamentales para la captura de energía lumínica durante el proceso de fotosíntesis. La clorofila-a, considerada el principal pigmento fotosintético, evidencia dos picos de alta eficiencia en la absorción de luz: uno en la región del espectro correspondiente a la luz azul y otro en la región del rojo. En contraste, la clorofila-b, que actúa como pigmento accesorio, presenta una absorción significativa en la región azul y en la región del rojo anaranjado. Como resultado, el espectro de absorción total de los organismos fotosintéticos como las microalgas se caracteriza por presentar dos zonas claramente marcadas de mayor absorción, ubicadas en los extremos azul y rojo del espectro de luz visible. Esta propiedad justifica el uso de fuentes de iluminación con estas características espectrales como luces LED rojas y azules en sistemas de cultivo artificial, para potenciar tanto el crecimiento celular como la producción de biomasa. (Smerj I., 2023)

F. Crecimiento de las microalgas

Compone de cinco etapas ,la primera es llamada la fase adaptación del metabolismo celular a las condiciones del cultivo y está caracterizado por bajos incrementos en la densidad celular, luego se produce una rápida y constante división celular donde el crecimiento se da de forma exponencial sin ningún tipo de factor limitante para la multiplicación celular, esta se llama la fase exponencial, luego el crecimiento poblacional continua pero es menor ya que hay poca disponibilidad de factores como nutrientes, teniendo así una fase de declinación de la fase anterior, dando origen a la fase estacionaria donde la natalidad producida es igual a la mortalidad, provocando que las densidades no tengan cambios relevantes y por último se tiene la fase de mortandad que libera sustancias inhibitorias que genera el final del cultivo. (Salgueiro, 2018)

G. Valoración energética de microalgas

Las microalgas almacenan carbohidratos, lípidos y proteínas (Pérez et al., 2019). Además, su alto contenido de aceite y una alta eficiencia de conversión fotosintética son un beneficio para su valoración energética. Así como otras ventajas que son su tasa de crecimiento altas y cortos tiempos de generación; requisitos mínimos de tierra; alto contenido de lípidos y ácidos grasos; el uso de agua residual como fuente de nutrientes y/o captura de CO₂ desde fuentes contaminantes. (Hernández-Pérez, 2014)

2.2.4. Remediación de agua residual municipal con microalgas

En las aguas residuales municipales se encuentran gran cantidad de contaminantes, lo que produce que aparezcan diversos tipos de microorganismos pueden afectar a la salud de las personas (Muñoz et al., 2011). Para este problema se ha dado diferentes tipos de soluciones, uno de ellos, es el uso de microalgas con cultivos monoespecíficos o consorcios, utilizándose, así como una alternativa para la biorremediación, con diferentes tipos de microalgas evaluadas en diferentes lugares del mundo, removiendo nutrientes para el tratamiento de aguas residuales mejorando la calidad del agua para las personas. (Cervantes et al., 2021)

Las ventajas que poseen las microalgas son su adaptabilidad a diferentes tipos de aguas residuales, la eliminación de contaminantes utilizando diferentes tipos de materia orgánica como reduciendo DQO y DBO de la remediación con microalgas es la remoción de sales como: nitratos y fosfatos, con un crecimiento adecuado el aumento de pH, favorece la precipitación de ortofosfatos y la eliminación de nitrógeno amoniacal por efecto de intercambio gaseoso, reducción del DQO y mejora de la oxidación de materia orgánica, reduciendo la sobrevivencia de organismos patógenos. Otra ventaja de las microalgas en cultivos de aguas residuales municipales es la velocidad de crecimiento que tienen en el agua, así como su capacidad de captura de CO₂ en su proceso fotosintético. (Vellaiyan, 2024)

Por lo que se ha demostrado que las microalgas se pueden desarrollar de manera eficiente en medio de las aguas residuales, debido que estas aguas contienen grandes cantidades de nutrientes que sirven para su crecimiento como el nitrógeno y el fósforo. Sin embargo, se debe tener en cuenta algunas características específicas del tipo de microalgas, primero que la tasa de crecimiento sea rápido, segundo la capacidad de eliminar los nutrientes, tercero la capacidad de adaptabilidad en distintas condiciones ambientales, por último, la alta productividad de su biomasa. (Aguilar, 2022)

2.2.5. *Chlorella vulgaris*

A. Características de la *Chlorella vulgaris*

Clasificación científica:

- Dominio: Eukaryota
- Reino: Protista
- División: Chlorophyta
- Clase: *Trebouxiophyceae*
- Orden: *Chlorella*
- Familia: *Chlorella*
- Género: *Chlorella vulgaris*

Las microalgas pueden crecer tanto en agua dulce como marina, *Chlorella vulgaris* en la etapa madura, el grosor y la composición de su pared celular no son constantes porque pueden cambiar según las diferentes condiciones ambientales y de crecimiento (Safi et al., 2014). Tiene una morfología de una célula microscópica esférica con (2–10) μm de diámetro con una vida celular o colonial, la principal sustancia de reserva es el almidón, pero bajo ciertas condiciones pueden almacenar aceite (Merma et al., 2017).

Presentan un crecimiento autótrofo o heterótrofo, incluso tienen la capacidad de un crecimiento mixotrófico que es capaz de combinar tanto autótrofos como, técnicas heterótrofas realizando también la fotosíntesis o ingerir materiales orgánicos.

Las microalgas pueden crecer tanto en agua dulce como marina, así como en el contenido total de proteínas en *C. vulgaris* madura representa del (42 al 58) % del peso seco de la biomasa y varía según las condiciones de crecimiento, también puede alcanzar el (5–40) % lípidos por peso seco de biomasa, teniendo el potencial de acumular altas cantidades de lípidos, especialmente mientras se cultiva en condiciones mixotróficas. (Safi et al., 2014)

2.2.6. Relación microalga – bacteria

En las aguas residuales la interacción microalga bacteria presenta beneficios para la eliminación de nutrientes debido que se tiene un vínculo importante que consiste en la liberación de oxígeno fotosintético de las algas que es esencial para el crecimiento de bacterias y de igual manera la liberación de CO_2 por medio de las bacterias que son asimiladas por las microalgas, por lo cual incrementa la producción de biomasa. Además, las microalgas tienen la capacidad de sintetizar compuestos complejos a compuestos de bajo peso molecular, por lo cual es una ventaja para las

bacterias ya que lo necesitan para su desarrollo. Esta asociación genera mayor asimilación de nutrientes como el nitrógeno y fósforo, resultando que la biomasa sea eficiente para su reaprovechamiento. (Amin et al., 2022)

2.2.7. Relación microalga- hongo

La interacción microalga –hongos presenta ventajas para el tratamiento de aguas residuales ya que los hongos contienen enzimas que degradan compuestos macromoleculares y convierten en compuestos de bajo peso molecular que son ideales para las células fúngicas, este proceso se da mediante el oxígeno que es liberado por la microalga, de tal manera que beneficia que los hongos sintetizan la materia orgánica en CO_2 y luego este es consumido por las microalgas para su crecimiento y desarrollo. Es de gran ventaja para las microalgas porque el nitrógeno y fósforo se encuentran mayormente en sólidos suspendidos el cual no puede interactuar de manera directa en estos compuestos, por ello son necesarios las enzimas extracelulares fúngicas. Además, los hongos en sus células contienen filamentos que son de gran ayuda al momento de la recolección de la biomasa microalgal, ya que con la interacción micelar pueden incapacitar a las microalgas para su recolección. (Amin et al., 2022)

2.2.8. Eliminación de nutrientes

Los nutrientes principales que deben absorber las microalgas son el nitrógeno y fósforo que están dentro de la materia orgánica del agua residual. Depende de la concentración y proporción de nutrientes y metabolitos pueden afectar al tratamiento de aguas y el crecimiento microalgal. Por ello, el fósforo es indispensable para la formación de ácidos nucleicos y fosfolípidos, mientras que el nitrógeno se une a las proteínas en la célula de la microalga. Esta relación N/P afecta directamente a la absorción de nutrientes. Según estudios las aguas residuales sin tratar el N y P está entre (10-100) mg/L. (Kaulodas et al., 2021)

2.2.9. Reducción del DQO

Es esencial reducir el nivel de DQO ya que al tener valores elevados disminuye el nivel de oxígeno de los cuerpos de agua por ende se elimina la vida en el medio acuático. Por ello, las microalgas producen oxígeno a través del proceso de fotosíntesis que realizan, causando la disminución de DQO. Las microalgas son capaces de sintetizar compuestos orgánicos ya que pueden biodegradar

en condiciones de fuentes de carbono, así como también la misma agua residual, contiene alto contenido de carbono, siendo de beneficio para el crecimiento microalgal. (Kaulodas et al., 2021)

2.2.10. Método de extracción de lípidos

De acuerdo a la búsqueda bibliográfica se tiene gran variedad de métodos para extracción de aceites utilizando una diversidad de solventes debido a la alta solubilidad de los lípidos que presentan en ambos, entre ellos está el cloroformo, metanol, hexano, acetona, etanol, entre otros. Así como también diversos protocolos de extracción siendo el más eficiente el de Bligh & Dyer aunque destacando de manera convencional el sistema soxhlet. Sin embargo, en la actualidad se presenta modificaciones con la finalidad de una mejora en la eficiencia de la experimentación por ello se acompaña la extracción mediante ultrasonido que se detalla a continuación. (Pérez & Quishpi, 2014)

A. El método Bligh & Dyer

Proviene de la modificación del método Folch dada en 1959 por Bligh & Dyer. El método consiste en la mezcla de la biomasa de microalga a alta velocidad con una combinación de solventes polares metanol y cloroformo en una proporción de 2:1, luego es llevado a realizar filtración, centrifugación y evaporación obteniendo el aceite extraído. De acuerdo a varias investigaciones se ha obtenido buenos resultados en extracción de lípidos, siendo el más óptimo en cuanto por la reducción del uso de solvente. (Pérez & Quishpi, 2014; Salgueiro, 2018)

B. Extracción asistida por ultrasonido

La técnica por ultrasonido tiene muchas ventajas principalmente por el tiempo de reacción debido que presentan un sonido de alta frecuencia que oscilan de (20 a 100) kHz, generando una cavitación acústica para la lisis celular, es decir, emite ondas provocando alteración celular, esto se debe a la formación de burbujas microscópicas que se expanden y colapsan rompiendo la membrana celular de las microalgas, por ello esta técnica es eficiente en dañar las partes estructurales de la microalga para extraer lípidos. (Salgueiro, 2018; Krishnamoorthy et al., 2023)

2.2.11. Biodiésel

El biodiésel es un combustible biodegradable de origen animal o vegetal obtenido a partir de aceites y grasas a través del proceso químico obtenido por la transesterificación, constituyendo así un compuesto monoalquil éster de ácidos grasos. La condición de renovable del biodiésel, viene dada

por el origen de la materia prima que se use para su producción. Estas materias primas están compuestas por (90-98) % de triglicéridos, mono y diglicéridos, ácidos grasos libres (1- 5) %, y cantidades residuales de fosfolípidos, fosfátidos, carotenos, tocoferoles, compuestos de azufre y trazas de agua. (Arce, 2018; Bozbas, 2008)

El biodiésel es una alternativa limpia que no deja residuos tóxicos ni peligrosos y contiene oxígeno en su estructura química, por ende, se categoriza una alternativa sustentable con el medio ambiente. Este proceso natural promueve la combustión completa, lo que reduce las emisiones de monóxido de carbono (CO) en los motores de los automóviles. Estos beneficios llevan a que el biodiesel que se produce bajo los estándares óptimos tome un papel importante como energía limpia, a diferencia del diésel, no genera contaminantes. (Castellanos et al., 2018)

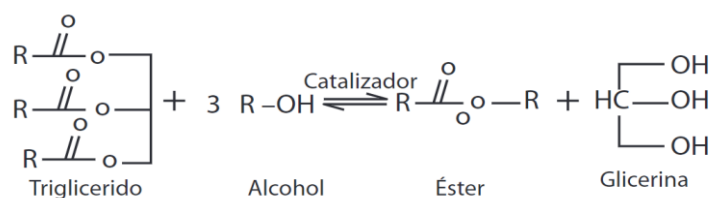
2.2.12. Producción de biodiésel

- Transesterificación

La transesterificación es la reacción química que se da durante la producción de biodiésel, donde 1 mol de triglicéridos reacciona con tres moles de alcohol para formar un mol de glicerol y tres moles de alquilesteres, en una secuencia de tres reacciones reversibles donde los triglicéridos son convertidos a glicerol como se expone en la Figura 1. Esta reacción requiere la presencia de un catalizador alcóxido, con una concentración sumamente baja que no influye en la eficiencia de la esterificación. Posterior a la reacción de transesterificación se realiza la separación del biodiésel o ésteres y la glicerina que son inmiscibles y se desplazan en dos fases por decantación o centrifugación. Los productos de la reacción que se generan son los ésteres de los ácidos grasos con el alcohol de bajo peso molecular biodiesel y la glicerina. Una vez se obtienen estos productos se lleva a cabo el proceso de separación, neutralización y lavado. (Castellanos et al., 2018; Merma, 2017)

Figura 1

Reacción de transesterificación



Nota. Castellanos et al., (2018)

2.2.13. Potencial de las microalgas para producción de biodiésel

Las microalgas son una fuente de alternativa para producción de biodiésel debido a la alta tasa de crecimiento sin competir por la tierra cultivable, lo que convierte a las algas en una materia prima interesante para el campo de los biocombustibles. Además, tiene el potencial de producir más aceite en comparación con otras materias primas como la colza, la soja, girasol y palma. Por ende, el biodiésel de microalgas no es tóxico, es altamente biodegradable; no contienen azufre y los materiales sobrantes después de extraer el aceite se pueden utilizar para la producción de etanol o como fertilizante del suelo. (Quishpi et al., 2014)

En comparación con el diésel de petróleo, el diésel de microalgas tiene una reducción de hasta un 78 % en emisión de CO₂. Por último, es económica y tecnológicamente mejor que la producción de biodiésel a partir de muchas especies vegetales terrestres por requerir menor superficie terrestre para obtener mayor biomasa. (Hernández-Pérez, 2014)

2.3. Marco Legal

- Ley N° 29338: Ley de Recursos hídricos
- D.S. N° 001-2010-AG: Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos
- RM N° 273-2013-VIVIENDA: Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.
- D.S. N° 003-2010-MINAM: “Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales”.



CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo debido que describe los resultados y explica las variables las cuales pueden ser controladas que influyen para la remoción de nutrientes de aguas residuales y la obtención simultánea de biodiésel. Cabe resaltar que esta investigación busca explicar la hipótesis, en la que se pueda dar una relación entre remoción de nutrientes y producción de biodiésel a partir de la microalga *Chlorella vulgaris* Además, el diseño de la investigación es experimental. Por último, el desarrollo de la investigación, es considerada de nivel explicativo, ya que presenta una variable independiente y dependiente. (Kaulodas et al., 2021)

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental, el cual se trabajó con variable independiente y dependiente. Donde se usó la medición de DQO, que fue ejecutado mediante un diseño completamente al azar (DCA) debido que consta de comparar dos o más tratamientos, puesto que sólo considera dos fuentes de variabilidad. Donde el factor de tratamiento continuo con el tipo de luz y de igual manera se realizó por cuadruplicado.

Además, se determinó las diferencias estadísticamente significativas entre los conjuntos de datos utilizando la prueba Kruskal-Wallis. Finalmente, para poder conocer diferencias estadísticas entre los tratamientos se procedió a aplicar la prueba de Fisher. Todos los procedimientos se dieron mediante el software MINITAB.

3.2.1. Unidad de Análisis

Se estudió a la microalga *Chlorella vulgaris*, aplicando el efecto del color de luz sobre su producción de biomasa asociado al tratamiento de aguas residuales como medio de cultivo proveniente de la PTAR La Escalerilla y subsecuente producción de biodiesel como alternativa de economía circular.

3.2.2. Población de estudio

En la presente investigación, la población representa el agua residual doméstica proveniente de la PTAR La Escalerilla para la evaluación del efecto del color de luz sobre la producción de biomasa

de la *Chlorella vulgaris* asociado al tratamiento de aguas residuales como medio de cultivo y subsecuente producción de biodiesel como alternativa de economía circular.

3.2.3. Tamaño de la muestra

El muestreo del efluente fue tomado de forma aleatoria en la Planta de Tratamiento de Agua Residual La Escalerilla– Arequipa. Se consideró a partir de un muestreo probabilístico del tipo de muestreo aleatorio simple con la finalidad de seleccionar elementos de la población que tenga la misma probabilidad de formar parte de la muestra. Este tipo de muestreo consiste en la recolección de una sola vez en un determinado tiempo y lugar. En total se recolectó 80 L de agua debido a la metodología aplicada dándose 20 L para las pruebas en frascos de 1L, luego para él envió de muestras al laboratorio acreditado con 10 L, posteriormente 40 L para el escalamiento a 10 L y por último 10 L adicional para pruebas preliminares. Cabe precisar que se optó por el muestreo aleatorio simple por ser más rentable y de corto tiempo.

3.2.4. Selección de la muestra

Para la recolección de muestra se tuvo en cuenta los factores climáticos por consiguiente la toma de muestra se realizó en temporada seca en el mes de julio a las 9 a.m. que representa una condición estable y promedio del efluente. La muestra del agua residual fue recolectada a la salida del pre tratamiento teniendo en cuenta, que se tenga un flujo constante y velocidad del paso del agua residual hacia la siguiente etapa del tratamiento. Además, se tomó en referencia del punto de muestreo utilizado por parte de la empresa a cargo ya que realizan tomas de muestra para su registro continuo referente a la evaluación de la calidad del agua residual. La Figura 14 y Figura 15 presentan las instalaciones de la PTAR, mientras que en la Figura 16 y Figura 17 se aprecia el proceso de toma de muestras de agua residual.

3.2.5. Materiales y equipos

A. Materiales

Para la elaboración del proyecto se emplearon los materiales, reactivos y equipos detallados a continuación:

- Reactivos

Los reactivos utilizados para la realización de los experimentos y análisis de muestras son:

- ✓ Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$
- ✓ Metanol (CH_3OH)
- ✓ Cloroformo ($CHCl_3$)
- ✓ Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
- ✓ Solución digestora
- ✓ Carbón activado

- Equipos

Los equipos utilizados para la realización de los experimentos y análisis de muestras se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2

Equipos utilizados en la experimentación

Equipo	Modelo	Ilustración
Microscopio	LABOMET-LX400	
Autoclave	LFB-3741-2024	
Termómetro Digital	Termómetro de punzar F	
pH metro	JENWAY 3510	
Espectrofotómetro	ONDA UV-31 SCAN	

Digestor	Spesctroquant TR 420	
Centrífuga	Centrifuge PLC series	
Estufa	0494898 / J.P. SELECTA S.A.	
Balanza Analítica	ENTRIS224-1S / Sartorius Lab Instruments	
Baño Ultrasonido	DAIHAN – KR	
Agitador magnético	MS-H380-Pro	
Agitador Vortex	Vortex 2 IKA	
Destilador	GFL	





- Materiales de laboratorio

Los materiales utilizados para la realización de los experimentos y análisis de muestra se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3

Materiales utilizados en la experimentación

Material	Ilustración	Material	Ilustración
Botellas de vidrio		Bombas de Aire 4 L/min	
Bombas de Aire 20 L/min		Luces LED	
Micropipetas		Tubos Falcon	
Placa Petri		Mortero	
Beaker de vidrio (10 mL - 1 L)		Probeta (10 mL - 1 L)	

<p>Erlenmeyer (25-500) mL</p>		<p>Varilla</p> 
<p>Pastillas Magnéticas</p> 		<p>Papel Filtro</p> 

3.3. Método de la investigación

La metodología que se detalla a continuación, va de acuerdo a cada objetivo planteado.

3.3.1. Identificación del crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* en condiciones de laboratorio con agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.

A. Identificación y caracterización de la microalga *Chlorella vulgaris*

La muestra de *Chlorella vulgaris* se identificó en el laboratorio de la Universidad Católica de Santa María – Arequipa.

Se realizó la caracterización de la muestra inicial de la microalga en el microscopio a 40 X como se muestra en la Figura 4, el cual se hizo comparaciones con las descripciones explicadas en las fuentes bibliográficas elegidas, con la finalidad de una verificación exhaustiva para corroborar la identificación de la microalga a utilizar en la investigación. (Coronado-Reyes et al., 2020)

B. Selección de parámetros para el crecimiento de la microalga *Chlorella Vulgaris*

Mediante la revisión de tesis, artículos y otras investigaciones se recopiló información sobre las condiciones de cultivo de microalgas necesarias, primero los sistemas de cultivos ya sea del tipo abierto y/o cerrado, además de los parámetros que se estudiaron entre ellas la agitación, temperatura, tipo color de luz, pH entre otros los cuales son específicos para el crecimiento óptimo de diversas microalgas. (Kaulodas et al., 2021; Salgueiro, 2018)

La selección de parámetros se realizó según lo revisado para las condiciones específicas de la microalga *Chlorella vulgaris* de los cuales se tomó la temperatura de un rango de (20 – 30) °C, pH de 7 a 9, fotoperiodo a 24 h luz, aireación con bombas de aire y luz blanca. (Escalante & Vizcarra, 2019; Fal et al., 2021; Kalmorat et al., 2023)

Para promover una mayor proliferación de *Chlorella vulgaris* en condiciones controladas, se tomaron 35 mL del inóculo de cultivo puro fue transferido a un frasco de vidrio de 1 L de capacidad, para su crecimiento utilizando el medio de cultivo BBM (Medio Basal Bold) que presenta la siguiente composición en la Tabla 4. (Alazaiza et al., 2023)

Tabla 4

Composición química (g/L) del medio de cultivo (BBM)

Componentes químicos del Medio Basal de Bold (BBM)		
N°	Productos Químicos	g/L
1	NaNO ₃	25.00
2	MgSO ₄ . 7 H ₂ O	7.5
3	NaCl	2.5
4	K ₂ HPO ₄	7.5
5	KH ₂ PO ₄	17.50
6	CaCl ₂ . 2 H ₂ O	2.5
	Oligoelementos:	
	ZnSO ₄ .7 H ₂ O	4.42
	MnCl ₂ . 4 H ₂ O	1.44
7	MoO ₃	0.71
	CuSO ₄ . 5 H ₂ O	1.57
	Co(NO ₃) ₂ . 6 H ₂ O	0.49
8	H ₃ BO ₃	11.40
	EDTA-KOH solución:	
9	EDTA Na ₂	50.00

	KOH	31.00
10	FeSO ₄ · 7 NH ₂ O	4.98

Nota. Khan et al., (2018)

El cultivo se mantuvo a temperatura promedio de 25 °C, con aireación continua mediante bombas de aire y fotoperiodo de 24 h de luz.

- Diseño de Programa de monitoreo

En la etapa de tratamiento con agua residual se tomó en cuenta los parámetros fisicoquímicos los que indican en la normativa D.S. N° 003-2010-MINAM, Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, como otros ya que son de importancia para un análisis holístico de la experimentación por lo cual se presenta a continuación en la Tabla 5 el programa de monitoreo de cada parámetro:

Tabla 5

Programa de monitoreo

Parámetro	Unidad	Frecuencia
Temperatura	°C	Diario
pH	-	Diario
Coliformes Fecales (Termotolerantes)	NMP/100 mL	Inicial / Final
Coliformes Totales	NMP/100 mL	Inicial / Final
DBO	mg/L	Inicial / Final
Aceites y Grasas	mg/L	Inicial / Final
SST	mg/L	Inicial / Final
DQO	mg/L	Diario
Fósforo Total	mg/L	Inicial / Final
Nitrógeno Total	mg/L	Inicial / Final
Metales Totales	mg/L	Inicial / Final

Turbidez

NTU

Inicial / Final

C. Acondicionamiento del cultivo de la cepa de microalga *Chlorella vulgaris* con agua residual

La microalga *Chlorella vulgaris* fue inoculada con agua residual doméstica con el objetivo de promover una adaptación progresiva a las características del efluente. Al someter las microalgas a estas condiciones, se pudo evaluar su capacidad de resistencia y viabilidad ante posibles factores de estrés, tales como la presencia de la variabilidad en la calidad físico-química del agua (Salgueiro, 2018). Primeramente, se realizó la instalación de las condiciones de cultivo inicial como se mencionó anteriormente como se observa en la Figura 19. Luego, se utilizó para el conteo de crecimiento de la microalga, el método de cámara de recuento de Neubauer en el microscopio como se observa la Figura 18 con la finalidad de estimar la densidad de células con la siguiente Ecuación 1. (Gallego & Pérez, 2021; Martínez de la Cruz et al., 2022)

$$\text{Densidad} = \frac{\text{N}^\circ \text{de células contadas}}{\text{Superficie de conteo (mm}^2\text{)} * \text{Profundidad (mm)} * \text{Dilución}}$$

Ecuación (1)

Nota. Gallego & Pérez, (2021)

3.3.2. Determinación de las condiciones para el crecimiento y reducción del DQO por tipo de color de luz blanca, roja, azul y combinada (azul/roja) de la *Chlorella vulgaris* en muestras de agua residual doméstica de la PTAR Escalerilla de Arequipa.

A. Recolección del agua residual de la planta de tratamiento

Se recolectó la muestra de agua residual de la Planta de Tratamiento La Escalerilla de Arequipa como se muestra en la Figura 16 y Figura 17. Se extrajo 80 L el cual fue llevado al laboratorio para su respectivo tratamiento (Fal et al., 2021).

B. Análisis de la composición del agua residual de la PTAR La Escalerilla

Para el desarrollo de la actividad, una vez obtenido la muestra de agua residual después del pretratamiento en el punto de monitoreo según se presenta en el Anexo 2. Se llevó a cabo el análisis de la composición física y química, para ello se hizo una medición con el laboratorio de coliformes fecales, coliformes totales, DBO, DQO, aceites y grasas, sólidos totales disueltos, nitrógeno y fósforo; además de otros parámetros con un multiparámetro como turbidez, pH,

conductividad, oxígeno disuelto. Principalmente se realizó la medición del DQO debido que es el parámetro de mayor importancia para el desarrollo de la investigación. (Mamori et al., 2020; Admad et al., 2013)

C. Acondicionamiento de las condiciones de cultivo en el agua residual

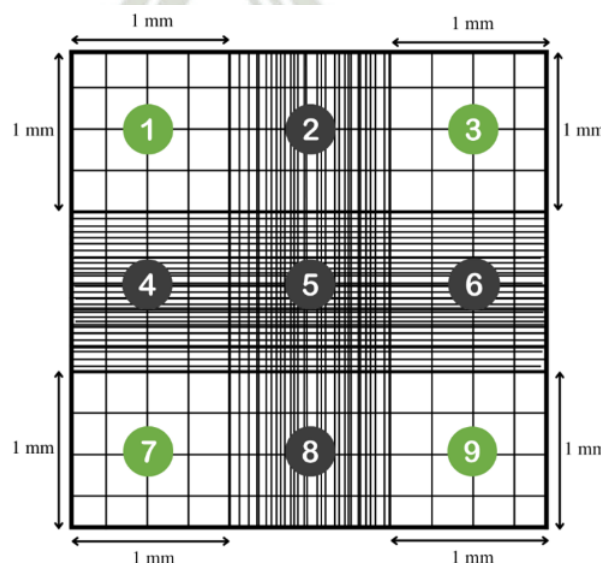
En esta actividad se utilizó 04 cajas de madera con una medida 35 cm de ancho, 35 cm de largo y 30 cm de alto forrados con aluminio en su interior. Luego se proporcionó una abertura en la parte superior de cada caja para la aireación y la extracción de las muestras, como se observa en la Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23. En cada caja se tuvo un tratamiento con diferentes colores de luz: blanca, roja, combinada, en el cual dentro de cada caja se tuvo 04 repeticiones para cada tratamiento, donde se colocaron bandas LED de 5 m de largo. Cada tratamiento se realizó con botellas de vidrio de 1 L que contenía agua residual de la PTAR La Escalerilla y la cepa *Chlorella vulgaris* como se muestra la Figura 24. (Salgueiro, 2018; Cebrián, 2015; He et al., 2023; Hashmi et al., 2024)

D. Medición de la concentración celular de la microalga *Chlorella vulgaris* y determinación de la concentración de DQO del agua residual

Para la concentración celular por método directo se usó la cámara de Neubauer, para el conteo celular en el microscopio. La cámara de Neubauer se caracteriza por dividirse en múltiples cuadrantes, siendo 9 cuadrantes los principales como se enumera en la Figura 2. Para realizar el conteo se contó las microalgas en el cuadrante 1, 3, 7 y 9. Asimismo, se leyó a 40 X para observar correctamente las microalgas.

Figura 2

Estructura de Cámara de Neubauer



Este procedimiento se realizó diariamente para observar las diferencias en las condiciones de su crecimiento para de este modo obtener la cinética de crecimiento específica del cultivo. (Salgueiro, 2018).

De igual manera se realizó la medición de la remoción de DQO del agua residual tratada con microalga *Chlorella vulgaris*, de manera diaria, para un mejor estudio. Para este análisis, estos valores se registraron por triplicado (López, 2019).

El análisis de DQO se llevó a cabo diariamente con el objetivo de monitorear el desarrollo de la *Chlorella vulgaris*. Para ello, las pruebas se realizaron en el laboratorio con el método de colorimétrico estándar (flujo cerrado) el cual consistió en extraer 1.25 mL de muestra en caso sea necesario se usó factor de dilución, 0.75 mL de solución digestora y 1.75 mL de ácido sulfúrico se colocó en tubos de ensayo de vidrio y luego se pasó por el vortex previamente rotulado como se muestra en la Figura 25. Para el blanco se usó 1.25 mL de agua desionizada o destilada. Además, se cebó el envase para usar la solución digestora. Luego se usó el equipo de digestor que debe calentarse hasta 150 °C por consiguiente se colocó las muestras en el digestor por 2 h el cual se colocó con mucho cuidado como se observa en la Figura 26. Una vez terminado se sacó las muestras para enfriar por 30 min. Como último paso, se midió en el espectrofotómetro mediante la absorbancia, como se observa en la Figura 27. La metodología se especifica en el Anexo 5.

El método utilizado para realizar en análisis de DQO de manera diaria se indica en la Tabla 6 a continuación:

Tabla 6

Método estándar de DQO

Tipo De Ensayo	Norma De Referencia	Nombre
DQO	SM 5220 D	Closed reflux, Colorimetric Method
SIGLAS: “SM” standard methods for the examination of water and wastewater		
<i>Nota.</i> APHA, AWWA, WEF, 22st Ed.2012, Analysis Handbook		

3.3.3. Evaluación de la eficiencia del efecto de luz utilizando la microalga *Chlorella vulgaris* a escala laboratorio de 10 L en la reducción de DQO en muestras de agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa

A. Escalamiento a 10 L de agua residual inoculado con *Chlorella vulgaris*

Luego se realizó un escalamiento a 10 L utilizando un reactor, como se muestra en la Figura 46 proporcionado por el laboratorio previa gestión con el asesor, una vez escogida el tipo de color de luz, se bordeó con tiras de LED y para una mejor concentración de la luz y se cubrió con cartulina forrada con papel aluminio. El biorreactor estuvo compuesto de material de vidrio grueso que tiene una tapa él fue sellado con pernos de varios orificios el cual tiene una tapa pequeña de plástico, una varilla para medir la temperatura y un desfogue para liberación y/o contención de emanación de olores. Para la aireación se utilizó un motor de bomba de aire el cual se conectó a la manguera transparente de 3 m y este se empalmó a una manguera difusora de aire con microporos que se puso en el fondo del reactor para la transferencia de oxígeno. Como siguiente paso se inoculó al 10 % es decir, se colocó 9 L de agua residual doméstica con 1 L de *Chlorella vulgaris* luego se tapó asegurando los pernos y por último para evitar el desborde de la espuma que era generaba por la aireación se aplicó 5 mL de antiespumante. (Salgueiro, 2018)

B. Determinación del crecimiento y la concentración de DQO del agua residual doméstica con *Chlorella vulgaris* en escala de 10 L

El tratamiento se evaluó por un lapso de dos semanas, de manera diaria se realizó el conteo de crecimiento celular mediante la cámara de Neubauer en microscopio y análisis de DQO mediante el método de colorimetría de flujo cerrado con el espectrofotómetro como indica en la Tabla 5. Se realizó con 3 repeticiones y por último se elaboraron las gráficas correspondientes. (López, 2019)

C. Comparación de la concentración de DQO antes y después del tratamiento con microalgas

Una vez obtenido los datos correspondientes, se determinó el porcentaje de remoción en relación al crecimiento celular, asimismo se envió muestras (ver Figura 30) de los demás parámetros al laboratorio acreditado para su procesamiento. Luego se calculó la concentración inicial de los nutrientes del agua residual y la concentración luego del tratamiento con la microalga mediante la siguiente fórmula:

Porcentaje de remoción

$$\%R = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} \right) \times 100$$

Ecuación (2)

Nota. López, (2019)

%R: Porcentaje de remoción del parámetro

Co: Concentración inicial del parámetro en el agua residual

C: Concentración del parámetro luego del tratamiento

3.3.4. Evaluación del uso de la biomasa de *Chlorella vulgaris* para la producción de biodiésel derivado del tratamiento del agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.

A. Separación de la microalga del agua residual

Para la separación, se aplicó el método de floculación química debido a que a pesar de los bajos costos que tienen otros métodos como la sedimentación, la reducción de tiempo del proceso y una mejor eficiencia es por lo que se utilizó el floculante sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ con 2.5 g para 1 L de muestra de microalga se mezcló (ver Figura 31) y se dejó en decantación para facilitar la formación de flocs (Zhu et al., 2020). Después, la biomasa recolectada de microalga se sometió al proceso de centrifugación durante 20 min a 2300 rpm como se observa en la Figura 32 (Salgueiro, 2018).

B. Secado de las microalgas residuales

Finalizado el proceso de la separación de microalgas con el objetivo de eliminar cualquier presencia de agua, la biomasa húmeda se secó usando un horno a 60 °C durante 15 h (ver Figura 33) y se aprecie completamente sólido, en el cual se identificó la reducción de humedad y se pesó la bandeja de referencia vacía y limpia. Mientras que, en la segunda bandeja, la distribución de la muestra fue de forma homogénea y pesada. (Salgueiro, 2018; Wong & Shahirah, 2019)

C. Extracción del contenido de lípidos de la biomasa *Chlorella vulgaris* obtenidas de aguas residuales municipales

Primeramente, se realizó el molido de la biomasa seca con un mortero (ver Figura 34), luego se pesó en la balanza analítica 1 g de biomasa de *Chlorella vulgaris*, se colocó en un matraz de 100 mL junto al solvente compuesto de metanol y cloroformo en proporción (2:1) en 50 mL adaptado de acuerdo a la metodología de Bligh & Dyer, luego se dejó macerando por 2 d, posteriormente se utilizó el baño ultrasonido a 45 °C por 60 min con una potencia del 70 % (ver Figura 35) para la disrupción celular de la microalga *Chlorella vulgaris*. Una vez retirado, se extrajo la cantidad de solvente utilizado en el rota vapor primeramente el cloroformo y luego metanol a 62 °C, luego se llevó a la estufa a 80 °C por 15 min para la evaporación final del solvente restante como se muestra en la Figura 36. Continuando se filtró la biomasa con papel filtro luego se pesó (ver Figura 37), después se agregó 6 mL en proporción de (1:2) cloroformo y metanol y se centrifugó a 2300 rpm por 15 min. (De Souza, 2018; Rubio et al., 2018; Lee et al., 2023)

Para clarificar el lípido se usó el carbón activado como un agente adsorbente, ya que tiene la capacidad de captar y eliminar impurezas, como la clorofila, se agregó 0.5 g de carbón luego se utilizó el agitador magnético a 400 rpm por 30 min, luego para separar el carbón activado se centrifugó por 2300 rpm por 10 min, por último, se aplicó el filtro de jeringa debido que fue eficaz para eliminar impurezas de la muestra y obtener un aspecto clarificado como se muestra en la Figura 38. (Rodríguez, 2017)

D. Rendimiento de la extracción de lípidos

Después de extraer el lípido, se determinó la cantidad de aceite extraído usando la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento de extracción de aceite} = \frac{\text{Peso de extracción de aceite (g)}}{\text{peso de la biomasa de la microalga (g)}} \times 100\%$$

Ecuación (3)

Nota. Nurfarahanim et al., (2017)

E. Procesamiento de la transesterificación para obtener biodiésel

Primeramente, se realizó un calentamiento del lípido obtenido de la microalga hasta los 50 °C, luego se hizo una mezcla de metanol con el catalizador básico hidróxido de sodio dando como resultado la obtención del metóxido de sodio (CH₃ONa) el cual se usó el 1 % de la muestra de lípido en una proporción de (1:6), posteriormente, se mezcló con los ácidos grasos de la microalga y se introdujo a un agitador magnético (ver Figura 39) para obtener una mezcla

homogénea durante 60 min donde se efectuó la reacción de transesterificación. (Zhang et al., 2014; Lee et al., 2023)

Para la separación del biodiésel, se realizó mediante el proceso de decantación, obteniendo por un lado la mezcla de glicerina, que se mostró en la parte inferior de la pera decantadora y/o tubo falcon de 50 mL y el biodiésel en la parte superior, para ello se colocó a temperatura ambiente durante de 24 h (ver Figura 40). El producto de este proceso fue el biodiésel terminado. (Merma, 2017; Apaza et al., 2020; Vellaiyan, 2024)

F. Rendimiento de la producción de biodiésel

El rendimiento de biodiésel a partir de biomasa de microalga *Chlorella vulgaris* se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento de biodiésel}(\%) = \frac{\text{masa de biodiésel (g)}}{\text{algas (g)} \times \text{contenido de aceite (\%)}} \times 100$$

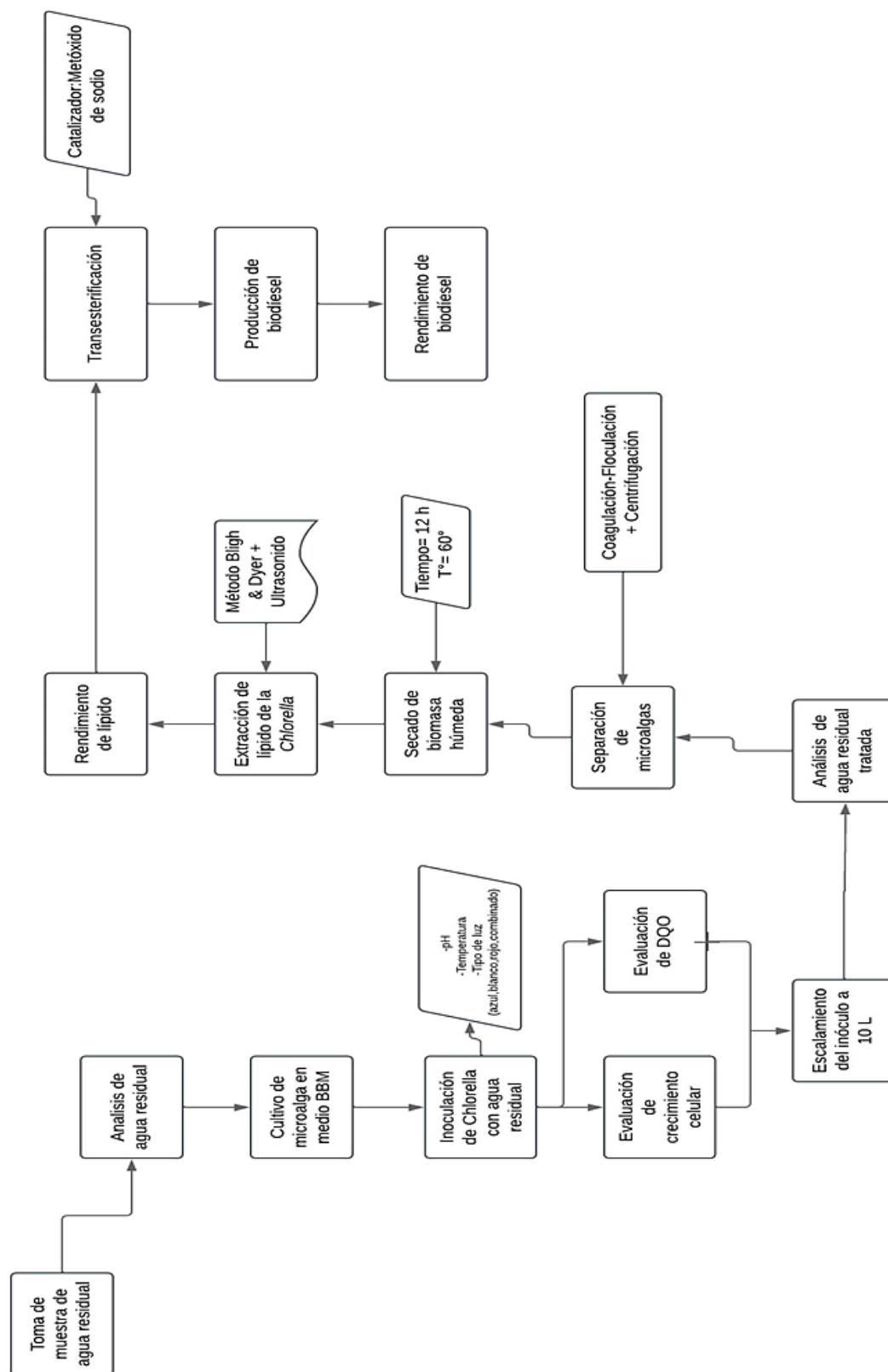
Ecuación (4)

Nota. Hechun et al., (2013)

Para ilustrar de manera clara el procedimiento de la experimentación, se muestra la Figura 3, el diagrama de flujo que proporciona una visión estructurada de las actividades y facilita la comprensión del proceso metodológico utilizado en la presente investigación.

Figura 3

Flujograma de la metodología realizada en la investigación





CAPÍTULO IV

RESULTADO Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Identificación del crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* en condiciones de laboratorio con agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.

4.1.1. Identificación de *Chlorella vulgaris*

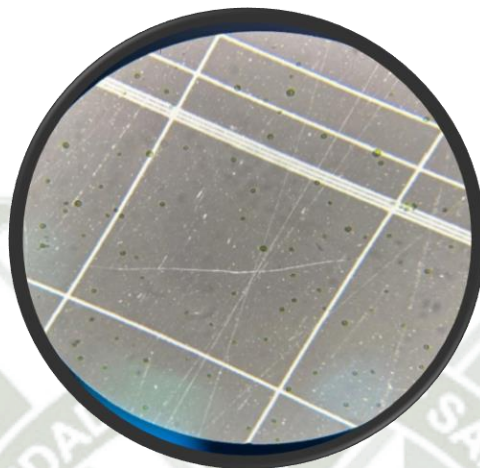
La elección de la *Chlorella vulgaris* se determinó por varios factores como un crecimiento rápido, adsorción del dióxido de carbono, producción de oxígeno y principalmente gran adaptabilidad frente a condiciones extremas en este caso a aguas residuales domésticas, el cual en la mayoría de estudios diluyen tal muestra con la finalidad que no sea invasivo frente a la microalga de estudio, como también aguas residuales sintéticas que son controladas en el laboratorio, por tal motivo se optó por utilizar agua residual en concentración al 100 % y ver su respuesta frente a tales condiciones. Asimismo, es utilizado para producir productos derivados de la microalga.

Como se observa en la Figura 4, la cepa obtenida se identificó a la microalga de la especie *Chlorella vulgaris* las cuales presentaron coloración verde claro, de forma circular con bordes ligeramente irregulares, con membrana bien definida, sin flagelo lo cual no presentó un desplazamiento, además se observaron microalgas individuales el cual ayudó en la descripción de la estructura externa y otros detalles significativos, como también del tipo agrupadas que es más favorable para una concentración mayor de microalgas, además se puede afirmar es probable que estuvieron en la etapa de división celular, sin embargo, también se mostró desventajas en cuanto al conteo celular debido que no se tuvo una visibilidad específica de la cantidad de microalgas. Según las fotografías de Rodríguez (2017), confirmó el tipo de microalga correspondiente. De manera similar Zhang et al. (2023) identificaron la microalga *Chlorella vulgaris*, a través del microscopio donde mostró la estructura de la microalga, de forma que coincidió con la presente investigación.

En cuanto al incremento de cultivo de la *Chlorella vulgaris*, se aplicó el Medio Basal de Bold (BBM) para aumentar la cantidad de microalga en el inicio de la experimentación y se estableció bajo condiciones estándares de cultivo de microalga. A partir del tercer día se intensificó el cual cada vez tornó un color verde intenso, siendo un indicador del crecimiento de la microalga.

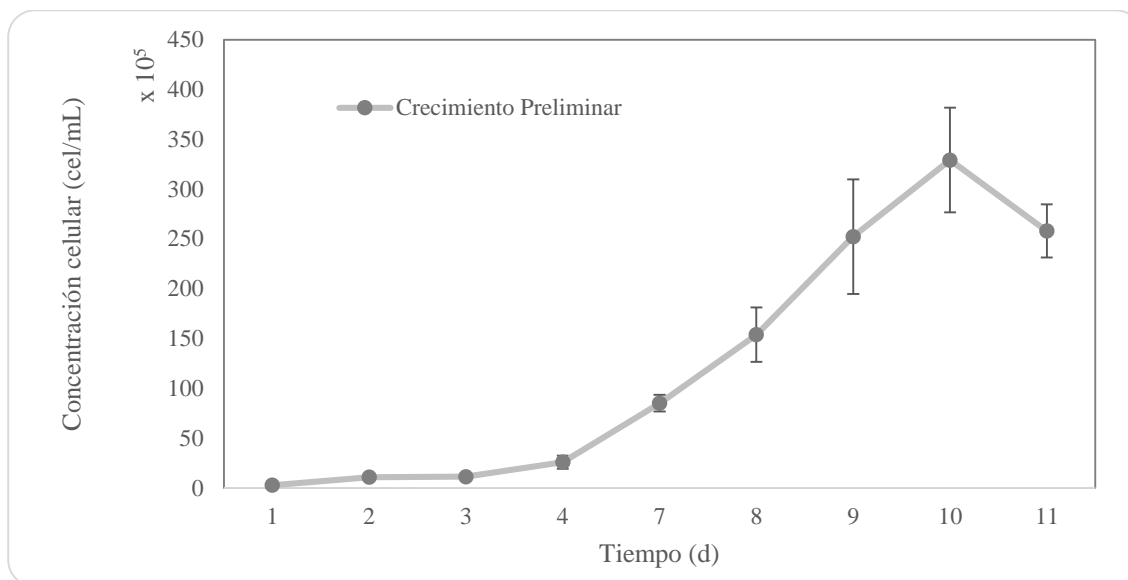
Figura 4

Medición de Chlorella vulgaris a medida de 40 X en el microscopio

**4.1.2. Evaluación del crecimiento de la *Chlorella vulgaris***

En la presente Figura 5 se demostró que la fase de latencia se dio hasta el día 3, luego dándose la etapa de adaptación y posteriormente desde el día 4 empezó la fase exponencial hasta el día 7, a partir de allí se mostró la fase estacionaria. Donde en un período de cultivo de 11 días, el cual el día 10 se obtuvo la mayor tasa de crecimiento con 32 916 666 cel/mL.

Con ello se corrobora que la microalga *Chlorella vulgaris* tuvo una adaptación idónea a partir del día 3, cabe resaltar que tal agua residual se extrajo del final de la etapa preliminar, asimismo se cultivó hasta esta etapa, en condiciones estándares de cultivo de microalga con el fin de evaluar la resistencia de la *Chlorella vulgaris*. Dicho resultado también se estableció en el estudio de Alberca et al. (2023) que analizaron tres tipos de aguas residuales el cual prevaleció de tipo municipal debido que tuvo mayor tasa de crecimiento de la *Chlorella vulgaris* a comparación del tipo de agua residual agrícola e industrial.

Figura 5*Curva de crecimiento preliminar de Chlorella vulgaris*

A través de la Figura 5 se infiere que la *Chlorella vulgaris* pasó por la biotransformación el cual compone de 3 mecanismos celulares, primero la biosorción, etapa donde eliminan los contaminantes orgánicos con la ayuda de grupos funcionales que están en la pared celular, estos ayudan en los procesos de adsorción, interacción electrostática, entre otros, durante la biosorción que depende mucho de la condición del pH y temperatura, los mismos que fueron monitoreados constantemente mostrando un rango entre (18-22) °C y 7.5. Segundo la biodegradación, donde la microalga convierte estos contaminantes en compuestos de bajo peso molecular y luego lo utiliza como fuente de nutrientes para el crecimiento del mismo y, por último, la bioacumulación, proceso metabólico que depende del crecimiento el cual estos compuestos se transfieren dentro de la célula y lo eliminan a través de soluciones acuosas (Amin et al., 2022). Además, muy posible que la microalga haya tenido una interacción con otros microorganismos como las bacterias y hongos, siendo de alguna manera beneficioso, aunque también riesgoso por la competencia entre especies.

4.1.3. Resultado de caracterización de agua residual inicial

Las características fisicoquímicas del agua residual municipal se muestran en la Tabla 7 donde el efluente presentó altos valores de compuestos orgánicos expresados como DBO, DQO, nutrientes (N, P), aceites y grasas. Incumpliendo con los límites máximos permisibles del Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM para los efluentes de PTAR establecida por el gobierno peruano donde los valores máximos de DQO, DBO y aceites y grasas son (100, 200 y 20) mg/L respectivamente.

El agua residual utilizada en este estudio contiene alrededor de 701.9 mg/L de DQO, lo que indica el alto contenido de contaminantes; al igual que, se han informado valores similares de DQO con 637 mg/L. (Iparraguirre & Zamora, 2023)

Mientras que en otros parámetros como DBO 332.1 mg/L, fósforo total 13.95 mg/L, nitrógeno total 132.33 mg/L y aceites y grasas 61.80 mg/L siendo indicadores principales para el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*, así como diversos procesos de bioacumulación. El pH correspondiente al agua residual inicial se encontró en 7.90, el cual se encuentra en un pH óptimo dentro del rango de 7 hasta 9. Además, las aguas mostraron un alto contenido de coliformes fecales por su fuente, así como otros parámetros como metales pesados, sólidos suspendidos y turbidez, que pudieron representar un problema para el proceso de tratamiento debido a la presencia de partículas. Los resultados se detallan en el informe de ensayo ubicado en el Anexo 4, cabe resaltar que fueron analizados por el laboratorio ALAB Analytical Laboratory acreditado por INACAL.

Tabla 7

Resultados del análisis de laboratorio del agua residual antes del tratamiento

Parámetro	Unidad	Resultados de agua residual	LMP para efluentes de PTAR
pH	-	7.9	6.5 – 8.5
Turbidez	NTU	81.9	-
Temperatura	°C	22	< 35
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	NMP/100mL	160 000 000	10,000
Coliformes Totales (NMP)	NMP/100mL	160 000 000	-
DBO	mg/L	332.1	100
Aceites y Grasas	mg/L	61.80	20
SST	mg/L	270.0	150
DQO	mg/L	701.9	200
Fósforo Total	mg/L	13.95	-
Nitrógeno Total	mg/L	132.33	-

4.2. Determinación de las condiciones para el crecimiento y reducción del DQO por tipo de color de luz blanca, roja, azul y combinada (azul/roja) de la *Chlorella vulgaris* en muestras de agua residual doméstica de la PTAR Escalerilla de Arequipa.

La eficiencia del mecanismo de la fotosíntesis de la microalga depende de varios factores como temperatura, pH, nutrientes y luz son determinantes para la biorremediación. La presente investigación se enfoca en el factor del color de luz ya que influye en su crecimiento con la finalidad de una mejora en la tasa de crecimiento y composición bioquímica de la biomasa, principalmente, ya que se usó la biomasa residual que resultó para la producción de lípidos. Si bien es cierto el uso de iluminación artificial genera más costos de producción a pesar que se use los tipos LED que generan ahorro de energía frente a otros menos sostenibles, sin embargo, produce una distribución más equitativa en los sistemas de cultivos como los fotobiorreactores, por ello una opción para mitigar tal impacto es suministrar tal energía desde una fuente solar. (He et al., 2023; Marchese et al., 2025; Hashmi et al., 2024)

La elección de color de luz dependió mucho del uso que se dio a la biomasa microalgal, de acuerdo a varias investigaciones las luces de tipo roja y azul son absorbidas por las microalgas no solo para crecimiento y biomasa sino también lípidos, aunque es complejo debido que en otros estudios lo evaluaron a nivel genético (Marchese et al., 2025). Por ello en base a esa información se pudo elegir el tipo de luz roja y azul, ya que colocan las dos opciones mayormente, en el presente estudio se quiso determinar de ambas, cuál sería la más eficiente, agregando de otro factor a destacar, la interacción con el agua residual doméstica. Mientras, que la luz combinada de acuerdo a otras investigaciones indicó que una asociación tuvo efectividad, ante tal información, se probó para saber si se tenía mayor eficiencia. Por último, se utilizó la luz blanca como simulación a la luz natural el cual se tuvo la idea en caso habría alguna variación o modificación a partir de lo dicho por investigaciones anteriores.

4.2.1. Evaluación del crecimiento celular de la *Chlorella vulgaris* por tipo de color de luz.

Al inicio de la experimentación, se realizó 4 tipos de cultivos con diferentes fuentes de iluminación LED blanca (380 – 780) nm, roja (645-700) nm, azul (380 – 495) nm azul/roja, en 4 botellas de 1 L en una caja de madera con una medida 35 cm de ancho, 35 cm de largo y 30 cm de alto forrados con aluminio en su interior Wan Mahari et al. (2024) señalaron que el uso de la luz LED es óptima frente a otras opciones de luz artificial por tener una mejor eficiencia energética y vida útil, genera escasas emisiones de calor y mayor precisión en el rango de las longitudes de onda. Asimismo, en comparación con la luz natural, la luz LED es necesario usarla en caso se tenga que obtener un producto de valor agregado, es este caso, la producción de lípidos, puesto que se tiene un mejor registro de la intensidad de luz, así como homogeneidad en la penetración de la luz en el cultivo de microalga con aguas residuales domésticas.

Por lo que durante la etapa de crecimiento, la mayoría de cultivos presentaron temperatura promedio de (25 a 30) °C y un pH promedio de 8.2 a 8.5 para la microalga *Chlorella vulgaris* manteniendo el rango óptimo de crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* que es de 7 a 9 unidades, Viveros (2014), con ello ayudó a la predominancia del incremento poblacional de la *Chlorella vulgaris* (ver Figura 21), dado que el pH afecta el crecimiento en otros microorganismos bacterias, virus y protozoos que conlleva a su eliminación. Por ello, se utilizó una aireación constante que se dio a los cultivos con bombas de aire de 4 L/min.

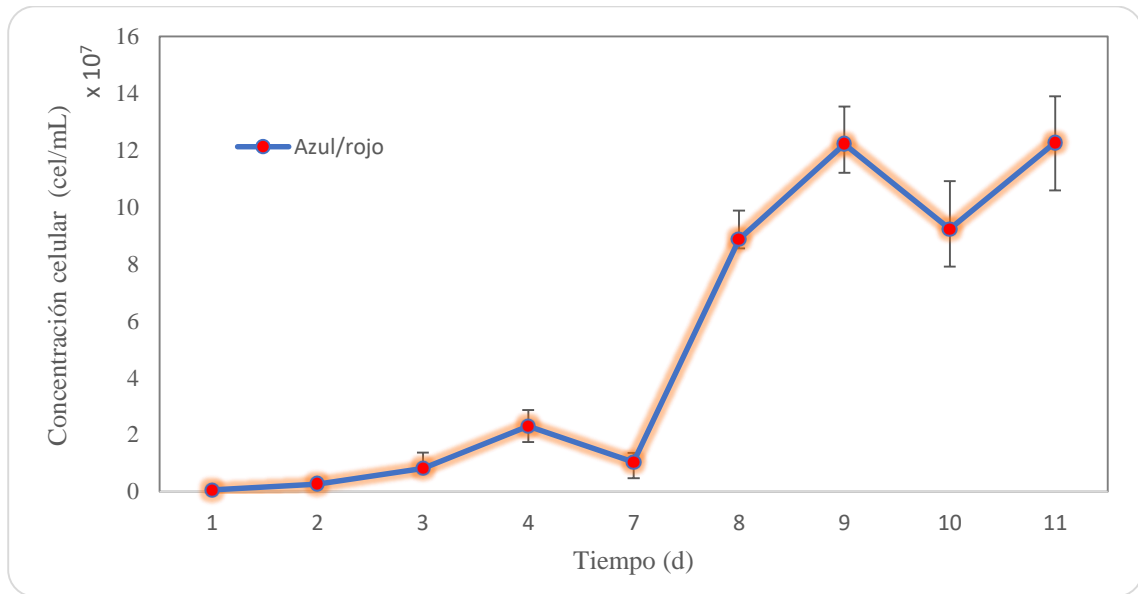
Además, se estableció un fotoperiodo de 24 h de acuerdo a revisiones bibliográficas se incorporó tal rango por el nivel de contaminantes que se componía en agua residual el contacto directo fue muy significativo por lo cual las 24 h dieron mayor resistencia a la competencia de otros microorganismos en la predominancia del crecimiento de la *Chlorella vulgaris* además, el agua residual presentaba turbidez en consecuencia el proceso de fotosíntesis pudo haber sido lento. De igual manera se tomó en cuenta en la investigación del autor De Souza (2018) que trabajó 24 h de luz para un mejor crecimiento celular de la *Chlorella minutissima* por tanto mayor contenido de biomasa algal para la extracción de lípidos. Asimismo, Zheng et al. (2024) demostraron que al aplicar un fotoperiodo de 24/0 h tuvo mayor efectividad en la concentración de biomasa y contenido de lípido, debido que aumentó 3 veces en comparación a las condiciones estándares de cultivo en valores de 10.96 % y 4.28 %, por ello indicaron que tanto los parámetros de temperatura, intensidad de luz y fotoperiodo favorecen la acumulación de lípidos.

Por otro lado, el porcentaje de concentración de *Chlorella vulgaris* fue de 5 %, mientras que, en el estudio de Cartagena & Malo (2017) se encontró que el mayor porcentaje de remoción de materia orgánica se encontró a concentración del 10 % de microalga, y según los resultados del estudio Iparraguirre & Zamora (2023) demostraron que, en las concentraciones de (10, 20 y 30) %, la remoción solo varió de (2 a 3) % por lo que no se tomó en cuenta como una variable que influya en la remoción.

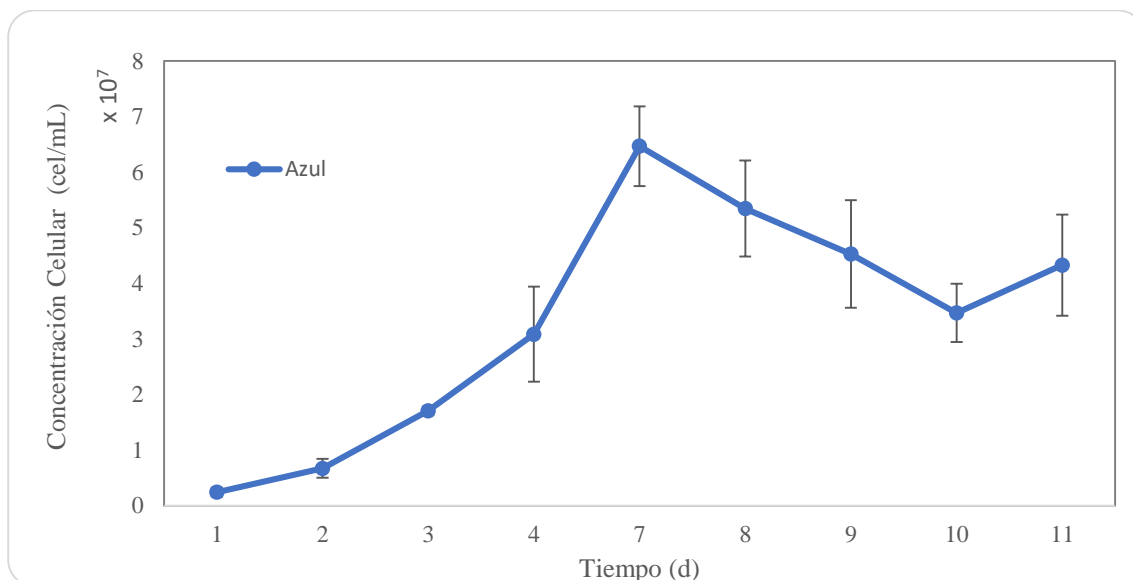
Los cultivos tuvieron un periodo de 11 d de crecimiento de las microalgas con los diferentes tipos de luces seleccionadas (ver Fotografía 21), donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 6

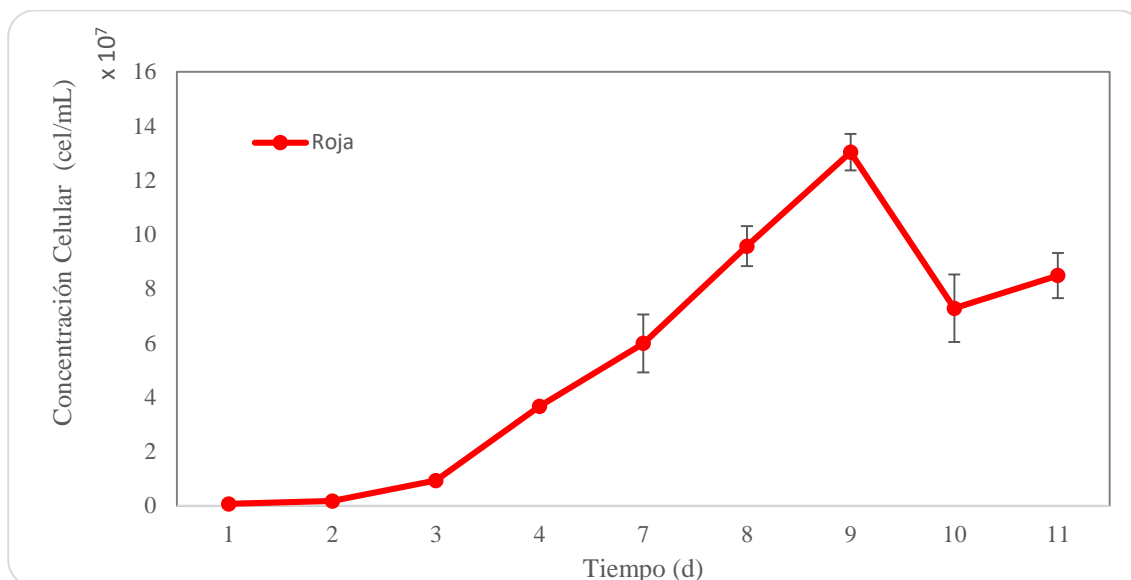
Curva de crecimiento del color de luz combinada (azul/rojo)



En la Figura 6 aplicado con color de luz combinada, muestra una fase de retraso hasta el día 2, seguido de una fase exponencial hasta el día 9 con 122 187 500 cel/mL, sin embargo, se observa un descenso el día 7, luego la fase estacionaria se dio desde el día 10. Según Plasencia (2012), también evaluó en el tipo de color de luz roja y azul, así como combinada, por lo que resultó un mayor crecimiento en el color de luz combinada con proporción al 50 %. Es posible que haya resultado alto, debido que la combinación azul/roja genera un mejor mecanismo de desarrollo, como explica Kim et al. (2014) el color de luz azul indicó un incremento mayor en el tamaño celular mientras que el color de luz roja mejoró la división celular por ende mayor crecimiento celular. Aunque se usó el color de luz combinada desde el día 1 resultó de manera idónea tal mecanismo. En diversos estudios se investigó sobre la capacidad de producción de lípidos y calidad de biodiesel en diferentes especies probando con los tipos de luz como indicaron (Jin et al., 2023), la especie *Pavlova sp.* siendo una microalga popular en el campo de la acuicultura mostró que tiene más eficiencia en la producción y calidad del biodiesel con la luz combinada, mientras que el color de luz roja no mostró mejoría, por ello cada especie tiene sus propias características, es decir, la sensibilidad que tiene cada microalga con el tipo de luz, influye en la red metabólica de cada uno de diferente manera.

Figura 7*Curva de crecimiento del color de luz azul*

Seguidamente como se muestra en la Figura 7 el cultivo del color de luz azul, donde la fase de retraso se dio el día 1, luego la fase exponencial incrementó hasta el día 7 con $646\,875 \times 10^2$ cel/mL, mientras que la fase estacionaria se mostró hasta el día 10, continuando con una leve reducción de crecimiento hasta llegar el día 10 con su punto más bajo. Según Cebrián (2015) reportó que los resultados aplicados con el color de luz azul generaron una mayor proliferación celular, es decir, se mostró un crecimiento regular, no hubo fotoinhibición, sin embargo, a nivel microscopio se observó que cada *Chlorella vulgaris* tenía un mayor tamaño celular. De igual forma, se pudo visualizar la microalga con mayor volumen en comparación al tamaño promedio regular que se observó en los anteriores tipos de color de luz. Bajo dicha premisa, la luz azul presenta afinidad por las microalgas verdes pues debido a la energía fotónica que compone, genera más producción de pigmentos ya sea clorofila a y b, en consecuencia, protege a la microalga del estrés oxidativo. Sin embargo, reafirmaron que es posible que inhiba la división celular, generando solo células de mayor tamaño (Marchese et al., 2025). Por el contrario, Módenes et al. (2025) reportaron que con la luz azul generó mayor crecimiento de la *Desmodusmus sp.* teniendo un resultado diferente debido que favoreció con la producción de clorofila, pero no tuvo gran afinidad por la acumulación de lípidos. Por ende, en el crecimiento celular demostraron un incremento mínimo por ello quedó como la segunda opción viable a utilizar.

Figura 8*Curva de crecimiento del color de luz roja*

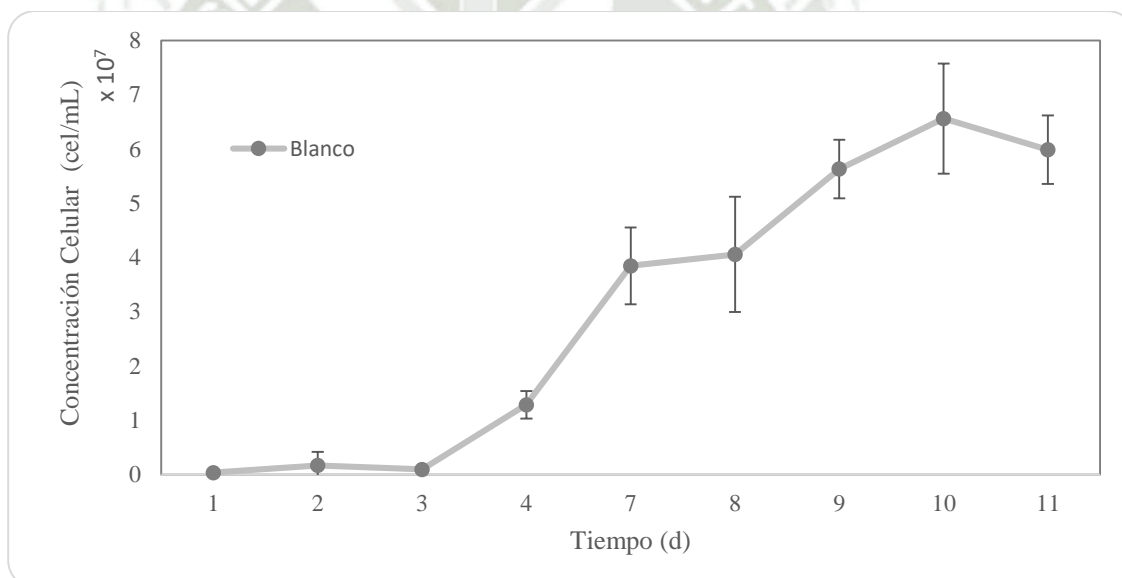
El color de luz roja como se observa en la Figura 8, presentó la fase de retraso hasta el día 2 relativamente, luego la fase exponencial se dio hasta el día 9 con su punto más alto de crecimiento $1\ 303\ 125 \times 10^2$ cel/mL, teniendo un rango de crecimiento más estable y alto respecto a los otros tipos de color de luz evaluados. Cebrián (2015) demostró que al aplicar el color de luz roja presenta un crecimiento celular alto, sin embargo, a través del microscopio se observó que se tiene *Chlorella vulgaris*, en un tamaño celular regular, pero con mayor proliferación de microalgas. Este evento se logró comprobar en el desarrollo de la experimentación. De igual manera otros autores afirmaron que la luz roja está más influenciada para promover la división celular, generando células pequeñas en gran cantidad, este mecanismo influye en un mayor incremento en la biomasa. Asimismo, reportaron que debido a los pigmentos fotosintéticos clorofila a y b tienen mayor afinidad con la luz roja, de hecho, es eficiente en la activación del fotosistema II por el transporte de electrones en el proceso de la fotosíntesis, promoviendo así el incremento del crecimiento celular, esto mucho depende de las condiciones que se colocan a la microalga, por ejemplo, con la *Chlorella vulgaris*, la luz roja es más efectiva (Marchese et al., 2025). Además, Torres-Martínez et al. (2025) reportaron que la aplicación de los tipos de color de luz roja y azul generan un impacto significativo positivo en el crecimiento, acumulación de lípidos y principalmente a nivel genético, es decir, se demuestra la adaptación de las respuestas metabólicas, promoviendo la mayor formación de ácidos grasos que son indispensables para biosíntesis de lípidos, este hallazgo se comprobó con la microalga *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus*.

En tal sentido, Hashmi et al. (2025) señalan que el aumento del pH bajo iluminación con luz roja confirma los patrones de absorción característicos de la clorofila, ya que esta longitud de onda es captada de forma óptima, lo que impulsa con mayor eficiencia las reacciones fotosintéticas. Esta respuesta se asocia con una mayor liberación de protones, lo cual concuerda con estudios previos y evidencia la influencia de la luz roja sobre el pH como un indicador indirecto de la actividad fotosintética.

En este contexto, investigaciones recientes han demostrado que tanto la luz roja como la azul favorecen significativamente la productividad de biomasa en microalgas de distintos grupos taxonómicos, debido a que los máximos de absorción de las clorofilas se localizan precisamente en estas regiones del espectro visible. (Maltsev et al., 2021)

Figura 9

Curva de crecimiento del color de luz blanca



En el caso del color de luz blanca como se muestra en la Figura 9, la fase de retraso se presentó hasta el día 3, seguido de una fase exponencial que se dio hasta el día 10 con $65\,625 \times 10^3$ cel/mL y posteriormente se mostró la fase estacionaria a partir del día 11, siendo el menor respecto al crecimiento de otros tipos de luz. Sin embargo, Martínez de la Cruz et al. (2022) demostraron que el color de luz blanca fue la que obtuvo mayor crecimiento celular, no obstante, se utilizó sólo medio de cultivo para el desarrollo de la microalga *Chlorella vulgaris*, es decir, en condiciones generales, siendo la gran diferencia de la presente investigación propuesta, que se dio con agua residual municipal.

Bajo esa premisa de acuerdo a Wan Mahari et al. (2024) reportaron que la luz blanca presentó tasas más altas de crecimiento como también de concentración de biomasa aplicado en la microalga *Scenedesmus sp* en comparación con otros tipos de colores de luz, lo cual se indica que cada especie tiene un mayor grado de fotoaclimatación y fotoadaptación ya sea por la activación de los fotoprotectores al tener una luz más intensa. Además, tienen diferentes fotorreceptores que son proteínas unidos a la membrana que son dependientes de la fotoquímica.

Según Sánchez-Saavedra et al. (2020) se realizó un estudio evaluando los efectos de la luz blanca, amarilla, azul y verde, donde la luz blanca presentó la mayor tasa de crecimiento. Sin embargo, no tan eficiente en cuanto al tamaño celular como la luz azul y amarillo. Además, se evaluaron los niveles de clorofila a y b, así como de carotenoides y se consideraron que los niveles de clorofila a y carotenoides fueron menores en la luz blanca lo que suele influenciar en la tasa de crecimiento como se muestra en otros estudios, donde la absorción de clorofila mejora la reproducción de la microalga.

Por ello a partir de los cuatro tipos de luz analizados como se representa en el Anexo 3 se pudo demostrar que del día 1 al 4 se tuvo una etapa de adaptación de la microalga ya el crecimiento fue muy leve pero continuo. El cultivo con color de luz azul presentó el crecimiento más activo, es decir, se adaptó más rápido al cultivo de agua residual, sin embargo, se mostró una reducción constante de densidad celular después de su punto más alto de crecimiento. El tipo de color de luz que mostró un lento crecimiento fue la luz blanca llegando a su punto más alto el día 10. El color de luz combinada roja/azul siguió la misma tendencia que el color de luz roja teniendo su mayor crecimiento en el día 9, sin embargo, el crecimiento más alto fue del color de luz roja con $1\ 303\ 125 \times 10^2$ cel/mL, seguido del cultivo con color de luz combinada, luz azul y finalmente luz blanca (ver Figura 24 y 28). Por lo tanto, hasta esta etapa se tuvo dos prometedoras alternativas que se decidió en conjunto con el análisis de DQO según el tipo de color de luz predominante. Torres-Martínez et al. (2025) corroboró que la aplicación de los tipos de color de luz roja y azul generan un impacto significativo positivo en el crecimiento, acumulación de lípidos y principalmente a nivel genético, es decir, se demuestra la adaptación de las respuestas metabólicas, promoviendo la mayor formación de ácidos grasos que son indispensables para biosíntesis de lípidos, este hallazgo se comprobó con la microalga *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus*.

4.2.2. Análisis de DQO por tipo de color de luz

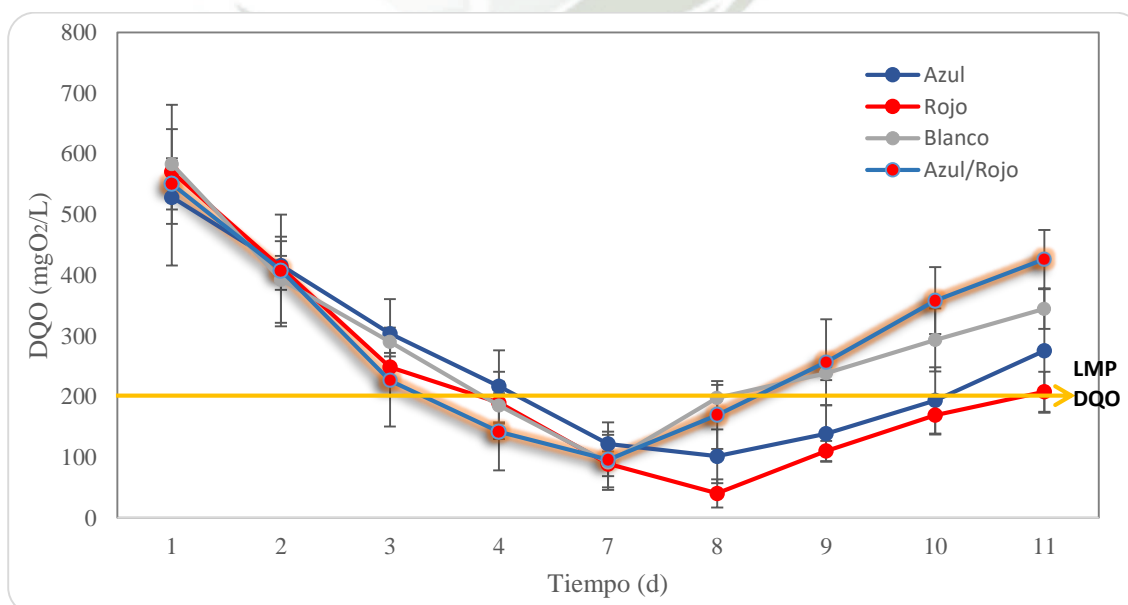
De manera simultánea al conteo del crecimiento celular se evaluó el parámetro de DQO, debido que según normativa vigente es uno de los principales parámetros para la evaluación de la calidad

del agua residual tratada. La concentración inicial en los 04 tratamientos fue en un rango de (528 - 604) mg/L, donde se realizó mediciones diarias por cada color de luz. En el cual, se tuvo una reducción constante, teniendo la mayor reducción en el día 7 para el color de luz blanca y combinada, mientras que para los primeros 8 días fue el color de luz roja y azul. Las cuales se encuentran por debajo de los 200 mg O₂/L de DQO establecidos en los límites máximos permisibles del Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, comprobando que el uso de esta microalga en los diferentes tipos de luces si permitió su cumplimiento. Según Prieto (2020) el inóculo con agua residual referente a la etapa de tratamiento secundario con *Chlorella vulgaris* tuvo una óptima adaptación al tipo de agua, es decir, viable para condiciones desfavorables, siendo capaz de eliminar nitrato y fosfato, además la productividad de la biomasa fue mayor.

Se observó en la Figura 10 que se tuvo un aumento de DQO a partir del día 8 en las luces blanca y combinada, mientras que en el día 10 dicho incremento se presentó en las luces roja y azul. Lo cual podría estar asociado a la descomposición de las microalgas viejas a través de las bacterias o relacionado con la liberación de la materia orgánica luego que las microalgas fijaran el CO₂, es probable que se tuvo dos vías metabólicas una autótrofa y heterótrofa generando de esta manera sustancias orgánicas en el medio de cultivo (Aguilar, 2022). Esto demuestra que la recolección de microalgas debe realizarse entre el día 7 al 9. Para permitir el crecimiento de nueva biomasa y controlar la liberación de polímeros extracelulares y optimizar el tratamiento de las aguas residuales.

Figura 10

Curva remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO)



En la Figura 10 se muestra la comparación de tipos de luz en la remoción de DQO, donde se observa la reducción significativa con la luz roja desde el día 4 hasta el día 10, dándose la mayor eficacia de la remoción en el día 8, relacionado directamente con el incremento de biomasa de la misma. Mientras que se muestra como segunda opción la luz azul el cual presenta una remoción de DQO cercana desde el día 7 hasta el día 10, posteriormente se tiene la luz combinada (azul/rojo) el cual se da una reducción desde el día 4 hasta el día 8, no teniendo una continuidad de la remoción. Por último, se tiene como última opción la luz blanca que indica solo dos días de reducción. Cabe resaltar que el nivel de reducción se evalúa a partir del límite máximo permisible de 200 mgO₂/L establecido en la normativa. El resultado que prevalece y consta de una continuidad en la remoción, es la aplicada con la luz roja, además de cumplir con el límite máximo permisible como indicador de efectividad del tratamiento del agua residual doméstica.

Asimismo, Hashmi et al. (2025) presentaron resultados muy similares al realizar un tratamiento de aguas residuales con *Chlorococcum sp.* aplicando tipos de color de luz roja, azul, blanca y violeta, el cual concluyeron de igual manera que la luz roja dio mejores resultados dando una eliminación del 72.10 % de DQO, 100 % de nitrógeno y 98.77 % de fósforo, así como el rendimiento de la biomasa además que consumió menor cantidad de energía con 1.08 kWh al usar luces LED. En efecto del resultado del presente estudio, así como otros autores que indicaron similitud, en consecuencia, se infiere que el tipo de luz afecta el metabolismo y la capacidad de la microalga principalmente en el proceso fotosintético.

Por otro lado, para analizar los factores determinantes de la remoción de DQO en el día 8, se evaluó los supuestos estadísticos para la validación de los resultados determinando por el método de Kruskal-Wallis y aplicación de prueba Fisher. A partir de la prueba Kruskal-Wallis como se muestra en la Tabla 8, aplicada a los cuatro tipos de luces evaluados, se obtuvo que el valor p es 0.007 siendo menor a 0.05 por ello, se afirma, que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, sus medias son diferentes, por ende, hay una diferencia significativa por el tipo de color de luz en el crecimiento y la remoción de DQO con microalga *Chlorella vulgaris*.

Tabla 8

Prueba de Kruskal-Wallis

Color de luz	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
A	4	111.0	6.3	-1.09
AR	4	153.0	11.3	1.33
B	4	201.0	13.5	2.43
R	4	38.5	3.0	-2.67
General	16		8.5	

Hipótesis nula Ho: Todas las medianas son iguales
 Hipótesis alterna H₁: Al menos una mediana es diferente

GL	Valor H	Valor p
3	11.98	0.007

En la Tabla 9, se utilizó el método de Fisher para realizar la prueba de comparaciones múltiples donde se observó que las medias del color de luz rojo (R), azul (A), blanco (B) y combinado (A/R) no comparten una agrupación por lo que son significativamente diferentes a excepción de la luz blanca (B) y combinada (A/R).

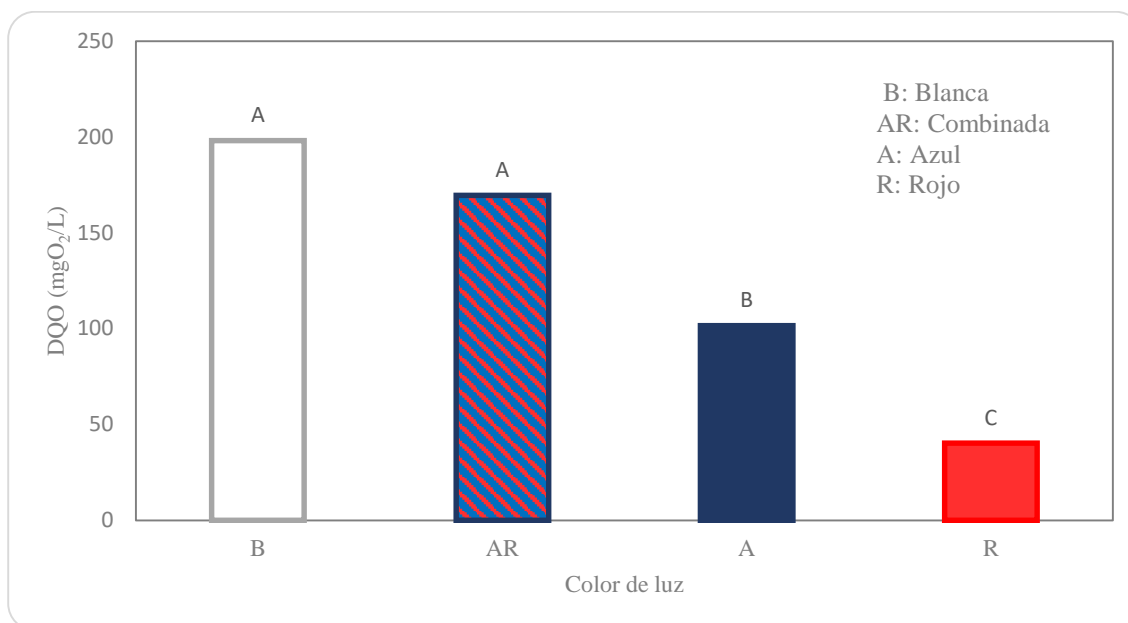
Este resultado se refuerza con la Tabla 9, mostrando la remoción de DQO bajo cada condición de tipo de luz y agrupaciones estadísticas. La luz roja (R) alcanzó la remoción más alta (grupo C), seguida de la luz azul (A) con el (grupo B), la luz combinada (AR) correspondiente al (grupo A) y la luz blanca (B) con el (grupo A) (ver Figura 11). Estos resultados afirman la importancia de la luz roja como la más efectiva para la remoción de biomasa, seguida de la luz azul, luz combinada y luz blanca.

Tabla 9

Resultados del Método LSD de Fisher y una confianza al 95 %

Color de luz	N	Media	Agrupación
B	4	198.000	A
AR	4	169.500	A
A	4	101.500	B
R	4	40.333	C

Figura 11 Diferencias de medias del método LSD de Fisher



4.2.3. Ruta bioquímica de *Chlorella Vulgaris* en el tratamiento de agua residual en el bioreactor

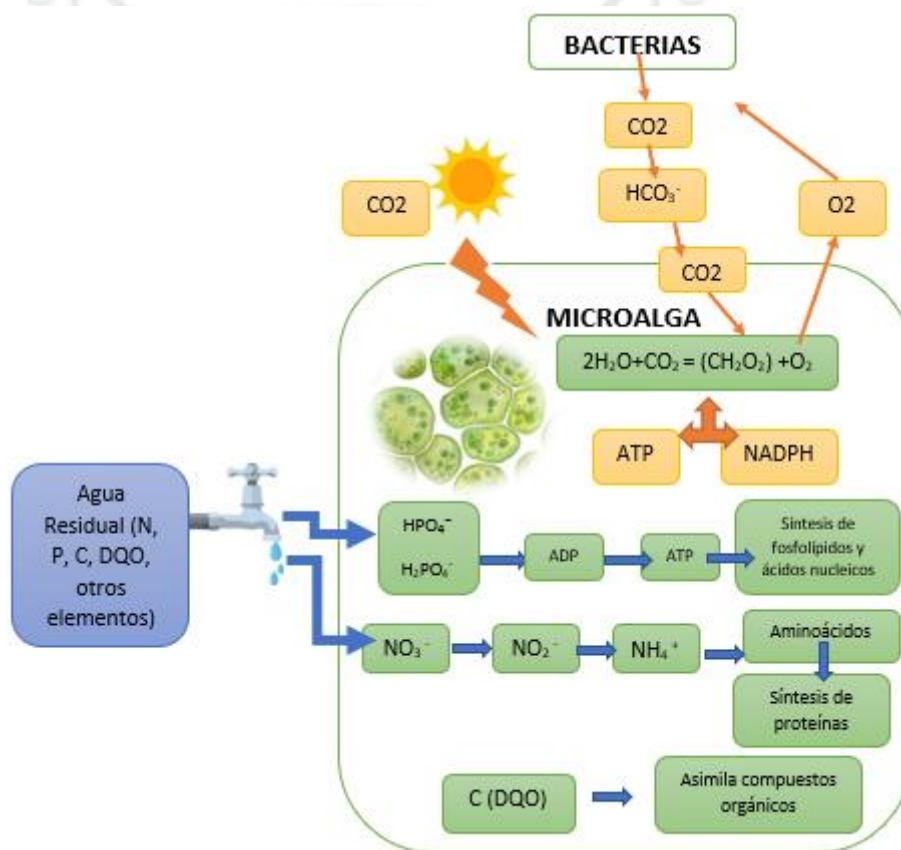
La ruta bioquímica de *Chlorella vulgaris* en el tratamiento de aguas residuales (Figura 12), utilizó la luz LED para realizar la fotosíntesis, lo que le permite producir su propia fuente de carbono y el dióxido de carbono que es fijado y convertido en carbohidratos, liberando oxígeno que es consumido por las bacterias. Además, las microalgas utilizan carbono orgánico en forma de bicarbonato (HCO_3^-), ya sea absorbiéndolo directamente o transformándolo en dióxido de carbono (CO_2) para su uso. También, ciertas microalgas aprovechan el bicarbonato generado a partir del CO_2 producido por la respiración de las bacterias que habitan en el mismo entorno (Umamaheswari & Shanthakumar, 2016). Así como la absorción directa de nutrientes, como algunos compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales son biodegradados. La *Chlorella vulgaris* se alimenta de los nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{3-}) presentes en el agua residual. La microalga convierte estos nutrientes de nitrógeno para la síntesis de proteínas mientras que el fósforo para la síntesis de fosfolípidos y ácidos nucleicos. (Ramírez & Rodríguez, 2023)

Para que la microalga *Chlorella Vulgaris* utilice los iones nitrato, estas deben convertirlos en iones amonio. Este proceso de empieza cuando el NO_3^- se absorbe en la célula, donde el nitrato reductasa citoplasmática (NR) lo reduce a NO_2^- , y el NO_2^- se transfiere al cloroplasto y se reduce a NH_4^+ por el nitrito reductasa. Asimismo, para la absorción de fósforo por las microalgas se puede dar por dos procesos la adsorción extracelular y captación intracelular. La adsorción extracelular ocurre en la superficie de las microalgas y está relacionado con las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que ellas mismas secretan. Las EPS están compuestas principalmente por proteínas y carbohidratos.

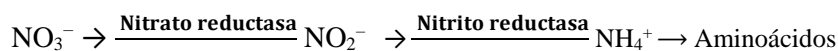
Las proteínas de estas sustancias contienen grupos amino con carga positiva, los cuales pueden unirse al fosfato con carga negativa, permitiendo así su adsorción en la superficie celular. (Jin et al., 2023)

Además, cuando el fósforo es transportado al interior de la célula, donde interactúa con las sustancias poliméricas intracelulares (SPI). Estas SPI contienen compuestos fosforados como fosfolípidos, proteínas fosforiladas, nucleótidos y polifosfatos. La absorción intracelular de fósforo ocurre principalmente durante la asimilación de nutrientes por parte de la biomasa, facilitando la formación y acumulación de polifosfatos dentro de las células. (Jin et al., 2023)

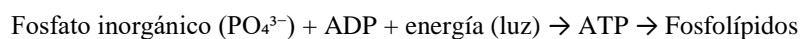
Figura 12 Ruta bioquímica de microalga *Chlorella Vulgaris*



Ruta Bioquímica del nitrógeno



Ruta Bioquímica del fósforo



Los medios de cultivo como el agua residual muestran una concentración alta de nitrógeno y fósforo que favorecen las tasas de crecimiento de las microalgas y producción de biomasa. En el presente estudio, los nutrientes nitrógeno y fósforo al inicio del tratamiento de agua residual obtuvieron

(132.33 y 13.95) mg/L, respectivamente lo que favoreció la tasa de crecimiento de las microalgas. Según Goh et al. (2022) las aguas residuales contienen de 15 a 90 mg/L de nitrógeno y de 4 a 20 mg/L de fósforo, que pueden servir suficientemente como medio de cultivo para el crecimiento de algas. La investigación estableció una relación molar N/P de 12:1 con cantidades exactas, lo que resultó en una eficiencia de remoción de nitrógeno del 38 %. En contraste, la concentración de fósforo no mostró variaciones significativas entre el inicio y el final del tratamiento.

Conocer esta relación es de gran importancia ya que los nutrientes nitrógeno y fósforo para *Chlorella vulgaris* en condiciones de tratamiento de aguas residuales puede ayudar a aumentar la producción de biomasa y los lípidos.

Xin et al. (2010) demostró que las proporciones N/P adecuadas para la eliminación de nutrientes en un rango adecuado son de 5:1–8:1 para el tratamiento de agua residual con la microalga *Scenedesmus sp.* mencionando que es similar a la relación de N/P de *Chlorella vulgaris* que fue de 8:1.

De manera complementaria Yang et al. (2018), descubrieron que, con la restricción de la cantidad de nutrientes (N/P), es posible que agregarle acetato de sodio a las aguas residuales puede aumentar significativamente tanto la biomasa como cantidad de lípidos.

4.3. Evaluación de la eficiencia del efecto de luz utilizando la microalga *Chlorella vulgaris* a escala laboratorio de 10 L en la reducción de DQO en muestras de agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.

Cuando se escaló la experimentación a 10 L se observó que la temperatura varió entre el rango de (20 a 25) °C debido al espacio que tenía el biorreactor como se observa en la Figura 29, variando a la vez el porcentaje de concentración de *Chlorella vulgaris* a 10 %.

4.3.1. Crecimiento de microalga a escala de biorreactor

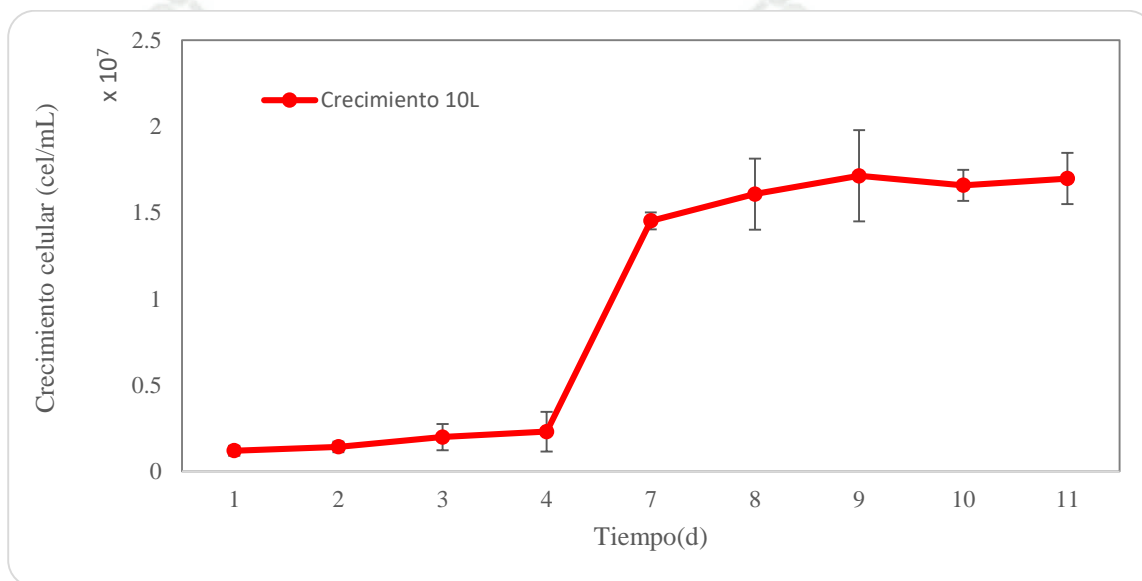
En el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* a mayor escala, presentó una competencia respecto a otros microorganismos presentes en el agua residual como bacterias, protozoos y hongos. Al realizar el escalamiento a 10 L se evaluó realizar con una concentración de 5 % de microalga, pero al ver que esto producía un retraso en el crecimiento de la microalga se optó por una concentración de 10 % ya que al contar mayor cantidad de agua residual se requirió más microalga. Además, como se muestra en la Figura 13 la fase de retraso se presentó hasta el día 3 luego la fase de exponencial se dio de manera prolongada a partir del día 4 al 9, posteriormente se dio la fase estacionaria hasta el día 11. Comparando con el estudio He et al. (2021) el color de luz roja presentó mejor crecimiento al hacer una comparación con la azul en un fotoperiodo de 12 h. De manera similar Zhang et al. (2024) informaron que lograron un alto crecimiento y rendimiento de biomasa de la microalga *Oedocladium Carolinianum* con la luz roja desde el día 12 al 18, por

ello es de considerar que para mejorar el crecimiento de la microalga más depende del rango de la longitud de onda que la misma intensidad de luz.

En tal sentido, otro estudio que corrobora tal resultado es He et al. (2023) aplicaron la *Chlorella sorokiniana* perteneciente a la misma familia, demostraron que al aplicar luz roja promovió a un mayor crecimiento celular, utilización del nitrógeno, carbono incluido un alto contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos cultivado en aguas residuales de acuicultura.

Figura 13

Crecimiento celular de la Chlorella vulgaris en reactor de 10 L



4.3.2. Remoción de DQO a escala de biorreactor

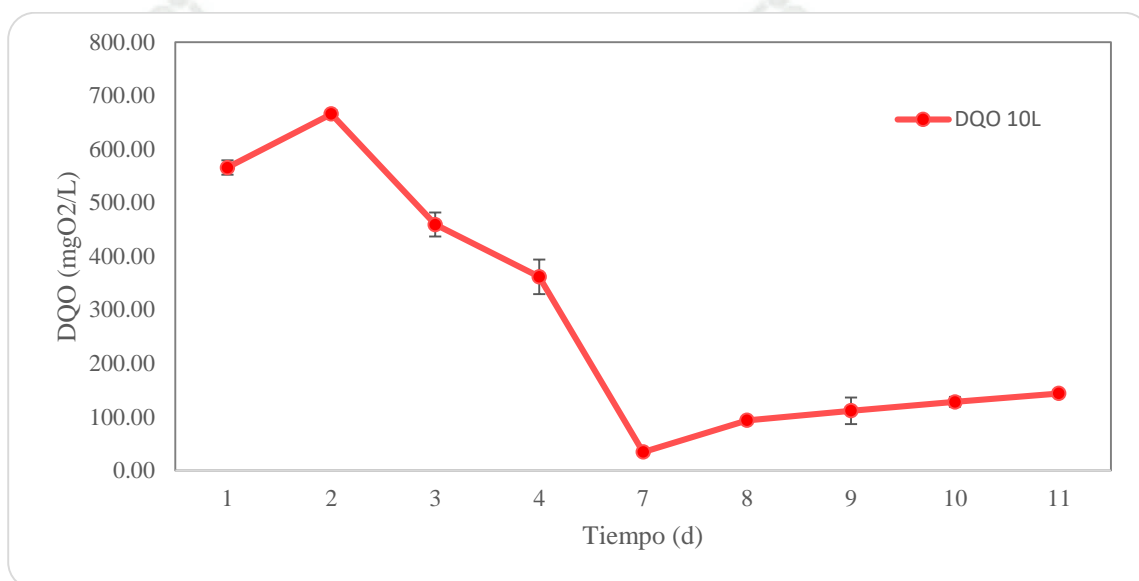
En esta etapa se analizó el parámetro químico de DQO, como se muestra en la Figura 14, la remoción de DQO llegó a su punto más bajo el día 7 con 111.5 mg/L y se obtuvo una remoción de DQO de 84 % siendo el tratamiento realizado a partir de la microalga *Chlorella vulgaris* con un volumen de 10 % y color de luz roja. Comparables con el estudio Cartagena & Malo (2017) que demostraron un tratamiento con un volumen igual de 10 % de *Chlorella vulgaris* obtuvieron una tasa de remoción de un 81.8 %. De manera similar Quispe (2023) obtuvo una remoción de DQO al 80.78 %, el cual se encuentra cercano al resultado de la investigación. Sin embargo, en la investigación de Iparragirre & Zamora (2023) reportó que el mayor porcentaje de remoción fue de (96.37 y 95.26) %.

La diferencia con la presente investigación se puede deber a la diferente cantidad de volumen de microalga utilizada con un tratamiento al 30 %, además de utilizar distintas especies de *Chlorella sp.* y factores de cultivo como color de luz, pH, temperatura, agitación, lo que da una mayor remoción de DQO, debido a una mayor presencia de microalgas para el proceso de

biotransformación. Dando referencia que la *Chlorella vulgaris* es muy adaptable a diversos mecanismos de acción, es eficiente para la depuración de contaminantes y calificado para incorporarse como tipo de tratamiento innovador. Así como Ruan et al. (2024), quienes reportaron una eficiencia de eliminación de DQO, que alcanzó un 87.79 % cabe resaltar, que utilizaron agua residual doméstica no esterilizada es decir es factible cultivar la *Chlorella vulgaris* en este tipo de aguas.

Figura 14

Remoción de DQO del agua residual en reactor de 10 L



De igual manera se realizaron mediciones de los principales parámetros con el agua tratada para tener valores referenciales y poder comparar con los valores iniciales tomados para ver el efecto de remoción de la microalga *Chlorella vulgaris*. Los resultados indicaron que si cumplió con el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, la comparación se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10

*Resultados del análisis de laboratorio comparando el agua residual no tratada y tratada con la microalga *Chlorella vulgaris**

Parámetro	Unidad	Resultado de agua residual no tratada	Resultado agua residual tratada	LMP para efluentes de PTAR
-----------	--------	---------------------------------------	---------------------------------	----------------------------

pH	-	7.9	8.4	6.5 – 8.5
Temperatura	°C	22	24.8	< 35
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	NMP/100mL	160 000 000	79.0	10,000
Coliformes Totales (NMP)	NMP/100mL	160 000 000	350	-
DBO	mg/L	332.1	43.6	100
Aceites y Grasas	mg/L	61.80	<5.00	20
SST	mg/L	270.0	16.41	150
DQO	mg/L	701.9	111.5	200
Fósforo Total	mg/L	13.95	15.26	-
Nitrógeno Total	mg/L	132.33	50.2	-

Los resultados finales de la caracterización fueron óptimos a partir del tipo de tratamiento propuesto como se observa en la Tabla 10 que fueron analizados por el laboratorio ALAB Analytical Laboratory acreditado por INACAL. El DQO presenta 111.5 mg/L además que cumplió con la normativa estando debajo del límite máximo permisible, en cuanto a los otros parámetros también se observa una reducción significativa (Anexo 4). Indicando así una alternativa de tratamiento eficiente frente o tratamientos convencionales.

De igual manera ocurrió con los parámetros nitrógeno con 50.24 mg/L y fósforo 15.26 mg/L se nota una reducción en comparación con la caracterización inicial del agua, aunque estos parámetros no están establecidos en la normativa son de gran importancia debido que se estudia en diversas investigaciones siendo un indicador primordial para la calidad de aguas residuales municipales Salem et al. (2023) indicó que la *Spirulina* tiene mayor capacidad de remediación en los parámetros de DQO, nitrato y cadmio en comparación con la especie *Chlorella vulgaris*, aunque cabe resaltar que el agua residual utilizada fue de forma sintética por lo que no se tuvo una exposición crítica frente a otros tipos de contaminantes.

Como se muestra los resultados del fósforo total no se tuvo una reducción, hubo un ligero incremento del fósforo total respecto al agua residual inicial sin algún tratamiento, pero es de considerar que en promedio se mantuvo muy cercano al resultado inicial. A nivel nacional no se tiene referencia de alguna norma para el límite máximo permisible del parámetro, por ello se asume que tal resultado es incierto por lo cual no se tiene una efectividad considerable.

Al realizar una comparación a nivel internacional de acuerdo a la normativa de México NOM-001-SERMARNAT-2021 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de

aguas residuales en cuerpos receptores como ríos, el parámetro de fósforo total establece un límite permisible de 15 mg/L en promedio mensual y 18 mg/L en promedio diario. Al examinar por la cantidad de 15.26 mg/L presentado en la Tabla 10, se podría inferir que el contenido de fósforo total es mínimo, es decir, se encuentra en el límite de la normativa mencionada. Según He et al. (2023) reportaron que la mayor remoción de fósforo total en agua residual deriva al aplicar la luz blanca, sin embargo, al aplicar con luz roja también presentó una tasa de remoción considerable.

También se afirma que las microalgas tienen preferencia por usar un derivado del nitrógeno entre ellos el amoníaco debido que se encuentra de una forma más simple, es decir, puede ser más fácil de metabolizar para las microalgas, siendo un nutriente esencial para el crecimiento y reproducción de la microalga *Chlorella vulgaris*, esto se presenta por las condiciones ambientales y disponibilidad de compuestos nitrogenados en el medio. En la Tabla 6 indica un alto valor de nitrógeno total a lo contrario del fósforo total correspondiente a la caracterización inicial del agua residual doméstica siendo el argumento más probable que pudo haber ocurrido en el tratamiento de la investigación. El amoníaco se está presente por la descomposición de materia orgánica y desechos de otros organismos. Por consiguiente, esta preferencia de amoníaco afecta al fosfato, una forma simple de fósforo definiendo como un fenómeno observado en ecosistemas acuáticos. Como se sabe el fósforo y nitrógeno son esenciales para el crecimiento de las microalgas, sin embargo, su uso puede variar. La preferencia que tienen las microalgas sobre el amoníaco, se debe a que el metabolismo del fosfato genera un mayor gasto energético, fomentando que las microalgas elijan el amoníaco pues conservan más su energía, obteniendo una reducción, cabe resaltar no se realizó una medición final de tal parámetro específicamente, pero el resultado mostrado con el nitrógeno total comprueba, que en relación con todas sus formas presentó una reducción significativa dado en la Tabla 9. (Yaakob et al., 2021; Delgadillo-Mirquez et al., 2016; Ramli et al., 2020; Gongü et al., 2025)

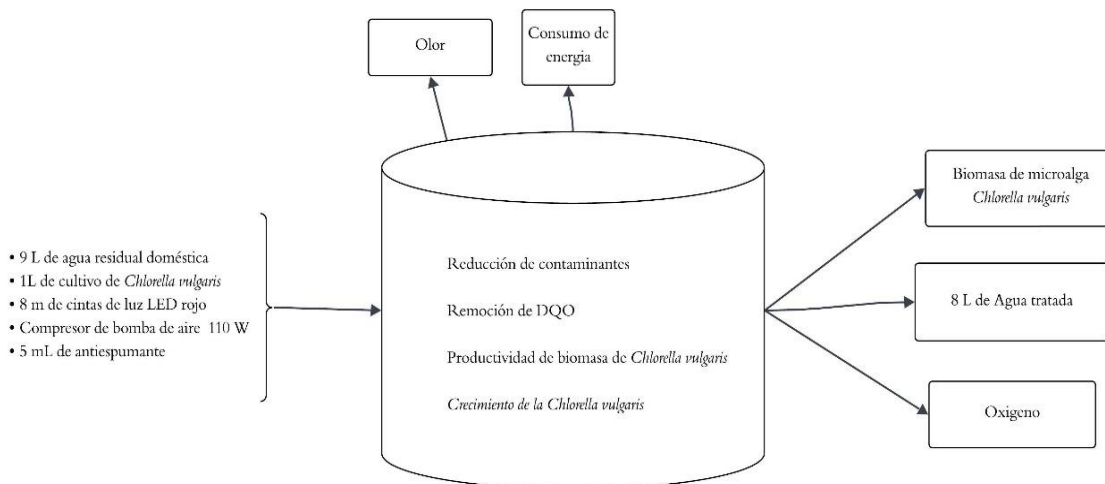
4.3.3. Balance de materia y energía del proceso de tratamiento de agua residual en el biorreactor

En la Figura 15 se muestra el balance de materia y energía en el biorreactor de 10 L, el cual tiene la finalidad de mostrar mejor entendimiento los parámetros esenciales y las condiciones operativas además de las variables utilizadas en la presente investigación (Razzak, 2025). En el ingreso consta del agua residual doméstica de la etapa preliminar, cultivo de *Chlorella vulgaris*, uso de luces LED, ingreso mixto de aire con CO₂ y el antiespumante. Por consiguiente, se obtuvo agua residual tratada, oxígeno y biomasa de la microalga, dándose principalmente el proceso de la reducción de contaminantes, remoción de DQO y otros parámetros, productividad de la biomasa residual de la microalga y por último crecimiento de la microalga inoculada con agua residual.

Cabe resaltar que el biorreactor utilizado en la investigación fue proporcionado por el laboratorio de la Universidad Católica de Santa María.

Figura 15

Diagrama de balance de materia y energía de biorreactor



Ecuación de Balance de materia y energía

9 L H₂O residual + 1 L *Chlorella vulgaris* + Luz + Nutrientes (N + P) + CO₂ + O₂ → 8 L H₂O tratada + biomasa algal + O₂ + 1 L H₂O evaporada + compuestos volátiles

Se reporta un rendimiento del 84% de remoción donde se obtuvo 8 L de agua residual tratada.

4.4. Evaluación del uso de la biomasa de *Chlorella vulgaris* para la producción de biodiésel derivado del tratamiento del agua residual doméstica de la PTAR La Escalerilla de Arequipa.

En base a la interacción que tuvo la *Chlorella vulgaris* con agua residual doméstica de manera directa, además, de promover la producción de lípidos con los tipos de color de luz para la elección. Adicional a ello, se utilizó tales metodologías como la extracción de lípidos con el método de Bligh & Dyer con ultrasonido debido al corto tiempo que se usa y genera una mayor eficiencia en el rompimiento celular en comparación con otros métodos como el Soxhlet. Además, se utilizaron tales compuestos químicos en la transesterificación teniendo en cuenta el trabajo crucial que tuvieron las microalgas tanto en la competencia dada con diversos microorganismos por la distribución de nutrientes y la eficiencia fundamentada en investigaciones anteriores. Por ello se optó por los métodos químicos que de alguna manera se iba satisfacer tales respuestas debido que la biomasa microalgal derivó de condiciones más adversas.

4.4.1. Separación de biomasa residual y extracción de lípidos

En la segunda etapa de la investigación se usó el residuo de la remediación, es decir la biomasa de la microalga para obtener un producto sostenible para ello se realizaron varias pruebas en menor cantidad, se usó 1 g de la biomasa recolectada del pretratamiento a partir del color de luz roja el cual se obtuvo 8.93 g de lípidos.

Para la separación de biomasa se utilizó un floculante para facilitar el proceso mencionado, sin embargo en algunas de las repeticiones que se realizaban al adicionar los 2.5 g de sulfato de aluminio no se lograron sedimentar del todo, manteniendo el color verde claro mínimo el cual según Zhu et al. (2020) indicaron que las microalgas evaluadas obtuvieron la dosis óptima de eficiencia al 90 % con 2.5 g de sulfato de aluminio, así como se encontró que el tiempo apropiado para la floculación de la biomasa de la microalga *Chlorella vulgaris* era de 10 min en este estudio. Espinoza (2018) de igual manera usaron sulfato de aluminio para separar el agua de la biomasa para poder reducir la turbidez.

Al presentar gran contenido de biomasa, se manifestó la probabilidad de que tal residuo tenga un alto contenido de lípidos, como lo mencionan Módenes et al. (2025) tuvieron un incremento en el rendimiento de lípidos al aplicar la luz roja, por lo tanto, la composición lipídica bajo la influencia de este tipo de luz genera una acumulación propia para un reaprovechamiento en la producción de lípidos.

Para la extracción de lípidos, se aplicó centrifugación para retirar la biomasa de microalgas. Se centrifugaron durante 15 min y luego se secaron para lograr un peso constante. Las muestras de biomasa de microalgas secas después de la floculación y la centrifugación se recolectaron y molieron para la extracción de lípidos. Después y conforme a lo planteado se utilizó cloroformo/metanol en proporción (1:2) para el proceso de extracción junto al equipo de ultrasonido, puesto que es uno de los métodos que han tenido mayor relevancia en los últimos tiempos ya que el tiempo de extracción es menor que otros métodos convencionales. El uso de metanol es necesario para el rompimiento de la capa de fosfolípidos dado que tiene atracción polar entre ellos. En otro estudio Oleas (2024), indica que tal proporción según los resultados obtenidos se catalogan como uno de los más eficientes para la extracción de lípidos, así como el inverso 2:1 cloroformo/metanol.

Esto se debe al enlace que sostiene con el ultrasonido ya que genera un mayor rendimiento, asimismo lo demostraron Krishnamoorthy et al. (2023) la alta eficacia del método de ultrasonido para extraer lípidos de microalga en este caso dos tipos *Chlorella vulgaris* y *Nannochloropsis oculata*. En otro estudio Dos Santos et al. (2015), de la misma manera informaron que el uso del equipo de ultrasonido beneficia la extracción de lípidos con una alta eficiencia del 19 % de lípidos, además indican que la

mezcla metanol/ cloroformo aseguran una buena extracción de lípidos, principalmente el cloroformo que extrae lípidos neutros y el metanol lípidos polares.

4.4.2. Rendimiento de lípidos

La extracción de lípidos se dio a través de la biomasa seca de la microalga *Chlorella vulgaris* ya que, según Vega (2022), es difícil calcular el volumen de biomasa seca en biomasa húmeda ya que no se puede estimar la cantidad de biomasa húmeda a partir del peso seco, además que la biomasa con agua es una barrera para los solventes para ingresar a la membrana celular y liberación de lípidos. Posteriormente, se obtuvo el peso del lípido que fue de 8.93 g el cual resultó del filtrado y 0.8 g de biomasa seca que se acentuó en el papel filtro una vez secado como se observa en la Figura 37. Los datos mencionados se calcularon en la Ecuación 5.

$$\frac{8.93 \text{ g de aceite}}{0.8 \text{ g de biomasa}} \times 100 \% = 11.16 \%$$

Ecuación (5)

Nota. Nurfarahanim et al., (2017)

En los resultados de rendimiento de lípidos proveniente de la biomasa seca de agua residual municipal con *Chlorella vulgaris* aplicada con el color de luz roja, donde se usó una proporción de 2:1 metanol/cloroformo resultó un 11.16 % de rendimiento, siendo el más idóneo para la producción de lípidos. Sin embargo, el estudio de Vega (2022) obtuvo una mejor respuesta en la obtención de lípidos con 23 % posiblemente se deba porque utilizó 6 g de microalga seca, a comparación de este estudio que se utilizó 1 g de microalga seca. Además, según la investigación Oleas (2024) reportó que el color de luz azul resultó con un porcentaje de 18.93 % usando el solvente cloroformo/metanol, sin embargo, proviene de un tratamiento con agua residual avícola. Asimismo, en la investigación dada por Sánchez-Saavedra et al. (2020) reportaron que la luz azul predominó para la productividad de lípidos, en este caso, utilizaron medio de cultivo, por ende la microalga *Chlorella vulgaris* no estuvo sometida a la adaptación de agua residual tipo doméstica de manera que interviene en los resultados de tal evaluación por tipo de luz.

El valor de porcentaje del lípido está muy relacionado a factores como la fase de crecimiento con ello influye significativamente para la producción de biodiesel, sin embargo, la mayoría establece un rango de (15 al 30) % de rendimiento aunque podría ser mayor, de acuerdo a los resultados obtenidos no se encuentra dentro del rango, debido a algún error que se realizó durante la experimentación, sin embargo, hay otros estudios que indican tales rendimientos en base a 1 g de biomasa seca de *Chlorella vulgaris*. (Rodríguez, 2023)

En estudios previos, Krishnamurthy et al. (2023) reportaron rendimientos de lípidos del 11.52 % en *Chlorella vulgaris*, empleando también el método de extracción por ultrasonido. Estos resultados son comparables con los obtenidos en la presente investigación, lo cual refuerza la validez del enfoque metodológico utilizado. Asimismo, los hallazgos aquí presentados incorporan aspectos innovadores que podrían contribuir significativamente al desarrollo de estrategias más eficientes para la producción de biocombustibles a partir de microalgas.

Además, se encontró que al mismo tiempo que favorece al incremento en la acumulación de lípidos como afirmaron Zheng et al. (2024), también influye en el aumento de azúcares y proteínas, este suceso, es probable se haya presentado porque se utilizó más fuentes de carbono, es decir, se tuvo un acoplamiento idóneo de carbono-nitrógeno, temperatura y fotoperiodo generando aumento en la producción de lípidos entre otros.

4.4.3. Rendimiento de biodiesel

Una vez extraídos los lípidos, se procedió a la obtención de biodiésel, alcanzándose 10.75 g, lo cual indica un volumen relativamente reducido. Este resultado se obtuvo mediante un proceso de transesterificación, en el cual se empleó metóxido de sodio como catalizador principal. En la experimentación se tomó en cuenta la proporción (1:6) de lípido con metanol debido que es necesario para un adecuado proceso de transesterificación. Mientras el rendimiento de biodiesel de la presente investigación fue del 96% a partir de la producción de biodiesel. En diversas investigaciones se ha visualizado que tal rendimiento óptimo se encuentra en el rango de (10 al 50) % (Rodríguez, 2023). Por tanto, el resultado obtenido supera este rango, demostrando una alta eficiencia del proceso. Además, Rodríguez (2023), reportó que realizó el proceso de transesterificación con 200 μ L de lípidos obteniendo un rendimiento del 90 % de biodiesel por ende el proceso fue efectivo, por ello se estima que a pesar de utilizar cantidades mínimas para las pruebas de biodiesel no es dependiente para la efectividad, sin embargo, si es influenciada por la fase de crecimiento del cultivo, medio de cultivo, la técnica de extracción de aceite indica la cantidad y calidad de lípido obtenido. Así como menciona Goicochea (2021) que en varios estudios se observó que las menores producciones de biomasa seca producen los más altos porcentajes de lípidos.

En otro estudio De Souza (2018), mostró que tuvo un rendimiento del 96.6 % de biodiesel el cual establece un alto contenido de ácidos grasos saturados. Por ende, el porcentaje de rendimiento dado en la experimentación muestra una gran eficiencia, al comparar con otras evidencias como Arce (2018) este presentó un rendimiento menor de 85.6 % debido que trabajó con un método convencional Soxhlet y con el solvente hexano. A la vez Merma et al. (2017), obtuvieron un rendimiento del 83.33 % a partir de la *Chlorella vulgaris*, por lo que demuestra que presenta gran

efectividad para la producción de biodiesel. De manera similar Damián & Vásquez (2021), indicaron que mediante la investigación sistémica que realizaron a 18 autores, el porcentaje de biodiésel obtenido se registró en un rango del (40 al 100) % de efectividad, lo que indica que no es necesario que la concentración del medio de cultivo sea mayor al contenido de biodiesel.

Por otro lado, en el presente estudio Zheng et al. (2024) evaluaron la calidad del biodiesel sometido a varios fotoperiodos indicando que en 24/0 h estuvo ligeramente menor el rendimiento en contraste al fotoperiodo de 18/6 h, sin embargo, ambos cumplen con la normativa internacional comparada en tal estudio, por lo que una vez más se determina que extender el tiempo en la luz mejora en las características de biodiesel y de igual manera bajo los otros parámetros principales como carbono-nitrógeno, temperatura e intensidad de luz.

4.4.4. Análisis costo-beneficio ambiental

El propósito de este estudio es llevar a cabo un método visionario de tratamiento de agua residual municipal mediante el uso de la microalga *Chlorella vulgaris* y de manera simultánea, recuperar los residuos generados, es decir la biomasa algal y aprovecharla a través de la producción de biodiésel. Esta propuesta se fundamenta en la optimización de los costos operativos requeridos y en la estimación anual del tiempo de procesamiento.

Acotando lo mencionado anteriormente, la investigación compone de 4 procesos importantes para su desarrollo tal como lo distribuyen Liu et al. (2024) producción de microalgas, cosecha, extracción de compuestos con alto contenido de lípidos y transesterificación para producción de microalgas. Analizando la etapa de producción de microalgas que se realizó es de considerar que si se obtuvo una reducción en el uso de recurso del agua para el cultivo de microalgas debido que se utilizó agua residual doméstica y a la vez se realizó una biorremediación simultánea.

Esta primera etapa de la investigación tiene un alto potencial económico debido que la principal fuente de producto bruto es el agua residual que no indica costo significativo. Solo se requiere una adecuada gestión para alcanzar a las partes interesadas del presente proyecto. Asimismo, el color de luz siendo un parámetro esencial, producido a través de alternativas renovables como el uso de luz solar. En este sentido, debido que en la ciudad de Arequipa cuenta con radiación de luz solar durante todo el año, siendo una ventaja óptima para su ejecución. Además, este proceso contribuye a que la microalga capte dióxido de carbono del aire y lo transforma en compuestos orgánicos como azúcares y lípidos, los cuales pueden ser posteriormente procesados para obtener biocombustibles mediante rutas bioquímicas específicas. Dentro de este grupo, la especie *Chlorella vulgaris* destaca por su alta eficiencia en la fotosíntesis, lo que le permite absorber grandes volúmenes de CO₂, un gas responsable del calentamiento global debido a su abundancia en la atmósfera. Además, esta microalga presenta un perfil nutricional notable, rico en proteínas, vitaminas, minerales, fibra

dietética y antioxidantes. Gracias a su capacidad para eliminar toxinas, también se ha utilizado tanto como complemento alimentario como en procesos de depuración de aguas residuales, evidenciando su versatilidad en aplicaciones ambientales y nutricionales (Arce, 2018).

En esta especie, el proceso de asimilación del carbono ocurre mediante la acción de la enzima anhidrasa carbónica, ubicada dentro del cloroplasto, donde transforma el CO₂ en bicarbonato (HCO₃⁻) a través de un mecanismo de transporte activo celular, liberando al mismo tiempo oxígeno molecular al entorno (Vega, 2022). La captación de dióxido de carbono es considerada uno de los principales aportes positivos del cultivo de microalgas con fines bioenergéticos. Según el contenido de carbono presente en la biomasa y la proporción de masas, se estima que, como mínimo, las microalgas pueden fijar 1.83 kilogramos de CO₂ por cada kilogramo de biomasa generada. No obstante, en condiciones reales, la cantidad de dióxido de carbono que se introduce en los sistemas de cultivo suele superar ese valor, debido a pérdidas por desgasificación, fenómeno especialmente común en los sistemas abiertos (Jonker et al, 2013).

Sin embargo, es de examinar que al momento de hacer el escalamiento a 10 L se tuvo que incrementar la cantidad de *Chlorella vulgaris*, por lo que al considerar realizar a escala industrial es necesario que el cultivo de la *Chlorella vulgaris* sea en mayor proporción, además que las condiciones a utilizar se verán influenciadas por las condiciones ambientales del lugar (Abdelfattah et al., 2023). Asimismo, en la cosecha, la etapa de separación de la *Chlorella vulgaris* con el agua residual tratada se tuvo mucha dependencia de un agente químico como el sulfato de aluminio para la floculación por ello, es posible estudiar otra alternativa más sostenible como otro tipo de floculante puede ser de origen natural. Cabe resaltar que el proceso de floculación es más efectivo debido al consumo menos de energía y tiene una menor inversión.

Cada vez esta alternativa ha demostrado ser más viable a escala industrial, por ejemplo en Argentina ya cuenta con la primera planta tratamiento de aguas municipales con microalgas perteneciente a la empresa Agua y Saneamientos Argentinos (AySA), ubicada en la ciudad de Aldo Bonzi, en asociación con la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA), la PTAR tiene la capacidad de remediar hasta 24 mil L de agua residual y obtener 760 g de biomasa microalgal (Agencia CTyS Ciencia Tecnología y Sociedad, 2023). Por otro lado, es fundamental considerar diversos factores para como monitorear constantemente la distribución de nutrientes, optimizar el rendimiento de biomasa, extracción de lípidos y el proceso de transesterificación que contempla insumos químicos necesarios para su producción de biodiesel.

La siguiente etapa fue la extracción de lípidos y transesterificación para la producción de biodiesel que se utilizó mayormente productos químicos de este modo, es de considerar que se necesita una mayor inversión para su producción lo cual aún es necesario mayores estudios para ser competitivo en el mercado de los combustibles. Además, para el rompimiento de la pared celular se optó por el ultrasonido y los reactivos químicos, sin embargo, a nivel medio ambiental los compuestos

químicos si generan un impacto significativo que se tendrá que analizar en caso se realice un mayor escalamiento.

Sin embargo, también se obtienen un valor agregado ya que la biomasa obtenida a partir de microalgas, debido a su elevado contenido de carbohidratos, también puede ser utilizada para producir biocombustibles sólidos como los pellets. Estos pueden generarse directamente a partir de la biomasa cultivada o bien empleando los residuos remanentes del proceso de extracción de lípidos o de la transesterificación utilizada en la síntesis de biodiésel. La tecnología de pelletización, que se basa en la compactación mecánica de biomasa a través de una matriz perforada, representa una alternativa eficiente para valorizar estos residuos, especialmente cuando se busca su aprovechamiento energético mediante combustión en calderas de biomasa (Aketo et al, 2020).

Los pellets que se obtienen suelen presentar una forma cilíndrica, con un diámetro de entre 7 y 22 mm y una longitud que varía de 35 a 65 mm, y deben cumplir ciertos estándares de calidad para garantizar un rendimiento adecuado en los sistemas de combustión. El uso de residuos algales como materia prima para la elaboración de pellets no solo permite reducir el volumen de desechos — contribuyendo a disminuir los costos de transporte y almacenamiento—, sino que también responde a la creciente necesidad de diversificar las fuentes de biomasa frente al aumento de la demanda de este tipo de energía renovable. (Salgueiro, 2018)

Según Liu et al. (2024) indicaron en caso se realice en una instalación a pequeña escala la recuperación de la inversión es de 5 a 10 años, para que sea más rentable se ha de tener en cuenta la ubicación de la planta, uso de los recursos locales y uso de energías renovables es fundamental para bajar los costos. Además, realizaron un análisis técnico-económico, en el que estimaron el precio por producción de una tonelada de microalgas va entre (150 y 6000) \$ que dependerá de acuerdo al método del cultivo, con una producción de 500 toneladas de *Chlorella vulgaris*, el costo de producción de lípidos por kilogramo heterotrófico de \$ 7.5 y fototrófico es \$ 480 siendo 65 veces mayor, mientras que el costo de producir un galón de biodiesel es entre (5 a 22) \$ por galón, sin embargo, en ambos, no es competitivo aun con el costo de producción de diésel de petróleo. Ante ello mencionan alternativas de mejora, como utilizar proceso de floculación, equipos de ultrasonido y realizar transesterificación insitu directa.

No obstante, al combinar con la primera etapa de la investigación, más la utilización de floculación para la separación de biomasa y ultrasonido para el rompimiento celular en la etapa de extracción. Ante ello, se puede inferir que tales costos bajarían por tal motivo, son considerados un gran potencial comercial solo que es necesario más investigaciones para disminuir tales costos como mejorar en las estrategias asociadas entre la producción y comercialización de biodiesel derivado de microalgas.

Un ejemplo de ello, según Ianda et al. (2022) en la ciudad de Guinea-Bissau, analizaron el panorama energético, desarrollándose una simulación técnico-económica para determinar la viabilidad de producir biodiésel a partir de microalgas. Empleando un software de simulación comercial modeló

todo el proceso, desde el cultivo algal hasta la conversión industrial del lípido en biodiésel. Donde se obtuvo que la planta simulada sería capaz de generar 2.000 m³ de biodiésel al año, con un costo estimado de producción de \$ 0.9 /kg. Resultando altamente competitivo en comparación con el precio del diésel en el mercado local, lo que sugiere que podría ser una solución energéticamente viable y económicamente atractiva.

Otro estudio de Branco-Vieira et al. (2020) analizaron la viabilidad económica de la producción de biodiésel a partir de microalgas desde su instalación hasta la producción de biodiesel. Los resultados de su análisis estimaron que el costo de producción del biodiésel alcanzaría 0.33 euros/L, mientras que la producción de biomasa algal tendría un costo de 2.01 euros/kg. Sin embargo, considerándose la valorización de subproductos, la biomasa residual y el glicerol generado durante el proceso, la recuperación de la inversión inicial establece un periodo de 5 a 10 años.

A continuación, en la Tabla 11 se muestra el costo aproximado de la metodología aplicada en la presente investigación el cual detalla tanto la muestra inicial, equipos e insumos utilizados de acuerdo a las actividades desarrolladas para la ejecución del estudio. Dando un costo final de S/ 137,555.65 a nivel de laboratorio. Cabe precisar que el costo de equipos muestra un monto relativo con el fin tener una estimación base en caso, en posteriores estudios se realice a mayor escala u otros fines relacionados.

Tabla 11

Costo total de la metodología aplicada en la investigación

Detalle	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
Cultivo de microalga					
Gasto de insumos	BBM	L	1	S/14.63	S/14.63
	Microscopio	Und	1	S/5,296.45	S/5,296.45
	Microalga	mL	200	S/250.00	S/50,000.00
Tratamiento de agua residual					
Gastos de materiales del cultivo y tratamiento	Iluminación artificial (LEDs)	M	20	S/8.00	S/160.00
	Bombas de aireación	Und	2	S/25.00	S/50.00
	Cajas	Und	1	S/50.00	S/50.00
	Termómetro digital	Und	1	S/50.00	S/50.00
Equipos para análisis de DQO	Digestor	Und	1	S/5,636.27	S/5,636.27
	Espectrofotómetro	Und	1	S/29,441.54	S/29,441.54
	Ácido sulfúrico	Und	3	S/80.00	S/240.00

Insumos químicos para análisis de DQO	Solución digestora	L	3	S/200.00	S/600.00
Análisis experimental antes y después del tratamiento de agua	pH, DQO, DBO, Aceites y grasas, Fósforo Total, Nitrógeno total, SST, Metales totales Coliformes fecales, Coliformes totales.	Und	2	S/397.00	S/794.00
Cosecha de microalgas					
Insumos químicos Floculación	Sulfato de aluminio	Kg	1	S/5.00	S/5.00
Equipos para el proceso de secado	Estufa	Und	1	S/2,805.97	S/2,805.97
	Centrífuga	Und	1	S/2,146.04	S/2,146.04
Extracción de lípidos					
Insumos químicos Metodo bligh & dyer	Metanol	mL	500	S/50.00	S/50.00
	Cloroformo	L	1	S/64.50	S/64.50
Equipos	Baño Ultrasonido	Und	1	S/6,927.42	S/6,927.42
	Rotavapor	Und	1	S/31,325.65	S/31,325.65
Agente adsorbente	Carbón activado	G	100	S/50.00	S/10.00
Transesterificación					
Insumos químicos	Metanol	mL	500	S/120.00	S/50.00
	Catalizador (Hidróxido de sodio)	L	1	S/80.00	S/80.00
Equipos	Agitador magnético	Und	1	S/1,758.18	S/1,758.18
TOTAL					S/137,555.65

Tabla 12

Reajuste de los costos estimados

Como se muestra en la Tabla 12 corresponde al reajuste de costo por la depreciación o disminución de la capacidad productiva de acuerdo al uso que se tenga de los equipos. A partir de los siguientes datos

Detalle	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Costo fijo total	Costo variable total
BBM	L	1	14.63	14.63	-
Microscopio (amortizado)	Und	1	300	300	-
Microalga (ajustado)	mL	200	1.25	-	250
Iluminación artificial (LEDs)	M	20	8	160	-
Bombas de aireación	Und	2	25	50	-
Cajas	Und	1	50	50	-
Termómetro digital	Und	1	50	50	-
Digestor (amortizado)	Und	1	300	300	-
Espectrofotómetro (amortizado)	Und	1	1200	1200	-
Ácido sulfúrico	Und	3	80	-	240
Solución digestora	L	3	200	-	600
Análisis antes y después (2 muestras)	Und	2	397	794	-
Sulfato de aluminio	Kg	1	5	-	5
Estufa (amortizado)	Und	1	140.3	140.3	-
Centrífuga (amortizado)	Und	1	107.3	107.3	-
Metanol (extracción)	mL	500	0.1	-	50
Cloroformo	L	1	64.5	-	64.5
Baño Ultrasonido (amortizado)	Und	1	350	350	-
Rotavapor (amortizado)	Und	1	800	800	-
Metanol (transesterificación)	mL	500	0.1	-	50
Hidróxido de sodio	L	1	80	-	80
Agitador magnético (amortizado)	Und	1	300	300	-
TOTAL				4616.23	1339.5

se estima la ganancia y punto de equilibrio del análisis costo beneficio propuesto.

Tabla 13

Proyección de ventas

Tiempo	Producto
Mes	Biodiesel (L)
12	130

Total

1560

En la presente Tabla 13 indica el monto proyectado de ventas que se pretende producir por cada mes correspondiente a 130 L. Con tales datos se calculó el costo fijo unitario y costo variable unitario para hallar el costo fijo unitario que se muestra a continuación:

COSTO FIJO UNITARIO

$$A = \frac{\text{Costo fijo total}}{\text{N}^\circ \text{ total de unidades producidas durante el ciclo de vida del proyecto}}$$

Ecuación (6)

$$A = \frac{4616.23}{1560} = 2.95 \text{ soles}$$

COSTO VARIABLE UNITARIO

$$B = \frac{\text{Costo variable total}}{\text{N}^\circ \text{ total de unidades producidas en un periodo de tiempo}}$$

Ecuación (7)

$$B = \frac{1339.5}{130} = 10.30 \text{ soles}$$

COSTO TOTAL UNITARIO

$$C = A + B$$

Ecuación (8)

$$C = 2.95 + 10.30 = 13.26 \text{ soles}$$

Una vez obtenido el costo unitario se calculó la ganancia estimada teniendo en cuenta el precio de mercado del biodiesel mediante la siguiente ecuación:

PRECIO DE VENTA MERCADO = 14.79 soles (Precio de referencia de Osinergmin)

G=GANANCIA

$$\text{PRECIO DE VENTA MERCADO} = C + G$$

Ecuación (9)

$$14.79 = 13.26 + G$$

$$G = 1.52 \text{ soles}$$

Posteriormente para hallar el punto de equilibrio, se debe tener en cuenta establecer la propuesta de precio de venta basado en el precio de venta mercado y costo total unitario, asimismo, se estimó la contribución marginal tal como se detalla a continuación:

PRECIO DE VENTA PROPUESTO=14 soles

Contribución marginal = Precio de venta propuesto – Costo variable unitario

Ecuación (10)

Contribución marginal = 14 – 10.30 = 3.70 soles

Punto de equilibrio = $\frac{\text{Costo fijo total}}{\text{Margen de contribución}}$

Ecuación (11)

Punto de equilibrio = $\frac{1416.23}{3.70} = 1249 \text{ L de biodiesel}$

Con una producción de 1249 L de biodiésel, el proyecto empieza a generar beneficios económicos netos. Por consiguiente, se llegará al punto de equilibrio en el cual los ingresos totales son iguales a los costos totales, es decir, donde no existe pérdida ni ganancia.

Asimismo, con la finalidad de un análisis más exhaustivo en la etapa de extracción de lípidos, debido que se considera como la actividad con mayor uso de equipos e insumos, por lo cual se presenta una comparación con otras metodologías (Tabla 14), para fundamentar la elección del Método Bligh & Dyer como método potencial a utilizar.

Tabla 14

Comparativa de las metodologías de extracción de lípidos

Métodos	Solventes	Equipamiento	Tiempo de extracción	Ventajas	Desventajas
Bligh & Dyer ultrasonido	Cloroformo y metanol	Ultrasonido, Rotavapor, Centrifuga Estufa	1-2 h	-Extracción rápida -Mejora la disrupción	-Requiere equipo adicional -Puede

				celular	producir
				-Menor volumen de solvente	emulsiones difíciles de separar
Soxhlet	Hexano, etanol y agua	Soxhlet, Rotavapor Manta calefactora Bomba de vacío Estufa	4-8 h	-Alta eficiencia de extracción con solventes apolares	-Consumo elevado de solvente
				-Extracción continua	-Alto consumo energético
					-Tiempo prolongado
Folch	Cloroformo, metanol y solución de NaCl	Rotavapor	0.5-1 h	-Alta eficiencia para todo tipo de lípidos (neutros y polares)	-Uso de solventes tóxicos (cloroformo)
				-Buena reproducibilidad	-Manejo laborioso con múltiples pasos de separación
				-Menor degradación térmica	
				que Soxhlet	

Fuente: (Pavez, 2023; Rodríguez, 2023; Onay et al., 2016; Barou et al., 2024)

Los métodos de extracción de lípidos a partir de microalgas son importantes, ya que en este se evalúa directamente el rendimiento, donde la extracción con solventes es la más usada ya que logra recuperar la mayor cantidad de lípidos. Por lo que se evaluó algunas de sus ventajas y desventajas como el tiempo del proceso y los costos asociados. Se compararon tres metodologías Soxhlet, Folch y Bligh & Dyer con asistencia de ultrasonido, cada una con características particulares como se muestra en la Tabla 14. Según lo analizado el método Folch y Bligh & Dyer requieren solventes tóxicos como el cloroformo, aunque el método Folch cuenta con múltiples pasos de separación y se debe tener más precisión.

Otra característica importante es el tiempo de operación desde 8 h del método Soxhlet a 1 h del método Folch, lo cual resulta relevante debido al impacto en el consumo energético. Asimismo, la reducción en el volumen de solventes requerido como el método Bligh & Dyer que es una opción más eficiente desde el punto de vista económico y ambiental. Para aplicaciones en mayor escala se debe priorizar la eficiencia energética, el tiempo de extracción y la sostenibilidad, por lo que el

método Bligh & Dyer y el uso de ultrasonido puede representar una buena opción, especialmente si se busca optimizar el proceso.

Tabla 15

Comparación de costos de solvente y gasto energético de las metodologías

Métodos	Costos solventes	Costo de Gasto Energético	Total
Bligh y Dyer + ultrasonido	164.5	2.16	166.66
Soxhlet	133	6.69	139.69
Folch	184.5	0.35	184.85

Según la Tabla 15 podemos observar que se realizó el análisis de gasto energético y gasto por tipo de solventes, siendo el método Soxhlet el más económico seguido del método aplicado en esta investigación Bligh & Dyer + ultrasonido, mientras que el método Folch se posiciona como el más costoso. Se sabe que el método Soxhlet es el más convencional y relativamente económico, sin embargo, en contraste al método aplicado Bligh & Dyer + ultrasonido se tiene un costo medianamente más elevado por el uso de los solventes cloroformo y metanol. Por lo que se debe considerar otras características como se mencionó anteriormente el volumen mínimo de solvente utilizado y el tiempo de operación el cual influyó en la elección de la metodología a utilizar.



CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

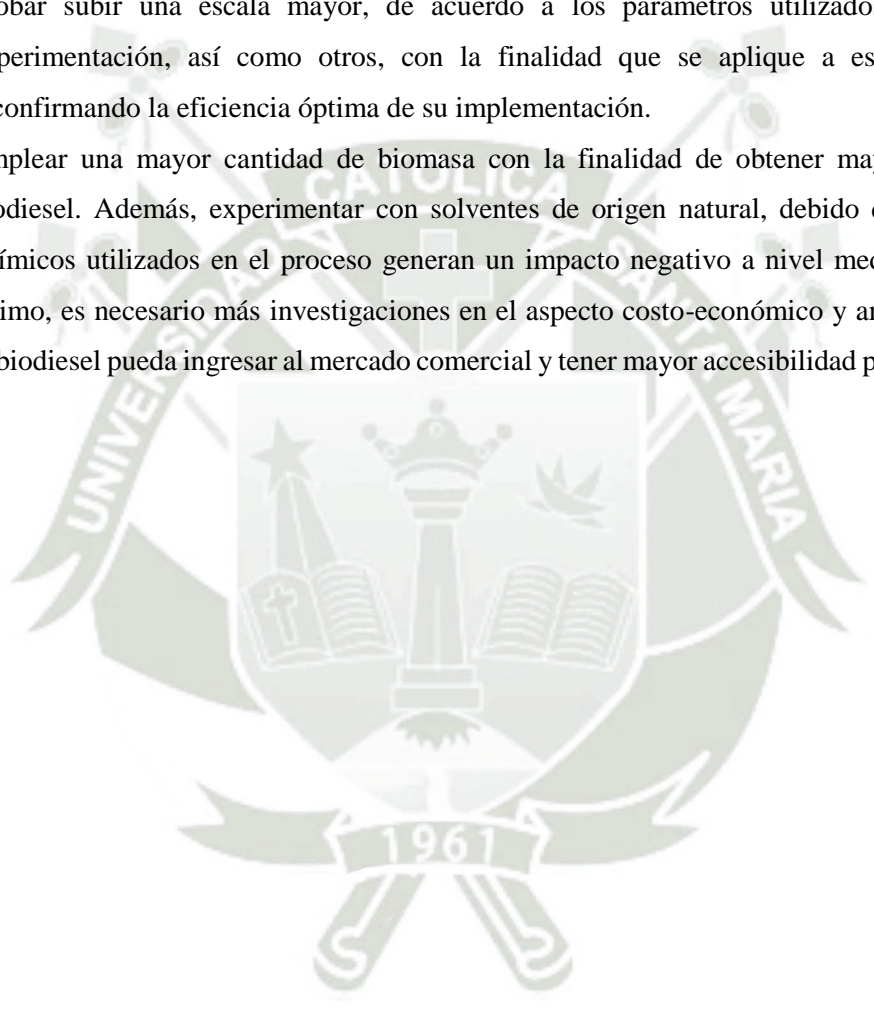
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se determinó que la concentración inicial de diferentes parámetros de las aguas residuales de la PTAR la Escalerilla, excedieron los Límites Máximos Permisibles (LMP). De acuerdo con el análisis de DQO inicial, fue de 701.9 mg/L. A pesar de las altas concentraciones de contaminantes, el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* en el agua residual doméstica fue positivo, lo que sugiere una adaptabilidad óptima de esta especie en el agua residual doméstica La Escalerilla de Arequipa.
- Se determinó el crecimiento y reducción del nivel de DQO con fuentes de iluminación blanca, roja, azul y roja/azul de la microalga *Chlorella vulgaris* en aguas residuales municipales de Arequipa. Siendo el color de luz roja la que presenta mayor concentración de *Chlorella vulgaris* de 130,312,500 cel/mL y mayor reducción de DQO de 50 mg/L.
- Se determinó que realizar a un escalamiento de 10 L es óptimo para la biorremediación de agua residual doméstica con *Chlorella vulgaris*, el cual logró un crecimiento superior y un rendimiento de DQO del 84 % que confirma su alta adaptación a condiciones extremas, además que resultó 111.5 mg/L de DQO encontrándose por debajo del límite máximo permisible establecido en la normativa ambiental D.S. N° 003-2010-MINAM. No obstante, es importante tener en cuenta que en la presente investigación no se logró una reducción significativa del fósforo total, ya que se mantuvo en promedio un valor similar al de la caracterización inicial.
- En la extracción de lípidos presentó un rendimiento del 11.16 % a partir de 1g de biomasa residual de la microalga *Chlorella vulgaris*, por consiguiente, resultó un rendimiento del 96 % de producción de biodiésel. Se concluye la alta efectividad y una prometedora asociación del tratamiento de agua residual para la producción de biocombustibles, puesto que la biomasa residual si presentó lípidos para la generación del producto propuesto. Sin embargo, los equipos de extracción y reactivos elevan significativamente los costos operativos y limitan su aplicación.

5.2. Recomendaciones

- Realizar pruebas con diferentes especies de microalga que puedan tener gran capacidad de crecimiento en aguas residuales y producción de biodiesel para que puedan contribuir a identificarse más especies con alta capacidad de adaptación.
- Estudiar otros posibles parámetros para el tratamiento de aguas residuales domésticas que nos pueda dar un mejor enfoque de la remoción para mejorar la eficiencia del proceso y su implementación a escala industrial.
- Probar subir una escala mayor, de acuerdo a los parámetros utilizados en la presente experimentación, así como otros, con la finalidad que se aplique a escala industrial y reconfirmando la eficiencia óptima de su implementación.
- Emplear una mayor cantidad de biomasa con la finalidad de obtener mayor contenido de biodiesel. Además, experimentar con solventes de origen natural, debido que los solventes químicos utilizados en el proceso generan un impacto negativo a nivel medioambiental. Por último, es necesario más investigaciones en el aspecto costo-económico y ambiental para que el biodiesel pueda ingresar al mercado comercial y tener mayor accesibilidad para su utilización.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S.-H., Elsamahy, T., Li, S., El-Sheekh, M. M., Schagerl, M., Kornaros, M., & Sun, J. (2023). Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science and Ecotechnology*, 13, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.es.2022.100205>
- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Ahmad .F, Khan A.U, Yasar .A, (2013). The potential of *Chlorella vulgaris* for wastewater treatment and biodiesel production. 45(S1): 461-465. [https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/45\(S1\)/61.pdf](https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/45(S1)/61.pdf)
- Agencia CTyS Ciencia Tecnología y Sociedad. (14 de noviembre del 2023). Utilizan microalgas para el tratamiento de aguas cloacales en una planta en Aldo Bonzi. <https://www.ctys.com.ar/interdisciplinario/utilizan-microalgas-para-el-tratamiento-de-aguas-en-una-planta-en-aldo-bonzi/>
- Aguilar, M., J., A. (2022). Tratamiento de aguas residuales con el uso de la microalga *Chlorella vulgaris* para la remoción de materia orgánica [Tesis de grado, Universidad Científica del Sur] <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/2828>
- Agüero-Quñones, R., Ávila-Sánchez, Z., Rojas-Flores, S., Cabanillas-Chirinos, L., Cruz-Noriega, MDL, Cruz-Monzón, J., & Nazario-Naveda, R. (2023). Cadmium and COD Removal from Municipal Wastewater Using *Chlorella sp.* Biomass in Microbial Fuel Cells. *Sostenibilidad*, 15 (19), 14513. <https://doi.org/10.3390/su151914513>
- Aketo, T., Hoshikawa, Y., Nojima, D., Yabu, Y., Maeda, Y., Yoshino, T., Tanaka, T. (2020). Selection and characterization of microalgae with potential for nutrient removal from municipal wastewater and simultaneous lipid production. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 129(5), 565-572. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.12.004>
- Alberca, L. A. D., Mae P. S. A., Mae L. S.P., Casisola. D. C., Lee, I. C. A. (2023). Bioremediation by *Chlorella Vulgaris*: Potentials for Treatment of Municipal, Agricultural, and industrial Wastewater Sources. [Tesis de grado, Laguna State Polytechnic University] <https://doi.org/10.32942/X2ZC7R>
- Alazaiza, M. Y. D., He, S., Su, D., Abu Amr, S. S., Toh, P. Y., & Bashir, M. J. K. (2023). Sewage Water Treatment Using *Chlorella Vulgaris* Microalgae for Simultaneous Nutrient Separation and Biomass Production. *Separations*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/separations10040229>

- Amin, M., Tahir, F., Ashfaq, H., Akbar, I., Razzaque, N., Haider, M. N., Xu, J., Zhu, H., Wang, N., & Shahid, A. (2022). Decontamination of industrial wastewater using microalgae integrated with biotransformation of the biomass to green products. *Energy Nexus*, 6, 100089. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100089>
- Apaza, A.H, Gómez C.C, Rodríguez M.J.L. (2020). Evaluación del aceite producido por las microalgas “*Scenedesmus obliquus*” y “*Chlorella vulgaris*”, como biodiésel en un sistema raceway modificado. *Revista Científica de Investigaciones Ambientales*, Vol. 1, N° 1, pp. 10-24.
- Autoridad Nacional del Agua. (2019). Ley de Recursos hídricos (Ley N° 29338). <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/228/ANA0000044.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (Decreto Supremo N° 001-2010-AG). <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4665>
- APHA, AWWA, WEF (2012) Standard Methods for Examination of Water and Waste Water. 22nd Edition, American Public Health Association, Washington DC.
- Arce, P. J. A. (2018). Caracterización fisicoquímica de biodiésel a partir de la microalga *Chlorella vulgaris*, obtenida en fotobioreactor tubular. [Tesis de Título, Universidad Nacional de San Agustín] <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6845>
- Barou, N., Wind, J., Chuat V., Gagnaire V., Valence F., Bourlieu-Lacanal C. and Subileau M. (2024) Variations in *Chlorella* lipid content in commercial and in-lab produced biomass. *Oilseeds & fats crops and lipids*, 9, 13. <http://doi.org/10.1051/ocl/2024005>.
- Branco-Vieira, M., Mata, T. M., Martins, A. A., Freitas, M. A. V., & Caetano, N. S. (2020). Economic analysis of microalgae biodiesel production in a small-scale facility. *Energy Reports*, 6, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.156>
- BBC News Mundo. (9 de febrero de 2021). La contaminación que causa 1 de cada 5 muertes en el mundo y cuáles son los países de América Latina más afectados. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56001440>
- Blanco Cornelio, C. V., Narváez García, A., & Robles Heredia, J. C. (2022). Obtención de biocombustibles a partir de biomasa de *Chlorella vulgaris*. *Environmental, Sciences and Practices*, 1(1), 57-68. <https://www.mlsjournals.com/Environmental-Science-Practices/article/view/1365>
- Bozbas K. (2008). Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12: 542–52. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.001>
- Cartagena, J., & Malo, B. (2017). Evaluación del uso de la microalga *Chlorella vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR El Salitre a nivel laboratorio [Tesis de

- licenciatura, Fundación Universidad de América]
<https://repository.uamerica.edu.co/items/7face122-b87f-4052-9a5c-3a07e54dfe07>
- Castellanos, I. C.; González-Peralta, K.; Pinzón-Torres, S. J. (2018). Microalgas como alternativa sostenible para la producción de biodiesel. *Revista Ontare*. 6, (83-109). DOI: <https://doi.org/10.21158/23823399.v6.n0.2018.2425>
- Cebrián, C.G. (2015). Efecto de la radiación sobre la producción y calidad de biomasa de *Scenedesmus sp* para la obtención de biofertilizantes vegetales. [Tesis de Maestría, Universidad de Almería] <https://repositorio.ual.es/handle/10835/6260>
- Centeno, J. (2021). Efecto de longitudes de onda y deficiencia de fósforo, carbono y nitrógeno en la producción de biomasa y PHB en cultivos de *Nostoc linckia* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile] <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3163129>
- Cervantes M., Flores L., Oscanoa A., & Ruiz A. (2021). Evaluación del potencial de *Desmodesmus asymmetricus* y *Chlorella vulgaris* para la remoción de nitratos y fosfatos de aguas residuales. *Revista Peruana de Biología*, 28(1), e18082. <https://dx.doi.org/10.15381/rpb.v28i1.18082>
- Coronado-Reyes, J. A., Salazar-Torres, J. A., Juárez-Campos, B., & González-Hernández, J. C. (2020). *Chlorella vulgaris*, a microalgae important to be used in Biotechnology: A review. *Food Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.37320>
- Damián M., Vásquez K. (2021). Producción de biodiesel utilizando el género *Chlorella*: Revisión sistemática y meta-análisis. [Trabajo de Grado, Universidad de César Vallejo] <https://hdl.handle.net/20.500.12692/80049>
- Dhanasekar, S., Sathyanathan, R. (2023). Bioenergy potential of *Chlorella vulgaris* under the influence. *Global J. Environ. Sci. Manage.* 9(4): 789-804. DOI: 10.22035/gjesm.2023.04.09
- Delgadillo-Mirquez, L., Lopes, F., Taidi, B., Pareau, D. (2016). Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. *Biotechnol Rep* 11:18–26. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.04.003>
- Dos Santos, R. R., Moreira, D. M., Kunigami, C. N., Aranda, D. A. G., & Teixeira, C. M. L. L. (2015). Comparison between several methods of total lipid extraction from *Chlorella vulgaris* biomass. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 95-99. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.015>
- De Souza, A. M. (2018). Cultivo da microalga marinha *Chlorella minutíssima* em fotobiorreactor integrado (coluna de bolhas- tubular) internamente iluminado visando à obtenção de biomassa para a produção de biodiesel. [Tesis de doctorado, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO] <https://doi.org/10.11606/T.97.2018.tde-03122018-183830>
- Devaraja, S., Bharath M., Deepak K., Suganya B., Vishal B. S. (2017). Estudios sobre el efecto de las luces LED rojas, azules y blancas sobre la productividad de *Chlorella vulgaris* para tratar los

- efluentes de la industria de tintes; 6(2): 555682.
<https://doi.org/10.19080/AIBM.2017.06.5556682>
- Escalante, P. & Vizcarra, F. (2019). Estudio de las condiciones del desarrollo de la cepa *Chlorella sp.* Para la producción de Biodiésel a partir de la obtención de FAME en un fotobiorreactor a escala laboratorio – Arequipa. [Tesis de Título, Universidad Católica de Santa María]
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9716>
- Espinoza, P. J. L. (2018). Aplicación de un sistema de tratamiento con *Chlorella vulgaris* y su influencia en la calidad de las aguas residuales del distrito de Ica de abril del 2016 a febrero del 2018. [Tesis de grado, Universidad Alas Peruanas] <https://hdl.handle.net/20.500.12990/8641>
- European Committee for Standardization. Standard EN 14214. Automotive fuels.
- Fal, .S, Benhima .R, El Mernissi .N, Kasmi .Y, Smouni .A, H .El Arroussi.(2021) Las microalgas como fuente prometedoras para el tratamiento integrado de aguas residuales y la producción de biodiesel. *International Journal of Phytoremediation*. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1920572>
- Franco A., Lugo H., Torres A., Ochoa J., Lugo R. (2015). Extracción y caracterización de aceite microalgal de la especie *Chlorella vulgaris* por métodos químicos. Publicada, Memoria XII Congreso Oberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIBIM 12, Guayaquil, Ecuador.
- Fernández, L., Montiel, J., Millán, A. & Agustín, J. (2012). Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3b),101-115.ISSN: 1665-0441.<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=461/46125177011>
- García, G. C. C., Zouhayr, A., Perales J. A. (2015). Cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VI, núm.1 pp. 49-68.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100003&lng=es&tlng=es.
- Gallego, A. V., Pérez, I. L. M. (2021). Estimación de la densidad celular mediante el uso de cámaras de recuento. <http://hdl.handle.net/10251/169378>
- Ge, S., Qiu, S., Tremblay, D., Viner, K., Champagne .P., Jessop, G. P. (2018). Centrate wastewater treatment with *Chlorella vulgaris*: simultaneous enhancement of nutrient removal, biomass and lipid production. *Chemical Engineering Journal*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.058>
- Goh, P. S., Ahmad, N. A., Lim, J. W., Liang, Y. Y., Kang, H. S., Ismail, A. F., & Arthanareeswaran, G. (2022). Microalgae-Enabled Wastewater Remediation and Nutrient Recovery through Membrane Photobioreactors: Recent Achievements and Future Perspective. *Membranes*, 12(11), 1094. <https://doi.org/10.3390/membranes12111094>

- Gómez, J., Rodríguez, L. (2019). Obtención de biomasa de microalgas en aguas residuales para la producción de biocombustibles. *RenovaT* 3(2), 21-36.
- Göncü, S., Şimşek Uygun, B. & Atakan, S. (2025). Nitrogen and phosphorus removal from wastewater using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* microalgae with a batch bioreactor. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06380-x>
- Goicochea, P. M. E. (2021). Estudio de la capacidad de producción de biodiésel a partir de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus* en los últimos 10 años. [Tesis de Grado, Universidad privada del norte] <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/27634>
- Hashmi, Z., Zaini, J., Abdullah, R., Abu Bakar, M. S., & Bilad, M. R. (2024). Effects of light color on growth, nutrient uptake, and harvesting of the indigenous strain of *Chlorococcum* sp. *Bioresource Technology Reports*, 28, 101966. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101966>
- Hashmi, Z., Idriss, I. M., Taha, H., Zaini, J., Bakar, M. S. A., Abdullah, R., Nandianto, A. B. D., & Bilad, M. R. (2025). Cultivation of indigenous *Chlorococcum* sp. in aquaculture wastewater under various light color and biomass harvesting using membrane filtration: A simultaneous wastewater treatment and biomass production. *Cleaner Waste Systems*, 10, 100209. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100209>
- He, Y., Lian, J., Wang, L., Tan, L., Khan, F., Li, Y., Wang, H., Rebours, C., Han, D., & Hu, Q. (2023). Recovery of nutrients from aquaculture wastewater: Effects of light quality on the growth, biochemical composition, and nutrient removal of *Chlorella sorokiniana*. *Algal Research*, 69, 102965. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102965>
- He, Z., Han, W., Jin, W., Yang, J., Gao, S., Li, S., Zhou, X. (2021). Cultivation of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in Municipal Wastewater Using Monochromatic and White LED as Light Sources. *Waste and Biomass Valorization*, 12(9), 4873–4883. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01359-4>
- Hechun, C., Zhiling, Z., Xuwen, W., and Xiaoling, M. (2013). Direct Biodiesel Production from Wet Microalgae Biomass of *Chlorella pyrenoidosa* through In Situ Transesterification. *Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International*, pp. 6 <http://dx.doi.org/10.1155/2013/930686>
- Hernández-Pérez A. & Labbé J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Biología Marina y Oceanografía*.49(2), pp. 157-173. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Ianda, T. F., De Araújo Kalid, R., Rocha, L. B., Padula, A. D., & Zimmerman, W. B. (2022). Techno-economic modeling to produce biodiesel from marine microalgae in sub-Saharan countries: An exploratory study in Guinea-Bissau. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106369>

- Iasimone, F., De Felice, V., Panico, A., & Pirozzi, F. (2017). Experimental study for the reduction of CO₂ emissions in wastewater treatment plant using microalgal cultivation. *Journal of CO₂ Utilization*, 22, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.09.004>
- IQAir (2024). World's most polluted countries & regions (historical data 2018-2024). <https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>
- Iparraguirre, M. D. A., Zamora, D. A. B., (2023). Propuesta de un tratamiento biológico mediante el uso de la microalga *Chlorella vulgaris* para la remoción de materia orgánica en las aguas residuales domésticas descargadas en la quebrada Shupishiña. [Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas] <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/670804>
- Jin, C., Dong, M., Zhang, Y., Yu, Q., Liu, Q., & Zhou, X. (2023). Improvement in lipid production and biodiesel quality of *Pavlova sp.* By monochromatic illumination. *Journal of Oceanology and Limnology*, 41(5), 1864-1875. <https://doi.org/10.1007/s00343-022-2196-9>
- Jonker, J. G. G., & Faaij, A. P. C. (2013). Techno-economic assessment of micro-algae as feedstock for renewable bio-energy production. *Applied Energy*, 102, 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.053>
- Kamolrat, N., Kamuang, S., Khamket, T., Sangmek, P., & Sitthaphanit, S. (2023). The effect of optimum photoperiod from blue LED light on growth of *Chlorella vulgaris* in photobioreactor tank. *Natural and Life Sciences Communications*. 22(3): e2023038. <https://doi.org/10.12982/NLSC.2023.038>
- Kaloudas D., Pavlova N. & Penchovsky R. (2021). Phycoremediation of wastewater by microalgae: a review. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01203-0>
- Khan, A. N. M. A. I., Habib, M. A., & Miah, M. I. (2018). Culture of *Chlorella vulgaris* in press mud media as sugar mill waste. *International Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 3(2), 41–45.
- Kim, D. G., Lee, C., Park, S. M., & Choi, Y. E. (2014). Manipulation of light wavelength at appropriate growth stage to enhance biomass productivity and fatty acid methyl ester yield using *Chlorella vulgaris*. *Bioresource technology*, 159, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.078>
- Fuentes, J. (2019). Efectos del uso de radiación de distintas longitudes de onda en el cultivo in vitro de Maqui, *Aristotelia chilensis* (Mol.) STUNTZ. [Tesis de título, Universidad Talca]. <http://dspace.otalca.cl/handle/1950/12045>
- Krishnamoorthy, A., Rodríguez, C., & Durrant, A. (2023). Optimisation of ultrasonication pretreatment on microalgae *Chlorella vulgaris* & *Nannochloropsis Oculata* for lipid extraction in biodiesel production. *Energy*, 278, 128026. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128026>.

- Lee, J.-C., Moon, K., Lee, N., Ryu, S., Song, S. H., Kim, Y. J., Lee, S. M., Kim, H.-W., & Joo, J.-H. (2023). Biodiesel production and simultaneous treatment of domestic and livestock wastewater using indigenous microalgae, *Chlorella sorokiniana* JD1-1. *Scientific Reports*, 13(1), 15190. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42453-y>
- Liu, H., Liu, T.-J., Guo, H.-W., Wang, Y.-J., Ji, R., Kang, L.-L., Wang, Y.-T., Guo, X., Li, J.-G., Jiang, L.Q., (2024). A review of the strategy to promote microalgae value in CO₂ conversion-lipid enrichment-biodiesel production. *Journal of Cleaner Production*, 436, 140538. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140538>
- López, W., (2019). Evaluación de dos especies de microalgas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes de aguas residuales de la PTAR Taboada del Callao, Perú. [Tesis de Título, Universidad Nacional Federico Villareal] <https://hdl.handle.net/20.500.13084/2705>
- Ma, X.; Jian, W., (2023). Growth Conditions and Growth Kinetics of *Chlorella Vulgaris* Cultured in Domestic Sewage. *Sustainability*. 15, 2162. <https://doi.org/10.3390/su15032162>
- Maltsev, Y., Maltseva, K., Kulikovskiy, M., & Maltseva, S. (2021). Influence of light conditions on microalgae growth and content of lipids, carotenoids, and fatty acid composition. *Biology*, 10(10), 1060. <https://doi.org/10.3390/biology10101060>
- Mamoori, .A.O.S., Yaseen, .A.B.M., Jabuk, .L.S., Kamil, .S.K., Jawad, .F.Z., Naji, M.O., (2020). Bioremediation by Using the Microalgae *Chlorella vulgaris* to Remove Phosphate and Nitrite from the Domestic Waste Water Treatment Plant in Iraq. Vol 51 (1): 660-668. <https://doi.org/10.36872/LEPI/V51I1/301061>.
- Manzaneda, F. P., (2023). Aprovechamiento de nutrientes en aguas residuales de curtiembres, como medio de crecimiento para la obtención de biomasa de microalgas. [Tesis de Título, Universidad Católica de Santa María] <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12335>
- Marchese, A., Lima, S., Cosenza, A., Giambalvo, F., & Scargiali, F. (2025). Effects of Light Quality Adjustment in Microalgal Cultivation: Flashing Light and Wavelength Shifts in Photobioreactor Design. *Processes*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/pr13041159>
- Marín, L. J. C., y Colina, A. G., (2013). Manual de prácticas de análisis de aguas y de residuos líquidos. La Universidad del Zulia.
- Muñoz, V. A. K., (2022). Estandarización y validación de una metodología analítica para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) por espectroscopía UV-Vis en el laboratorio Ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Cauca – CRC. [Tesis de grado, Universidad del Cauca] <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/7586>
- Martínez de la Cruz, M. O., Robles H. J.C., Narváez G.A., Anguebes F.F., María Concepción Tamayo O.M.C., Ruiz M.A., Canedo L.Y. (2022). Desarrollo celular de *Chlorella vulgaris* en FBR de

- columna de burbujeo bajo distintos regímenes de luz, *Journal of Basic Sciences*, Vol. 8 (23), pp. 72-84. <https://doi.org/10.19136/jobs.a8n23.5346>
- Ménesguen, A., & Lacroix, G. (2018). Modelling the marine eutrophication: A review. *Science of The Total Environment*, 636, 339–354. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.183>
- Merma, C.W., Guevara, C. G. V., Alejandro, P. K. C., Espinoza, R. I. D-C., Ramírez, R. S. (2017) Obtención de biodiesel a partir de microalga nativas cuantificando su potencial bioenergético en el litoral de la provincia de Ilo del año 2014. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Moquegua] <https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/107>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2013). Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA). <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/13762-273-2013-vivienda>
- Ministerio del ambiente. (2010). Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM). <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>
- Módenes, A. N., Trigueros, D. E. G., da Cruz, T. M., Espinoza-Quiñones, F. R., de Souza Braniz, T., Gonçalves, V. D., & Schuelter, A. R. (2025). Blue light-enhanced *Desmodesmus sp.* Biomass yield in requirement opposite for high yields of macronutrient starvation-based lipid or nutritional excess-based pigment using red light. *Aquaculture*, 606, 742608. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.742608>
- Muñoz, M., Ramírez, J., Otero, A., Medina, V., Cruz, P. y Velasco Y. (2011). Efecto del medio de cultivo sobre el crecimiento y el contenido proteico de *Chlorella vulgaris*. *Rev Colomb Cienc Pecu* 2012; 25:438-449. <https://www.redalyc.org/pdf/2950/295024923012.pdf>
- Norma Técnica Peruana 321.125:2019. Biodiesel. Especificaciones. Segunda edición.
- Nurfarahanim, A., Nur A., Nur H. (2017) Algae oil extraction from freshwater microalgae *Chlorella vulgaris*. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 21 (3), pp.735 – 744. <https://doi.org/10.17576/mjas-2017-2103-23>
- Oleas, R. M. J., (2024). Obtención de lípidos a partir de biomasa microalgal de *Chlorella vulgaris* cultivada en agua residual de faenamiento avícola con luz artificial. [Tesis de grado, UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK] <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/5304>
- Oliveros, D. y Wild J. (2019). Evaluación de la eficiencia de remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales en un sistema de tratamiento terciario. [Tesis de título, Universidad de la Costa - CUC] <https://hdl.handle.net/11323/5311>

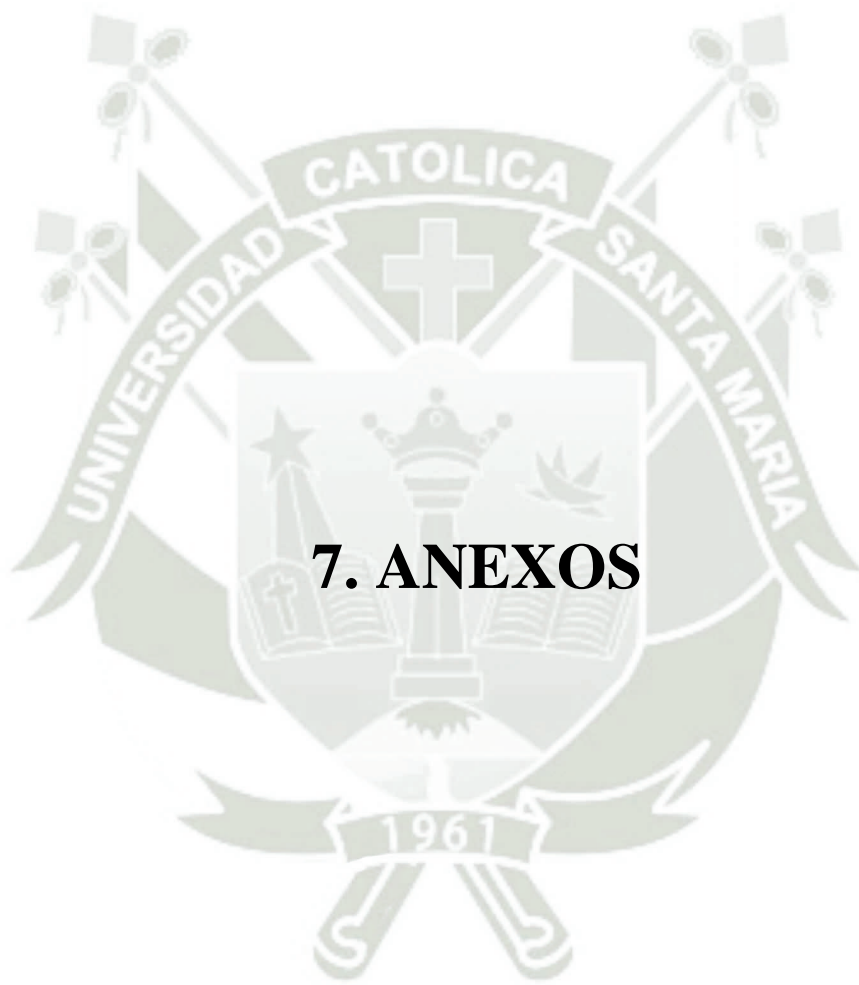
- Onay, M., Sonmez, C., Oktem, H. and Yucel, M. (2016) Evaluation of Various Extraction Techniques for Efficient Lipid Recovery from Thermo-Resistant Microalgae, *Hindakia*, *Scenedesmus* and *Micractinium* Species—Comparison of Lipid Extraction Methods from Microalgae. *American Journal of Analytical Chemistry*, 7, 141-150. <https://doi.org/10.4236/ajac.2016.72012>.
- Pandey, A., Srivastava, S., & Kumar, S. (2020). Development and cost-benefit analysis of a novel process for biofuel production from microalgae using pre-treated high-strength fresh cheese whey wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(19), 23963-23980. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08535-4>
- Plasencia, A.J. (2012) Cultivo de microalgas (*Chlorella sorokiniana*) con iluminación mediante LEDs (Light Emitting Diodes), [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Madrid] <https://oa.upm.es/22523/>
- Pérez, M., Quishpi J., Pauta G., León F, Cisneros J., Pinos V., Alvarado A. (2018). Comparación de las eficiencias de recuperación de lípidos de las microalgas *Chlorella* y *Scenedesmus* obtenidas con diferentes disolventes. *MASKANA*, 9(2), pp. 27–34. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33293>
- Pavez, R.N.O. (2023) Evaluación de solventes para determinar la cantidad de materia grasa contenida en microalgas mediante extracción soxhlet [Tesis de grado, Universidad Técnica Federico Santa María] <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/57003>
- Pérez, S., Mendoza, A., Castañeda, M. y Aguilera, L. (2019). Bioenergía a partir de microalgas en México. *Revista de Energías Renovables* Vol.3 No.8 23-34. <https://doi.org/10.35429/JRE.2019.8.3.23.34>
- Prieto, M. I. (2020). Estudio del crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* y su capacidad de depuración de agua residual [Tesis de grado, UNIVERSIDAD DE ALMERÍA] <https://repositorio.ual.es/handle/10835/9896>
- Quispe, Q. K.K. (2023). Evaluación de la capacidad depuradora con microalgas *Scenedesmus sp.* y *Chlorella sp.* para el tratamiento de aguas residuales domésticas a escala de laboratorio del distrito de Juliaca. [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Altiplano] <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21700>
- Pérez, T. M. J., Quishpi, M. J., (2014). Evaluación cuantitativa de la producción de biodiésel de microalgas de lagunas de tratamiento de aguas residuales. [Tesis de Título, Universidad de Cuenca] <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/92dfe436-0bc5-4db5-8e7e-0340e2a4be34>
- Ramírez, L. G. & Rodríguez R. A. (2023). Application of microalgae in wastewater: opportunity for sustainable development. *Front. Environ. Sci.* 11:1238640. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1238640>

- Ramli, N. M., Verreth, J. A. J., Yusoff, F. M., Nurulhuda, K., Nagao, N., Verdegem, M. C. J., (2020). Integration of algae to improve nitrogenous waste management in recirculating aquaculture systems: a review. *Front Bioeng Biotechnol* 8:1004. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.01004>
- Ramluckan, K., Moodley, K. G., & Bux, F. (2014). An evaluation of the efficacy of using selected solvents for the extraction of lipids from algal biomass by the soxhlet extraction method. *Fuel*, 116, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.118>
- Rawat, I., Kumar, R.R., Mutanda, T. y Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Appl Energy*, 88, 3411–24. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Razzak, S. A. (2025). Effect of temperature and CO₂ concentration on biological nutrient removal from tertiary municipal wastewater using microalgae *Chlorella protothecoides*. *Biotechnology Notes*, 6, 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.12.002>
- Rivadavia, H.E.L., (2019). El agua residual como recurso de nutrientes. [Trabajo de Maestría, Universidad de Alcalá]
- Rodríguez, A. (2017). Evaluación de métodos de extracción de aceite de microalgas para la producción de biodiesel. [Tesis de grado, Universidad Politecnica Salesiana] <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14825/1/UPS-CT007279.pdf>
- Rodríguez, A. D. P., (2023). Producción de biodiésel acoplada al tratamiento de aguas de recirculación acuícola empleando *Chlorella vulgaris*. [Trabajo de Grado, Universidad El Bosque] <https://hdl.handle.net/20.500.12495/10712>
- Ruan, L., Xu, D., Cheng, M., Liang, Y., Wu, L., Zhang, X., Zhang, T., Huang, Y., Guo C., Shang, C., (2024). Biomass Production and Nutrient Removal Using Culture of *Chlorella vulgaris* NIES-227 in Unsterilized Domestic Wastewater. *Waste Biomass Valor* 15, 6587–6597. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02640-y>
- Rubio, J. & Subía S. (2018). Evaluación de biomasa de microalgas de la laguna Limoncocha como materia prima para la obtención de biocombustibles. *Enfoque UTE*, 9, pp. 106-116. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.199>
- Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P.-Y., & Vaca-Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>
- Saleh, O.H., Raheem, S.A., Abbas, S.L., Abdulhasan, M.J., Mohammedhassan, A.M., Lafta, R.J. (2023). Evaluating the efficiency of *Chlorella vulgaris* and *Spirulina* microalgae in wastewater

- remediation under different light conditions. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol. 18, No. 6, pp. 1533-1538. <https://doi.org/10.18280/ijdne.180629>
- Salgueiro, J. (2018). Cultivo de microalgas en aguas residuales y aprovechamiento energético de la biomasa algal. [Tesis de Doctorado, Universidad de Vigo] <http://hdl.handle.net/11093/1158>
- Sánchez, L. (2017). Estudios sobre la utilización de biomasa algal como materia prima alternativa para la producción de bioetanol. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Mar del Plata] <http://hdl.handle.net/11336/80404>
- Sánchez, R., Díaz E. (2015). Obtención de Biodiesel a partir de la microalga *Chlorella vulgaris*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña] <https://repositorio.unphu.edu.do/bitstream/handle/123456789/694>
- Sánchez-Saavedra, M. del P., Saucedo-Carvajal, D., Castro-Ochoa, F. Y., & Molina-Cárdenas, C. A. (2020). The Use of Light Spectra to Improve the Growth and Lipid Content of *Chlorella vulgaris* for Biofuels Production. *BioEnergy Research*, 13(2), 487-498. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10070-1>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. (Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Servicio de Agua Potable y Alcantarilado de Arequipa (SEDAPAR S.A.). (2019). Plan Maestro Optimizado 2020-2049. <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/09/Capitulo-1-Diagnostico2.pdf>
- Smerj, I. (2023). Brief Note on Significance of Absorption Spectra in Plant Biology. *Journal of Plant Biochemistry & Physiology*, 11, 272.S. <https://doi.org/10.35248/2329-9029.23.11.272>
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2022). Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras (1ª ed.). Dirección de Fiscalización. Sunass. <https://www.sunass.gob.pe>
- Tripathi, R., Gupta, A., & Thakur, I. S. (2019). An integrated approach for phycoremediation of wastewater and sustainable biodiesel production by green microalgae, *Scenedesmus sp.* ISTGA1. *Renewable Energy*, 135, 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.056>
- Torres-Martínez, J.J., Martínez-Constantino, A., González-Ortega, O. (2025). Impact of blue and red light on lipid accumulation in *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus*. *J Appl Phycol.* <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03426-4>
- Umamaheswari, J. y Shanthakumar, S., (2016). Efficacy of microalgae for industrial wastewater treatment: a review on operating conditions, treatment efficiency and biomass productivity.

- Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 15(2), 265-284.
<https://doi.org/10.1007/s11157-016-9397-7>
- Vandamme, D., Foubert, I., Fraeye, I., & Muylaert, K. (2012). Influence of organic matter generated by *Chlorella vulgaris* on five different modes of flocculation. *Bioresource Technology*, 124, 508-511. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.121>
- Vega, A. A. S., (2022). Obtención de lípidos a partir de biomasa microalgal de *Chlorella vulgaris* cultivada en agua residual de origen acuícola. [Tesis de Grado, Universidad Internacional SEK] <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4818>
- Vellaiyan, S. (2024). An integrated approach for wastewater treatment and algae cultivation: Nutrient removal analysis, biodiesel extraction, and energy and environmental metrics enhancement. *Journal of Environmental Management*, 354, 120410. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120410>
- Venckus, P., Kostkevičienė, J., Bendikienė, V., (2017). Obial community changes in tnt spiked soil bioremediation trial using biostimulation, phytoremediate. Vol25(01): 56–63. <https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1245661>
- Viveros, J. (2014). Evaluación de las aguas residuales domésticas de la Universidad Autónoma de Occidente como medio de cultivo natural para la microalga nativa *Chlorella vulgaris* y simultáneamente su capacidad para remover nitrato y DQO de dichas aguas [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Occidente]. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/7736/T05784.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Yaakob, M. A., Mohamed, R, Al-Gheethi, A, Gokare, R, Ambati D. R. R. (2021). Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: an overview. *Cells* 10:393. <https://doi.org/10.3390/cells10020393>
- Wan Mahari, W. A., Wan Razali, W. A., Waiho, K., Wong, K. Y., Foo, S. S., Kamaruzzan, A. S., Derek, C. J. C., Ma, N. L., Chang, J.-S., Dong, C.-D., Chisti, Y., & Lam, S. S. (2024). Light-emitting diodes (LEDs) for culturing microalgae and cyanobacteria. *Chemical Engineering Journal*, 485, 149619. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149619>.
- Wong, Y. C, Shahirah R. (2019). Effect of Different Solvent and Ratio Towards Microalgae Oil Production by Ultrasonic Assisted Soxhlet Extraction Techniques. *Orient J Chem*, 35 (4). <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/350418>
- World Health Organization: WHO. (2022, 4 abril). Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS. World Health Organization (WHO). <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>

- Xin, L., Hong-ying, H., Ke, G., & Ying-xue, S. (2010). Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga *Scenedesmus sp.* *Bioresource Technology*, 101(14), 5494–5500. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.01>
- Yang, L., Chen, J., Qin, S., Zeng, M., Jiang, Y., Hu, L., Xiao, P., Hao, W., Hu, Z., Lei, A., Wang, J. (2018). Growth and lipid accumulation by different nutrients in the microalga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1041-z>
- Zhang, X., Yan, S., Tyagi, R. D., Drogui, P., & Surampalli, R. Y. (2014). Ultrasonication assisted lipid extraction from oleaginous microorganisms. *Bioresource Technology*, 158, 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.132>
- Zhang, Z., Wang, L., Wu, Y., Li, C., Fu, P., & Liu, J. (2023). Aislamiento e identificación del alga verde *Chlorella vulgaris* HNUFU001 para el enriquecimiento ambiental con selenio en un régimen de crecimiento heterotrófico. *Algal Research*, 75, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103299>
- Zhang, H., Tan, Y., Zhu, R., Hong, J., Yu, B., Gao, B., & Zhang, C. (2024). Red light trade-off regulating the negative effects of nitrogen concentration to improve lipid and astaxanthin production in the filamentous green microalga *Oedocladium carolinianum*. *Algal Research*, 80, 103510. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103510>
- Zheng, S., Sun, S., Zou, S., Song, J., Hua, L., Chen, H., & Wang, Q. (2024). Effects of culture temperature and light regimes on biomass and lipid accumulation of *Chlamydomonas reinhardtii* under carbon-rich and nitrogen-limited conditions. *Bioresource Technology*, 399, 130613. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130613>
- Zeballos, C. (2019). Atlas ambiental de Arequipa. <https://es.scribd.com/document/581572322/Atlas-Ambiental-de-Arequipa>
- Zhigang, G., Hui, Z., Yuejin, Z., Cheng, Y., & Yongjun, Z. (2013). Purifying synthetic high-strength wastewater by microalgae *Chlorella vulgaris* under various light emitting diode wavelengths and intensities. *J Environ Health Sci Engineer*, 11(8), <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-8>
- Zhu, L., Hu, T., Li, S., Nugroho, Y. K., Li, B., Cao, J., Show, P., & Hiltunen, E. (2020). Effects of operating parameters on algae *Chlorella vulgaris* biomass harvesting and lipid extraction using metal sulfates as flocculants. *Biomass and Bioenergy*, 132, 105433. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105433>



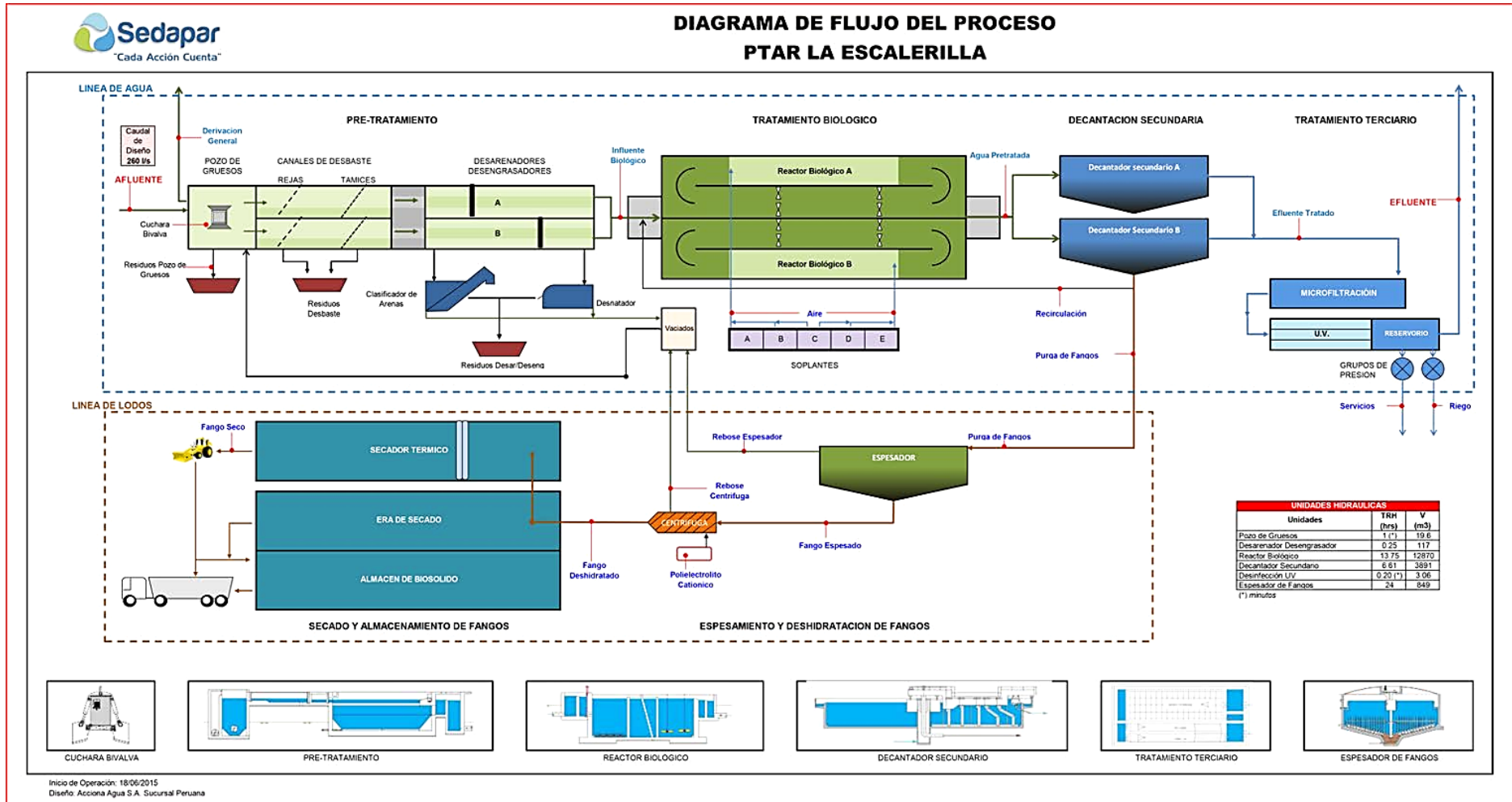
7. ANEXOS

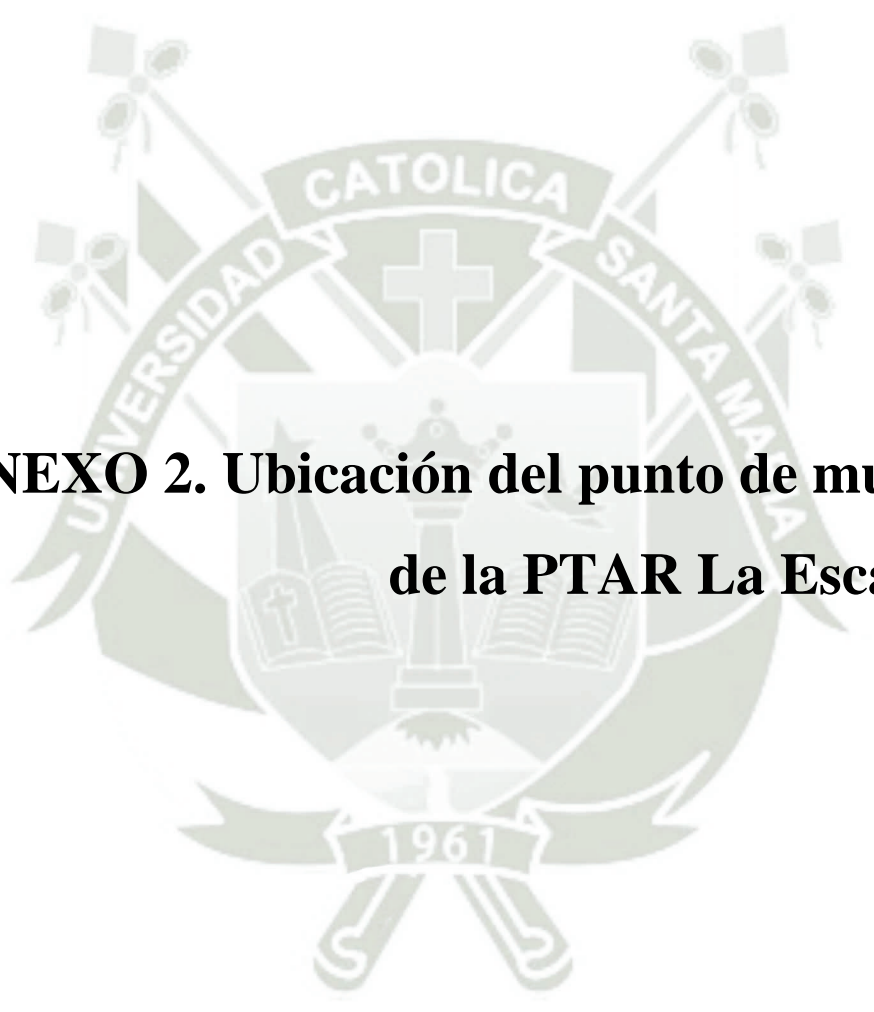


**ANEXO 1. Diagrama de flujo del proceso de la
PTAR La Escalerilla**

Figura 16

Diagrama de flujo del proceso de la PTAR La Escalerilla





**ANEXO 2. Ubicación del punto de muestreo
de la PTAR La Escalerilla**

NOMBRE DE PTAR:		Planta De Tratamiento De Aguas Residuales La Escalerilla	
UBICACIÓN DE PTAR:		Cerro Colorado, Distrito de Cerro Colorado	
DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	
CERRO COLORADO	AREQUIPA	AREQUIPA	
INDICACIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO			
DENOMINACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO		EFLUENTE DE PTAR LA ESCALERILLA	
COORDENADAS U.T.M (WGS84)			
NORTE	ESTE	ZONA UTM	ALTITUD
8188405.66 m S	219363.15 m E	19 K	2321

Figura 17

Georreferencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Escalerilla

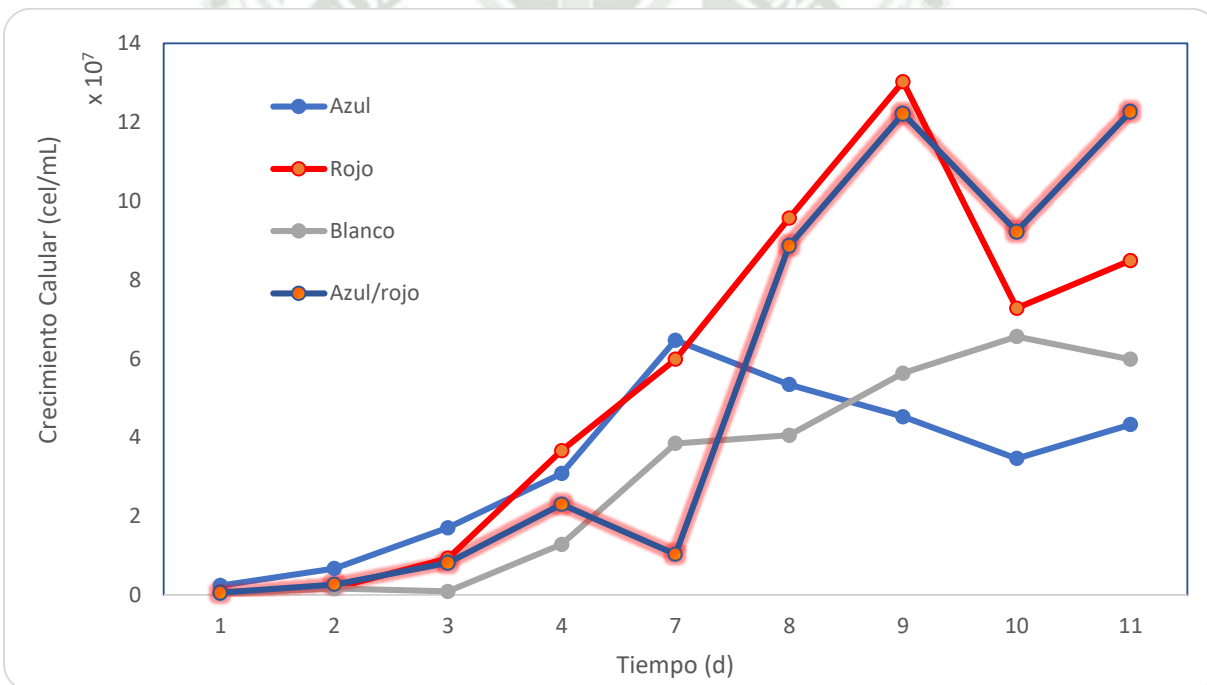




**ANEXO 3. Comparación del crecimiento celular
de la microalga *Chlorella vulgaris* por tipo de
color de luz**

Figura 18

*Comparación del crecimiento celular de la microalga *Chlorella vulgaris* por tipo de color de luz*





**ANEXO 4. Resultado de laboratorio y certificado de
acreditación**



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-7435

N° Id.: 0000107098

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- 1.- RAZON SOCIAL : UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
2.- DIRECCIÓN : NRO. S/N URB. SAN JOSE (UMACOLLO) AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA
3.- PROYECTO : EVALUACION DEL EFECTO DEL COLOR DE LUZ SOBRE LA PRODUCCION DE BIOMASA DE LA CHLORELLA VULGARIS ASOCIADO AL TRATAMIENTO TERCARIO DE AGUAS RESIDUALES COMO MEDIO DE CULTIVO Y SUBSECUENTE PRODUCCION DE BIODIESEL COMO ALTERNATIVA DE ECONOMIA CIRCULAR
4.- PROCEDENCIA : PLANTA DE TRATAMIENTO LA ESCALERILLA DE AREQUIPA
5.- SOLICITANTE : MONECO SOCIEDAD ANONIMA CERRADA
6.- PRODUCTO : Agua Residual

II.- DATOS DEL SERVICIO

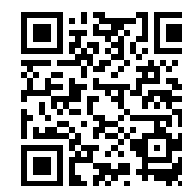
- 1.- ORDEN DE SERVICIO N° : 0000001555-2024-0000
2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2024-04-12

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- 1.- MUESTREO POR : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
2.- NÚMERO DE MUESTRAS : 1
3.- FECHA DE RECEPCIÓN : 2024-03-26
4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN : En buen estado de conservación y preservación
5.- PERÍODO DE ENSAYO : 2024-03-26 al 2024-04-12


Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391


Marleni V. Rivera Castromonte
Supervisor de Laboratorio de
Microbiología e Hidrobiología
CBP N° 16639



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 7

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 717 5802
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz. D2
Lt. 3, Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 961 768 828

www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-7435

N° Id.: 0000107098

ITEM	1
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-19798
CÓDIGO CLIENTE ^(A)	ARP-01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)	E:0219236 N:8188568
PRODUCTO ^(A)	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)	26-03-2024 12:30

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Itrio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Lantano (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Litio (*)	mg/L	0,00003	0,00010	0,00820
Lutecio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Magnesio (*)	mg/L	0,0006	0,0020	8,0307
Manganeso (*)	mg/L	0,00002	0,00005	0,04720
Mercurio (*)	mg/L	0,000033	0,000100	<0,000100
Molibdeno (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Neodimio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Niobio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Niquel (*)	mg/L	0,0001	0,0004	<0,0004
Plata (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Plomo (*)	mg/L	0,0008	0,0010	<0,0010
Potasio (*)	mg/L	0,003	0,010	44,115
Praseodimio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Renio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Rubidio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Samario (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Selenio (*)	mg/L	0,001	0,002	<0,002
Sílice (*)	mg/L	0,001	0,002	33,158
Silicio (*)	mg/L	0,0002	0,0007	15,4735

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-7435

N° Id.: 0000107098

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	LUGAR DE ANÁLISIS
Aceites y Grasas	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5520 B, 24th Ed. 2023.	Oil and Grease. Liquid-Liquid, Partition-Gravimetric Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E.coli.	INACAL LE - 096 CHALACA
Coliformes Totales (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique.	INACAL LE - 096 CHALACA
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test	INACAL LE - 096 CHALACA
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023.	Chemical Oxygen Demand by Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 CHALACA
Fósforo Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-P B(Item 5) y E, 24th Ed. 2023.	Phosphorus. Ascorbic Acid Method	INACAL LE-096 ZARUMILLA
Metales Totales ICP-MS	Method 200.8, Revision 5.4 1994. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance: Bi, B, Ca, Ce, Cs, Fe, Ga, Ge, Hf, K, La, Li, Lu, Mg, Na, Nb, P, Rb, Si, Sn, Sr, Ta, Te, Ti, W, Yb, Zr), 2021.	Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry.	INACAL LE - 096 CHALACA
Nitrógeno Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-N Nitrogen C, 24th Ed., 2023.	C. Persulfate Method	IAS TL-833 CHALACA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 717 5802
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz. D2
Lt. 3, Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 961 768 828



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-7435

N° Id.: 0000107098

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	LUGAR DE ANÁLISIS
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.	Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C	INACAL LE - 096 CHALACA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association



SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 717 5802
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz. D2
Lt. 3, Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 961 768 828

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-7435

N° Id.: 0000107098

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-24-19798
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				ARP-01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0219236 N:8188568
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				26-03-2024 12:30
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	160 000 000,0
Coliformes Totales (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	160 000 000,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	332,1
Aceites y Grasas (*)	mg/L	1,40	5,00	61,80
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	270,0
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	701,9
Fósforo Total (*)	mg/L	0,004	0,010	13,950
Nitrógeno Total ²	mg/L	0,050	0,120	132,330
Metales Totales ICP-MS				
Aluminio (*)	mg/L	0,001	0,003	0,032
Antimonio (*)	mg/L	0,0006	0,0020	<0,0020
Arsénico (*)	mg/L	0,0002	0,0010	<0,0010
Azufre (*)	mg/L	0,006	0,020	<0,020
Bario (*)	mg/L	0,00008	0,00030	0,03500
Berilio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Bismuto (*)	mg/L	0,003	0,010	<0,010

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-7435

N° Id.: 0000107098

ITEM	1
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-19798
CÓDIGO CLIENTE ^(A)	ARP-01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)	E:0219236 N:8188568
PRODUCTO ^(A)	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)	26-03-2024 12:30

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Boro (*)	mg/L	0,0003	0,0010	0,2179
Cadmio (*)	mg/L	0,0001	0,0002	<0,0002
Calcio (*)	mg/L	0,001	0,004	27,323
Cerio (*)	mg/L	0,003	0,010	<0,010
Cesio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Cobalto (*)	mg/L	0,0005	0,0020	<0,0020
Cobre (*)	mg/L	0,0001	0,0002	0,0023
Cromo (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Erbio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Estaño (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Estroncio (*)	mg/L	0,00002	0,00005	0,17730
Europio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Fosforo (*)	mg/L	0,002	0,006	13,427
Gadolinio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Galio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Germanio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Hafnio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Hierro (*)	mg/L	0,001	0,002	0,218
Holmio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Indio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Iterbio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-7435

N° Id.: 0000107098

ITEM	1
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-19798
CÓDIGO CLIENTE ^(A)	ARP-01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)	E:0219236 N:8188568
PRODUCTO ^(A)	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)	26-03-2024 12:30

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Sodio (*)	mg/L	0,0003	0,0010	174,9457
Talio (*)	mg/L	0,0001	0,0004	<0,0004
Tántalo (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Telurio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Titanio (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Torio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Uranio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Vanadio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Wolframio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Zinc (*)	mg/L	0,0001	0,0002	<0,0002
Zirconio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-22865

N° Id.: 0000122528

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- 1.- RAZON SOCIAL : KATHERYNE DEL CARPIO CONCHA
 2.- DIRECCIÓN : URB.LA CAMPIÑA PSJE LOS GUINDO D-6 - SOCABAYA
 3.- PROYECTO : EVALUACION DEL EFECTO DEL COLOR DE LUZ SOBRE LA PRODUCCION DE BIOMASA DE LA CHLORELLA VULGARIS ASOCIADO AL TRATAMIENTO TERCARIO DE AGUAS RESIDUALES COMO MEDIO DE CULTIO Y SUBSECUENTE PRODUCCION DE BIODIESEL COMO ALTERNATIVA DE ECONOMIA CIRCULAR
 4.- PROCEDENCIA : UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
 5.- SOLICITANTE : KATHERYNE DEL CARPIO CONCHA
 6.- PRODUCTO : Agua Residual

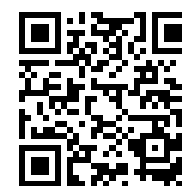
II.- DATOS DEL SERVICIO

- 1.- ORDEN DE SERVICIO N° : 0000004728-2024-0000
 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2024-09-03

III.- DATOS DEL ÍTEMS DE ENSAYO

- 1.- MUESTREADO POR : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
 2.- NÚMERO DE MUESTRAS : 1
 3.- FECHA DE RECEPCIÓN : 2024-08-13
 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN : En buen estado de conservación y preservación
 5.- PERÍODO DE ENSAYO : 2024-08-13 al 2024-09-03

Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 3

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 717 5802
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz. D2
Lt. 3, Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 961 768 828

www.alab.com.pe



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-22865

N° Id.: 0000122528

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023.	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 CHALACA
Fósforo Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-P B(Item 5) y E, 24th Ed. 2023.	Phosphorus. Ascorbic Acid Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Nitrógeno Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-N Nitrogen C, 24th Ed., 2023.	C. Persulfate Method	IAS TL-833 CHALACA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 717 5802
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz. D2
Lt. 3, Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 961 768 828



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-22865

N° Id.: 0000122528

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-24-68382
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				PAG-01
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				13-08-2024 16:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	118,1
Fósforo Total (*)	mg/L	0,004	0,010	15,264
Nitrógeno Total ²	mg/L	0,050	0,120	50,248

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-22868

N° Id.: 0000122531

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- 1.- RAZON SOCIAL : KATHERYNE DEL CARPIO CONCHA
 2.- DIRECCIÓN : URB.LA CAMPIÑA PSJE LOS GUINDO D-6 - SOCABAYA
 3.- PROYECTO : EVALUACION DEL EFECTO DEL COLOR DE LUZ SOBRE LA PRODUCCION DE BIOMASA DE LA CHLORELLA VULGARIS ASOCIADO AL TRATAMIENTO TERCARIO DE AGUAS RESIDUALES COMO MEDIO DE CULTIO Y SUBSECUENTE PRODUCCION DE BIODIESEL COMO ALTERNATIVA DE ECONOMIA CIRCULAR
 4.- PROCEDENCIA : UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
 5.- SOLICITANTE : KATHERYNE DEL CARPIO CONCHA
 6.- PRODUCTO : Agua Residual

II.- DATOS DEL SERVICIO

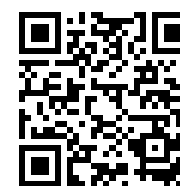
- 1.- ORDEN DE SERVICIO N° : 0000004728-2024-0000
 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2024-09-03

III.- DATOS DEL ÍTEMS DE ENSAYO

- 1.- MUESTREADO POR : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
 2.- NÚMERO DE MUESTRAS : 1
 3.- FECHA DE RECEPCIÓN : 2024-08-14
 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN : En buen estado de conservación y preservación
 5.- PERÍODO DE ENSAYO : 2024-08-14 al 2024-09-03



Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 3

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 717 5802
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz. D2
Lt. 3, Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 961 768 828

www.alab.com.pe



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

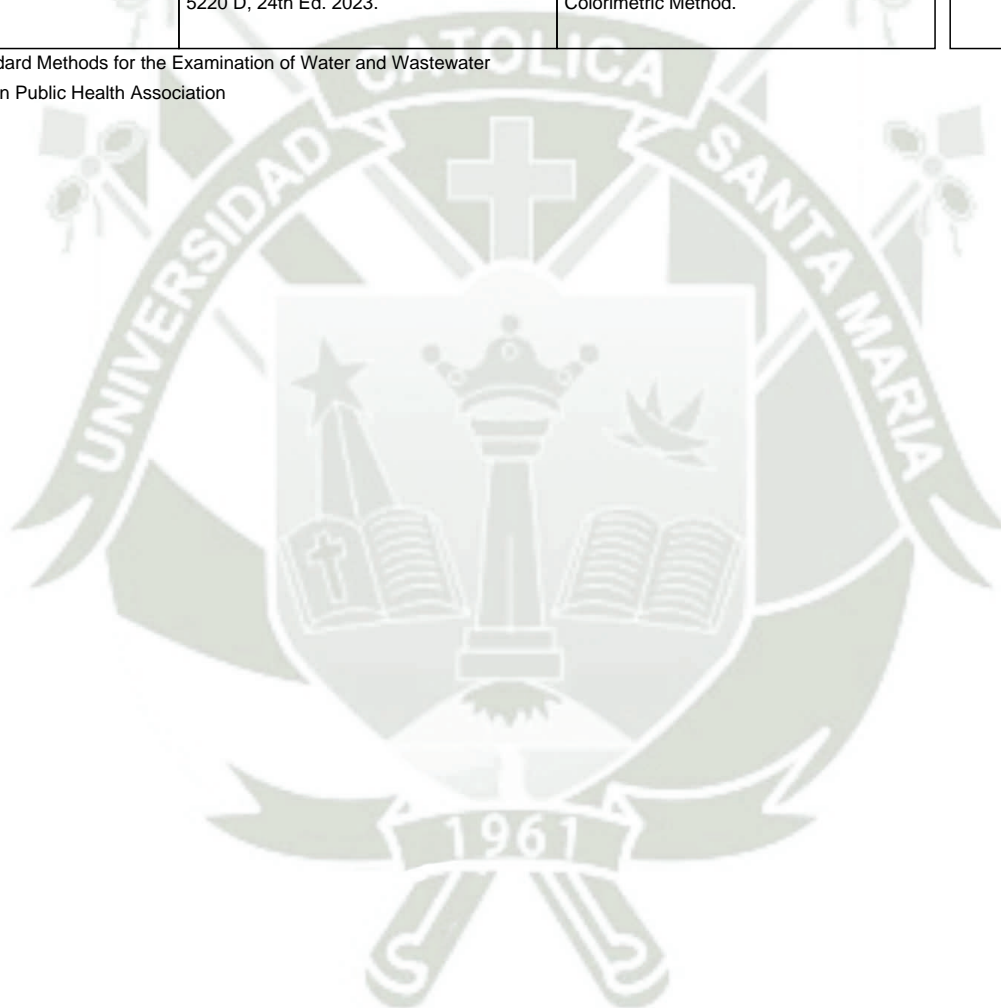
INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-22868

N° Id.: 0000122531

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023.	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 CHALACA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
"APHA" : American Public Health Association



SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 717 5802
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz. D2
Lt. 3, Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 961 768 828

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-22868

N° Id.: 0000122531

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-24-68387
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				PAG-01
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				14-08-2024 09:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	111,5

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<="= Menor que el L.D.M.

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-23342

N° Id.: 0000123005

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE


- 1.- RAZON SOCIAL : KATHERYNE DEL CARPIO CONCHA
 2.- DIRECCIÓN : URB.LA CAMPIÑA PSJE LOS GUINDO D-6 - SOCABAYA
 3.- PROYECTO : EVALUACION DEL EFECTO DEL COLOR DE LUZ SOBRE LA PRODUCCION DE BIOMASA DE LA CHLORELLA VULGARIS ASOCIADO AL TRATAMIENTO TERCARIO DE AGUAS RESIDUALES COMO MEDIO DE CULTIO Y SUBSECUENTE PRODUCCION DE BIODIESEL COMO ALTERNATIVA DE ECONOMIA CIRCULAR
 4.- PROCEDENCIA : UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
 5.- SOLICITANTE : KATHERYNE DEL CARPIO CONCHA
 6.- PRODUCTO : Agua Residual

II.- DATOS DEL SERVICIO

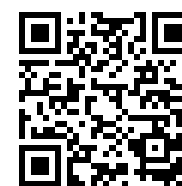
- 1.- ORDEN DE SERVICIO N° : 0000004728-2024-0000
 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2024-09-03

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- 1.- MUESTREADO POR : ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.
 2.- NÚMERO DE MUESTRAS : 1
 3.- FECHA DE RECEPCIÓN : 2024-08-17
 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN : En buen estado de conservación y preservación
 5.- PERÍODO DE ENSAYO : 2024-08-17 al 2024-09-03


 Erika Aliaga Ibarra
 Jefe de Laboratorio
 CIP N° 100391


 Marleni V. Rivera Castromonte
 Supervisor de Laboratorio de
 Microbiología e Hidrobiología
 CBP N° 16639



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 5

SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chalaca N° 1877,
 Bellavista - Callao
 Telf.: (+01) 717 5802
 Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zarumilla Mz. D2
 Lt. 3, Bellavista - Callao
 Telf.: (+01) 713 0636
 Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
 COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA
 Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
 Castilla - Piura
 Telf.: (+073) 542 335
 Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
 Alto Salaverry - Trujillo
 Telf.: (+01) 713 0636
 Cel.: 961 768 828

www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-23342

N° Id.: 0000123005

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Aceites y Grasas	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5520 B, 24th Ed. 2023.	Oil and Grease. Liquid-Liquid, Partition-Gravimetric Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test	INACAL LE - 096 CHALACA
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.	Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C	INACAL LE - 096 CHALACA
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E.coli.	INACAL LE - 096 CHALACA
Metales Totales ICP-MS	Method 200.8, Revision 5.4 1994. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance: Bi, B, Ca, Ce, Cs, Fe, Ga, Ge, Hf, K, La, Li, Lu, Mg, Na, Nb, P, Rb, Si, Sn, Sr, Ta, Te, Ti, W, Yb, Zr), 2021.	Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry.	INACAL LE - 096 CHALACA
Coliformes Totales (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique.	INACAL LE - 096 CHALACA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-23342

N° Id.: 0000123005

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-24-69330
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				PAG-01
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				16-08-2024 20:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	79,0
Coliformes Totales (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	350,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	43,6
Aceites y Grasas (*)	mg/L	1,40	5,00	<5,00
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	16,41
Metales Totales ICP-MS				
Aluminio (*)	mg/L	0,001	0,003	0,003
Antimonio (*)	mg/L	0,0006	0,0020	<0,0020
Arsénico (*)	mg/L	0,0002	0,0010	<0,0010
Bario (*)	mg/L	0,00008	0,00030	<0,00030
Berilio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Bismuto (*)	mg/L	0,003	0,010	<0,010
Boro (*)	mg/L	0,0003	0,0010	0,3953
Cadmio (*)	mg/L	0,0001	0,0002	<0,0002
Calcio (*)	mg/L	0,001	0,004	20,897
Cerio (*)	mg/L	0,003	0,010	<0,010
Cesio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Cobalto (*)	mg/L	0,0005	0,0020	<0,0020
Cobre (*)	mg/L	0,0001	0,0002	0,0045
Cromo (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-23342

N° Id.: 0000123005

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-24-69330
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				PAG-01
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				16-08-2024 20:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Erbio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Estaño (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Estroncio (*)	mg/L	0,00002	0,00005	0,10590
Europio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Fosforo (*)	mg/L	0,002	0,006	14,306
Gadolinio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Galio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Germanio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Hafnio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Hierro (*)	mg/L	0,0010	0,0020	0,0088
Holmio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Indio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Iterbio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Itrio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Lantano (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Litio (*)	mg/L	0,00003	0,00010	0,00690
Lutecio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Magnesio (*)	mg/L	0,0006	0,0020	8,8277
Manganeso (*)	mg/L	0,00002	0,00005	<0,00005
Mercurio (*)	mg/L	0,000033	0,000100	<0,000100
Molibdeno (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Neodimio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Niobio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Niquel (*)	mg/L	0,0001	0,0004	0,0129

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-23342

N° Id.: 0000123005

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-24-69330
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				PAG-01
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				16-08-2024 20:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Plata (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Plomo (*)	mg/L	0,0008	0,0010	<0,0010
Potasio. (*)	mg/L	0,003	0,010	49,457
Praseodimio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Renio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Rubidio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Samario (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Selenio (*)	mg/L	0,001	0,002	<0,002
Sílice (*)	mg/L	0,001	0,002	31,119
Silicio (*)	mg/L	0,0002	0,0007	14,5222
Sodio (*)	mg/L	0,0003	0,0010	313,3029
Talio (*)	mg/L	0,0001	0,0004	<0,0004
Tántalo (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Telurio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Titanio (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Torio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Uranio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Vanadio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Wolframio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Zinc (*)	mg/L	0,0001	0,0002	0,0496
Zirconio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Azufre (**)	mg/L	0,006	0,020	351,741

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Certificado



INACAL
Instituto Nacional
de Calidad
Acreditación

La Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad – INACAL, en el marco de la Ley N° 30224, **OTORGA** el presente certificado de Renovación de la Acreditación a:

ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.

Laboratorio de Ensayo

En su sede ubicada en: Av. Guardia Chalaca N°1877, distrito de Bellavista, provincia Constitucional del Callao, departamento de Lima

Con base en la norma

NTP-ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración

Facultándolo a emitir Informes de Ensayo con Símbolo de Acreditación. En el alcance de la acreditación otorgada que se detalla en el DA-acr-06P-21F que forma parte integral del presente certificado llevando el mismo número de registro indicado líneas abajo.

Fecha de Renovación: 26 de julio de 2023

Fecha de Vencimiento: 25 de julio de 2027



Firmado digitalmente por AGUILAR
RODRIGUEZ Lidia Patricia FAU
20600283015 soft
Fecha: 2023-09-13 18:32:08
Motivo: Soy el Autor del Documento

PATRICIA AGUILAR RODRÍGUEZ

Directora (d.t.), Dirección de Acreditación - INACAL

Fecha de emisión: 13 de setiembre de 2023



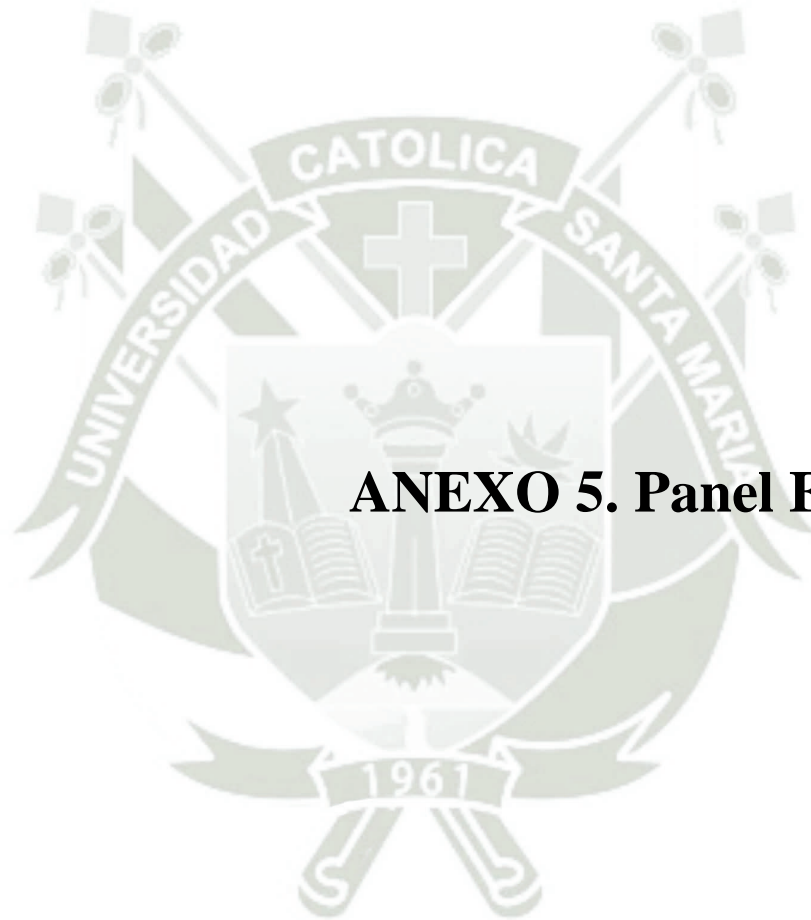
Cedula: N° 234-2023-INACAL/DA
Adenda N°: 04 del contrato N° 025-16/INACAL-DA
Registro N°: LE-096

El presente certificado tiene validez con su correspondiente Alcance de Acreditación y cédula de notificación dado que el alcance puede estar sujeto a ampliaciones, reducciones, actualizaciones y suspensiones temporales. El alcance y vigencia debe confirmarse en la página web www.inacal.gob.pe/acreditacion/categoria/acreditados y/o a través del código QR al momento de hacer uso del presente certificado.

La Dirección de Acreditación del INACAL es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Multilateral (MLA) de Inter American Accreditation Cooperation (IAAC) e International Accreditation Forum (IAF) y del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo con la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

DA-acr-01P-02M Ver. 03

DE-LAB-56-3



ANEXO 5. Panel Fotográfico

Figura 19

Instalaciones de la PTAR La Escalerilla



Figura 20

Zona de pretratamiento de la PTAR La Escalerilla



Figura 21

Toma de muestra de agua residual en la salida de la etapa de pretratamiento - primera parte



Figura 22

Toma de muestra de agua residual en la salida de la etapa de pretratamiento - segunda parte



Figura 23

*Preparación para el conteo celular de la *Chlorella vulgaris**



Figura 24

*Crecimiento de *Chlorella vulgaris* en botellas de 1L para prueba de adaptación de la microalga*



Figura 25

Unidades experimentales con luz combinada



rojo/azul

Figura 26

Unidades experimentales con luz blanca



Figura 27

Unidades experimentales con luz roja



Figura 28

Unidades experimentales con luz azul

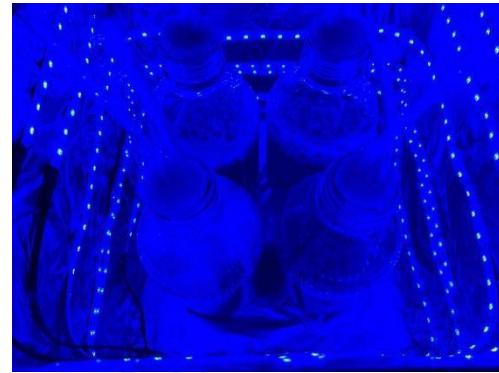


Figura 29

*Primer día de inocular *Chlorella vulgaris* con agua residual*



Figura 30

Muestra de agua residual para análisis de DQO



Figura 31

Mezcla de muestra, solución digestora y ácido sulfúrico



Figura 32

Solución para medir absorbancia en el espectrofotómetro



Figura 33

*Último día de crecimiento de *Chlorella vulgaris* en agua residual*



Figura 34

Cultivo de microalga de 10L de agua residual



Figura 35 *Envío de muestras de agua residual final*



Figura 36

*Separación de la *Chlorella vulgaris* con floculante*



Figura 37

*Centrifugación de la *Chlorella vulgaris* para obtener biomasa húmeda*



Figura 38

Biomasa microalgal en la estufa a 60 °C

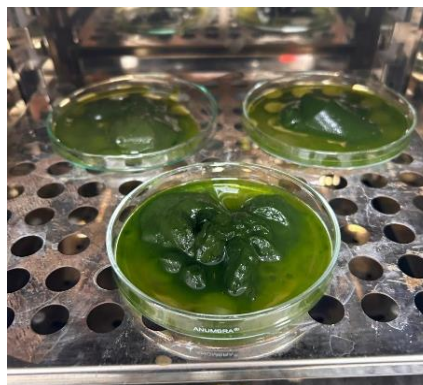


Figura 39

*Molido de biomasa seca de *Chlorella vulgaris**



Figura 40

Utilización de ultrasonido para extraer lípidos



Figura 41

Uso de rotavapor para extraer el solvente



Figura 42

*Filtración de la biomasa seca de la *Chlorella vulgaris**



Figura 43

Clarificación del lípido con carbón activado



Figura 44

Agitación del lípido con metóxido de sodio

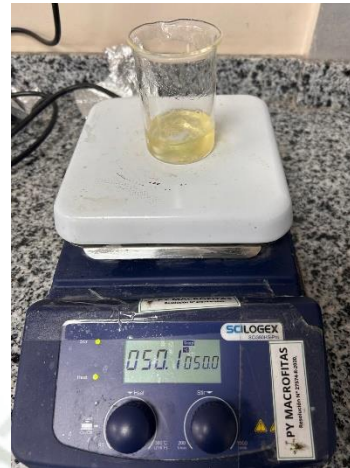
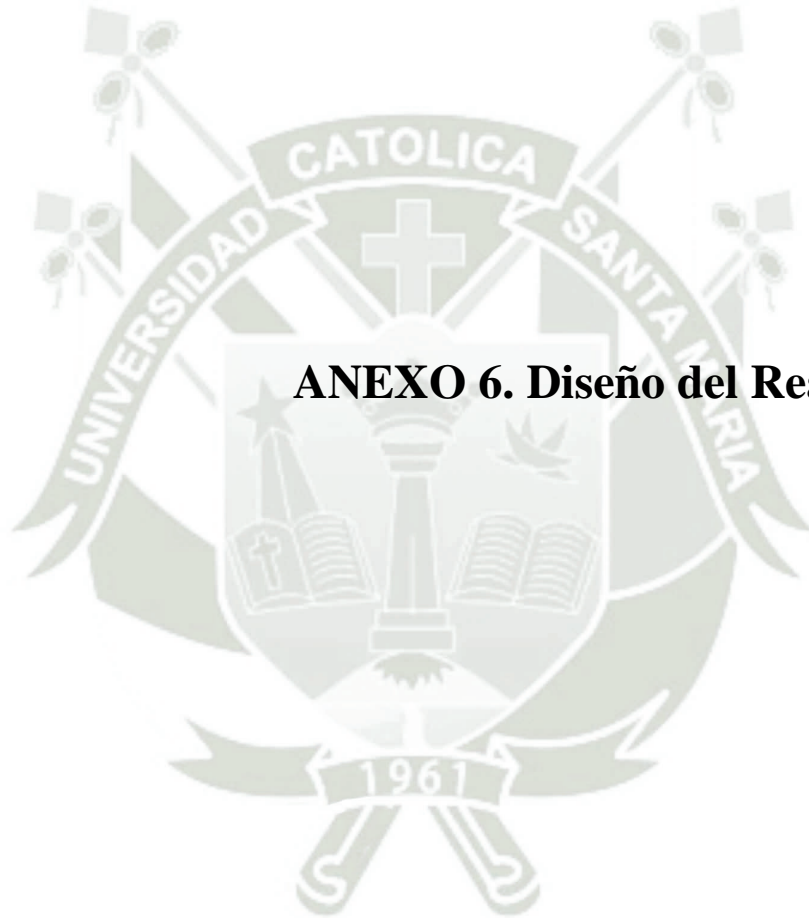


Figura 45

Separación de fases para obtener biodiésel

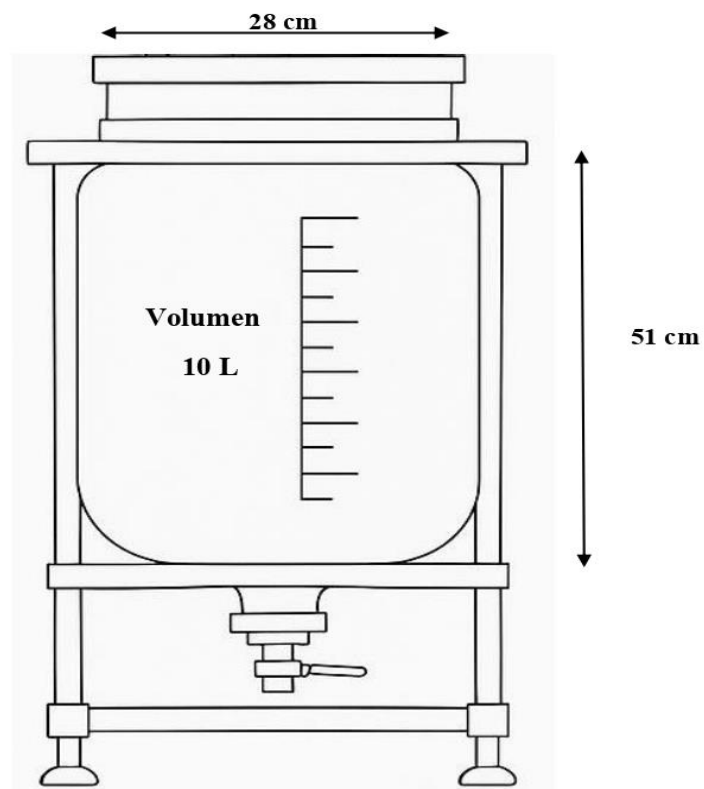


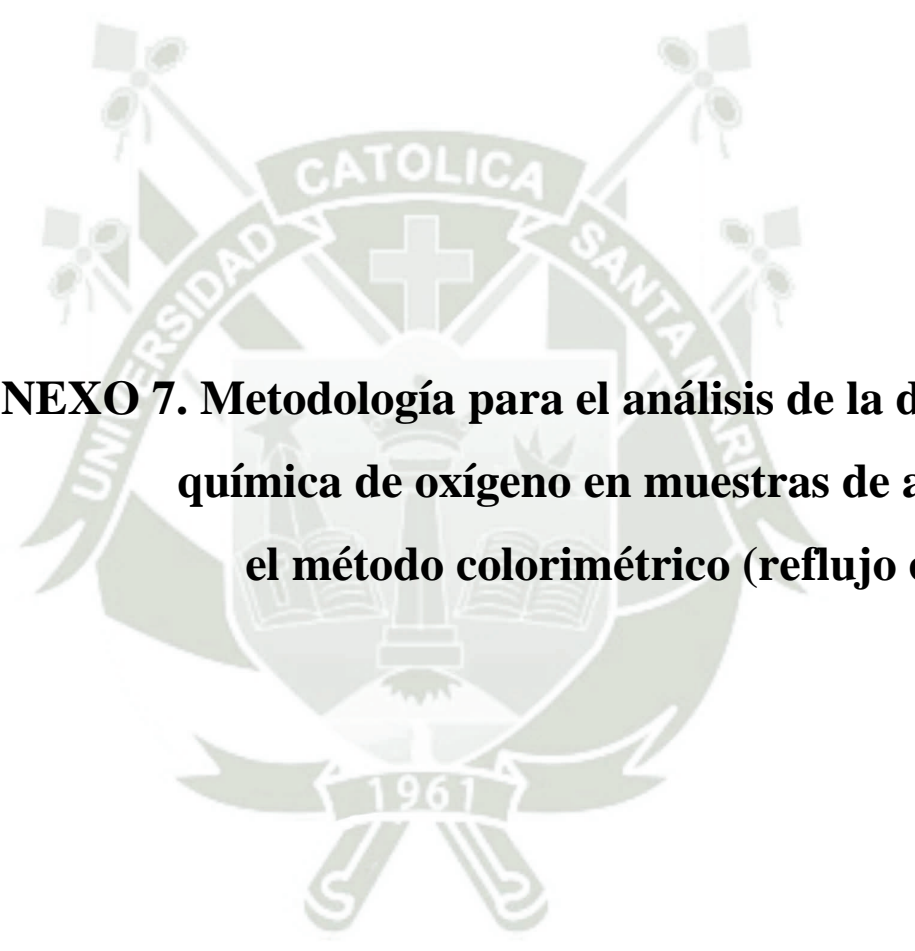


ANEXO 6. Diseño del Reactor de 10 L

Figura 46

Diseño del Reactor de 10 L

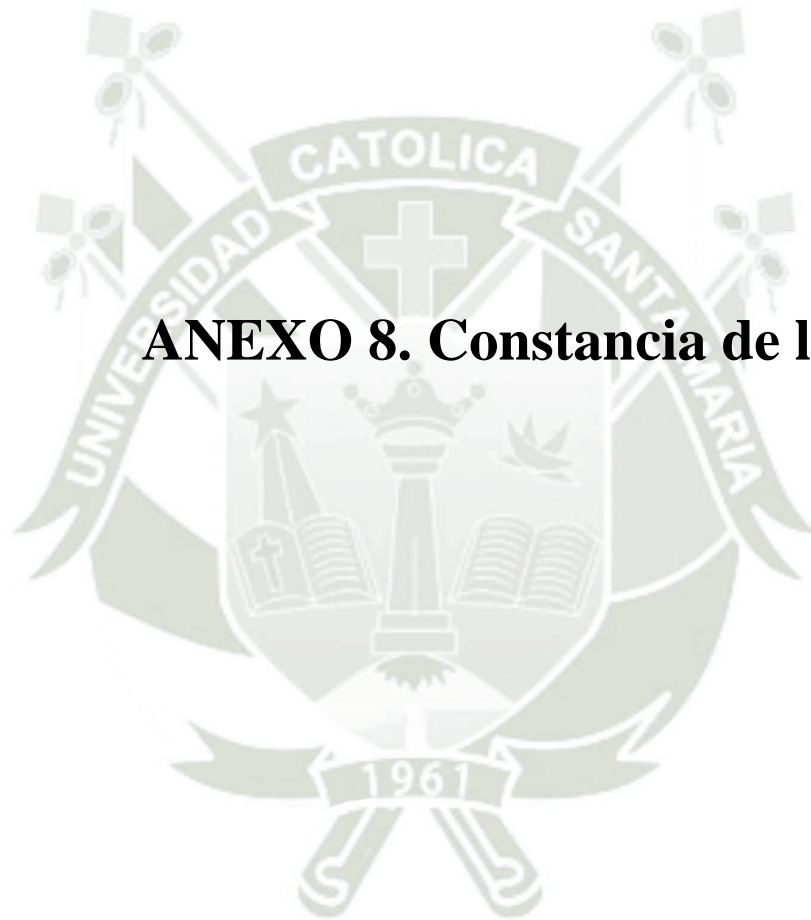




**ANEXO 7. Metodología para el análisis de la demanda
química de oxígeno en muestras de agua por
el método colorimétrico (reflujo cerrado)**

Método colorimétrico estándar (flujo cerrado) para la determinación de DQO (APHA, et al., 2012; Marín y Colina, 2013; Muñoz, 2022)

- a) Primero es necesario estimar el contenido de Cl⁻ en la muestra, si la concentración es >2000 mg/L, precipitarlo usando HgSO₄ en una proporción de 10:1 (HgSO₄: Cl⁻).
- b) Colocar los tubos de vidrio de digestión de 10 mL en una gradilla y rotularlos.
- c) Precalentar el equipo de digestión a 150°C.
- d) Verter 1.25 mL de muestra y/o patrón en el tubo de digestión. Aplicar factor de dilución para las muestras si es necesario (considerando la concentración inicial de DQO dado en la muestra).
- e) Agregar 0.75 mL de solución digestora de dicromato de potasio y mezclar ligeramente.
- f) Adicionar cuidadosamente 1.75 mL del reactivo de ácido sulfúrico. Prevenir quemaduras por sobrecalentamiento de los tubos de vidrio por la reacción química.
- g) Mezclar el contenido de los tubos por inversión completa, dos o tres veces con el vortex.
- h) Disponer los tubos de digestión en el bloque digestor precalentado a 150 °C.
- i) Dejar asimilar las muestras durante 2 h a 150 °C.
- j) Retirar cuidadosamente los tubos del bloque digestor.
- k) Enfriar a temperatura ambiente al menos 30 min.
- l) Realizar las lecturas de absorbancia (600 nm) a cada una de las soluciones (blancos, patrones y muestras) utilizando celdas de 1 cm de trayecto óptico.



ANEXO 8. Constancia de laboratorio



GERENCIA DE PRODUCCION Y TRATAMIENTO
DEPARTAMENTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

Arequipa, 10 de Abril del 2025

OFICIO N° 003-2025/S-50200

Señor: Dr. Jorge Luis Cáceres Arce
Rector Universidad Católica de Santa María

Asunto: Trabajo de investigación de alumnos de la UCSM en la PTAR Escalerilla.
Arequipa.

De mi mayor consideración:

Por medio del presente se hace constar:

Que las bachilleres en Ingeniería Ambiental pertenecientes a la Universidad Católica de Santa María, Colque Phocco Isabel y Del Carpio Concha Katheryne, de acuerdo al cronograma establecido, para el desarrollo de la experimentación correspondiente a la tesis de investigación titulada: **EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL COLOR DE LUZ SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE LA Chlorella vulgaris ASOCIADO TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMO MEDIO DE CULTIVO Y SUBSECUENTE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL COMO ALTERNATIVA DE ECONOMÍA CIRCULAR**, utilizaron las instalaciones para muestreo, conservación de muestras y uso del laboratorio de ensayo, ubicado en la PTAR La Escalerilla entre los meses de julio del 2023 hasta setiembre del 2024, asimismo, durante su permanencia demostraron responsabilidad y disciplina para sus labores asignadas.

Se expide este documento a solicitud de los interesados para los fines que vean por conveniente.

Sin otro particular, agradecemos su atención al presente.

Atentamente



Firmado digitalmente por:
SARDON FLORES Victor Hugo FAU
20100211034 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 11/04/2025 07:16:28-0500

ING°. Victor Hugo Sardón Flores
Jefe Dpto. de Tratamiento de Aguas Residuales
SEDAPAR S.A.

C. c.: G.P.y

Archivo.