



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**“CULTIVO DE *NANNOCHLOROPSIS OCVLATA* EMPLEANDO UN
FOTOBIOREACTOR TIPO RGB-LED Y BioICatre®”**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

KAREN ALCUDÍA CALDERÓN

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. JOSÉ RAMÓN LAINES CANEPA

EN CODIRECCIÓN DE:

DR. JOSÉ AURELIO SOSA OLIVIER

VILLAHERMOSA, TABASCO. MAYO 2025

ANEXO 2
Declaración de Autoría y Originalidad.

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 28 de Marzo del año 2025 el que suscribe **KAREN ALCUDIA CALDERÓN** alumna del Programa de **Ingeniería Ambiental** con número de matrícula **182G24076** adscrito a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentado para la obtención del título de **Licenciatura en Ingeniería Ambiental** y titulado **“CULTIVO DE NANNOCHLOROPSIS OCULATA EMPLEANDO UN FOTOBIORREACTOR TIPO RGB-LED Y BioICatre®”** dirigido por el Dr. José Ramón Laines Canepa.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido del la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 28 de marzo del 2025.

Nombre y Firma del Tesista

Karen A.C

Karen Alcudia Calderón

ANEXO 3



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 01 de Abril de 2025

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. KAREN ALCUDIA CALDERÓN** egresada de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: "**CULTIVO DE NANNOCHLOROPSIS OCULATA EMPLEANDO UN FOTOBIORREACTOR TIPO RGB-LED Y BiolCatre®**".

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN



ABRIL 01 DE 2025

**C. KAREN ALCUDIA CALDERÓN
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
PRESENTE**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: "**CULTIVO DE NANNOCHLOROPSIS OCULATA EMPLEANDO UN FOTOBIORREACTOR TIPO RGB-LED Y BioCatre®**", asesorado por el Dr. José Ramón Laines Canepa y Dr. José Aurelio Sosa Olivier, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por la MCA. Ma. Guadalupe Rivas Acuña, Mtra. Melvin Rocío Santos Márquez, Dr. José Ramón Laines Canepa, MCA. Deysi del Carmen Marín García y MIPA. Luis Fernando Broca Martínez.

**ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

 Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



**2025
AÑO DE LA
Mujer
Indígena**

28 de marzo de 2025

**C. Karen Alcudia Calderón
Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental**

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (Tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional "CULTIVO DE *NANNOCHLOROPSIS OCULATA* EMPLEANDO UN FOTOBIOREACTOR TIPO RGB-LED Y BioCatre®".

OBSERVACIONES:

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y fuentes pequeñas (o palabras), y se limitó el tamaño de coincidencias a 16 palabras.

| | |
|-------------------------------|---|
| RESULTADO DE SIMILITUD | 4 % |
| | 8590 palabras, 9 coincidencias y 7 fuentes |

Finalmente, se le solicita a la **C. Karen Alcudia Calderón**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p. Dr. José Ramón Laines Canepa. Director de tesis
C.c.p. Dr. José Aurelio Sosa Olivier. Codirector de tesis
C.c.p. Archivo



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

Resultados del porcentaje del programa de similitud (SOFTWARE)

CULTIVO DE NANNOCHLOROPSIS OCULATA EMPLEANDO UN FOTOBIORREACTOR TIPO RGB-LED Y BioICatre®

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|--|--------------------|
| 1 | es.scribd.com Internet | 66 palabras — 1% |
| 2 | dspace.esPOCH.edu.ec Internet | 53 palabras — 1% |
| 3 | ojs.upv.es Internet | 46 palabras — 1% |
| 4 | bikceei.emprenemjunts.es Internet | 36 palabras — < 1% |
| 5 | uvadoc.uva.es Internet | 21 palabras — < 1% |
| 6 | www.researchgate.net Internet | 19 palabras — < 1% |
| 7 | Antuanett N Silvia Zambrano, Esperanza R Ayón-Haro, Rocío del Pilar González Chávez. "El efecto del tiempo postexodoncia y la edad en la viabilidad celular total de la pulpa dental", Revista Odontológica Mexicana Órgano Oficial de la Facultad de Odontología UNAM, 2022 | 17 palabras — < 1% |

Anexo 4

Carta de cesión de derechos.

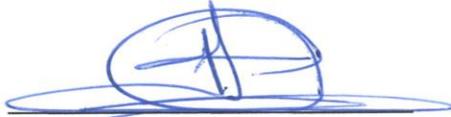
Villahermosa, Tabasco a 9 de Abril del 2025.

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **“CULTIVO DE NANNOCHLOROPSIS OCLATA EMPLEANDO UN FOTOBIORREACTOR TIPO RGB-LED Y BioCatre®”** Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



Karen Alcúdia Calderón



Dr. José Ramón Laines Canepa



MCA. José Aurelio Sosa Olivier

TESTIGOS



José Roberto Hernández Zoraya



Jesús Alberto Méndez Bactista

Agradecimientos

Gracias a Dios, por darme la salud, la paciencia y la sabiduría para seguir adelante.

A mi familia, especialmente a mi mamá Marcela, mi tía Nereyda, a mis primos Marisol, José Martín, mis hermanos, mis abuelos y a todos aquellos que contribuyeron con su amor incondicional y palabras de aliento.

A mi asesor de tesis, el Dr. Laines, gracias por su paciencia, por compartir conmigo su conocimiento, por guiarme cuando dudaba del rumbo, y por exigirme siempre un poco más para ser mejor.

Al maestro Aurelio, y al maestro Rudy Solis por ayudarme ante mis dudas y compartir su conocimiento. Al maestro Leonardo por ayudarme en un momento de apuro.

A mi amiga Sandra, gracias por ayudarme en todo, por escucharme, por tus palabras de aliento recordándome siempre que podía con más de lo que creía y por acompañarme con tu amistad en cada etapa de esta carrera.

A mi amiga Diana, gracias por hablar primero, por las risas, tu amistad y tu apoyo durante estos años.

A mi amiga Luz, gracias por ser ese espacio seguro, por escucharme hablar de cualquier cosa con atención y por cada consejo que me diste, valoro la amistad que compartimos.

A mis mascotas, mis gatos Aristeo, Saturnina, Cleo, y Mu-mu, por estar ahí en las largas noches de estudio, su compañía silenciosa pero tan significativa. Y en especial a esas mascotas que ya no están.

Cada uno contribuyó a mi formación profesional y humana.

De corazón, Gracias!

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | XI |
| ÍNDICE DE TABLAS | XII |
| RESUMEN..... | XIII |
| ABSTRACT:..... | XIV |
| | |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2 MARCO TEORICO..... | 3 |
| 2.1 Microalgas..... | 3 |
| 2.2 Factores clave para el cultivo de microalgas. | 3 |
| 2.2.1 Luz. | 3 |
| 2.2.2 Salinidad | 3 |
| 2.2.3 Temperatura..... | 4 |
| 2.2.4 pH. | 4 |
| 2.2.5 CO ₂ | 4 |
| 2.3 Medios de cultivo | 5 |
| 2.3.1 Nutrientes..... | 5 |
| 2.4 Agitación | 5 |
| 2.5 Fotobiorreactores..... | 6 |
| 2.5.1 Biorreactores cerrados:..... | 6 |
| 2.5.2 Fotobiorreactores planos: | 6 |
| 2.5.3 Fotobiorreactores tubulares: | 6 |
| 2.5.4 Fotobiorreactores helicoidales: | 6 |
| 3 JUSTIFICACIÓN..... | 7 |
| 4 OBJETIVOS..... | 8 |
| 4.1 General | 8 |
| 4.2 Específicos..... | 8 |
| 5 METODOLOGÍA | 9 |
| 5.1 Área de estudio..... | 9 |
| 5.2 Diseño experimental | 9 |
| 5.3 Microalgas..... | 9 |

| | |
|---|----|
| 5.4 Materiales | 10 |
| 5.4.1 Fotobiorreactor..... | 11 |
| 5.5 Métodos | 12 |
| 5.5.1 Viabilidad por el método de tinción. | 12 |
| 5.5.2 Medios de cultivo. | 12 |
| 5.5.2.1 BiolCatre®..... | 12 |
| 5.5.2.2 Vitaminas..... | 13 |
| 5.5.2.3 Agua de mar..... | 13 |
| 5.5.3 Preparación de la muestra y fotobiorreactor. | 13 |
| 5.5.3.1 Muestras estándar..... | 13 |
| 5.5.3.2 Fotobiorreactor..... | 14 |
| 5.5.3.3 Inoculación de los cultivos..... | 14 |
| 5.5.3.4 Inyección de CO ₂ | 17 |
| 5.5.4 Monitoreo y medición..... | 17 |
| 5.5.4.1 Evaluación de la cinética de crecimiento. | 17 |
| 5.5.4.2 Absorbancia | 18 |
| 5.5.4.3 pH y temperatura. | 18 |
| 5.5.4.4 Sólidos suspendidos totales, turbidez y color..... | 19 |
| 5.5.4.5 Viabilidad | 20 |
| 6 RESULTADOS | 22 |
| 6.1 Resultados de temperatura:..... | 22 |
| 6.2 Resultados de Turbidez. | 24 |
| 6.3 Resultados estadístico de Sólidos Suspendidos Totales. | 26 |
| 6.4 Resultados de color. | 28 |
| 6.5 Resultado estadístico de pH. | 30 |
| 6.6 Resumen Estadístico para Absorbancia | 32 |
| 6.7 Resultados estadísticos para recuento de células..... | 34 |
| 7 CONCLUSIÓN..... | 37 |
| 8 REFERENCIAS | 38 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Plataforma de iluminación RGB-LED. Fuente: UTEX (2024)..... | 11 |
| Figura 2. Fotobiorreactor, accesorios y bomba de aire. Fuente: UTEX (2024)..... | 11 |
| Figura 3. Vitaminas y BiolCatre®..... | 13 |
| Figura 4 y 5. Muestras estándar con luz blanca y roja..... | 14 |
| Figura 6. Cámara de Neubauer y Microtubo. Realización de viabilidad por el método de tinción. | 15 |
| Figura 7 . Inoculación de la corrida A en el fotobiorreactor. | 15 |
| Figura 8 y 9. Inoculación de la corrida B y Fotobiorreactor colocado en la plataforma de iluminación con luz roja..... | 16 |
| Figura 10. Inoculación de la corrida C después de agregar el BiolCatre®..... | 16 |
| Figura 11. Inyección de CO ₂ al cultivo de microalgas en el fotobiorreactor..... | 17 |
| Figura 12. Medición de absorbancia..... | 18 |
| Figuras 13 y 14. Monitoreo de pH y temperatura..... | 18 |
| Figura 15. Muestra diluida en el frasco para medir, color, turbidez y Sólidos Suspendidos. | 19 |
| Figuras 16, 17 y 18. Mediciones de Color, Turbidez y Solidos suspendidos totales. | 19 |
| Figura 19. Conteo de células viables y no viables en la cámara de Neubauer. | 20 |
| Figura 20. Registro del conteo de células en hemocitómetro de Neubauer mejorado..... | 21 |
| Figura 21. Temperatura de los diferentes tratamientos..... | 23 |
| Figura 22. Turbidez de los diferentes tratamientos. | 25 |
| Figura 23. Sólidos suspendidos totales de los diferentes tratamientos..... | 27 |
| Figura 24. Color de los diferentes tratamientos. | 29 |
| Figura 25. pH de los diferentes tratamientos. | 31 |
| Figura 26. Absorbancia de los diferentes tratamientos. | 33 |
| Figura 27. Conteo celular de los tratamientos..... | 36 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Materiales, equipos y los reactivos utilizados..... | 10 |
| Tabla.2 Resumen estadístico de temperatura para cada uno de los 3 niveles de Tratamiento..... | 22 |
| Tabla 3. ANOVA para temperatura por tratamiento. | 23 |
| Tabla 4. Resultados estadísticos de Turbidez para cada uno de los 3 niveles de tratamiento..... | 24 |
| Tabla 5. Prueba de Kruskal-Wallis para Turbidez por Tratamiento..... | 25 |
| Tabla 6. Resumen de los diferentes estadísticos de Sólidos suspendidos totales para cada tratamiento. | 26 |
| Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para Sólidos suspendidos totales por Tratamiento. | 27 |
| Tabla 8. Resumen estadístico de color para cada uno de los tratamientos. | 28 |
| Tabla 9. Prueba de Kruskal-Wallis para Color por Tratamiento..... | 29 |
| Tabla 10. Estadísticos de pH para cada uno de los 3 niveles de tratamiento. | 30 |
| Tabla 11. ANOVA para pH por Tratamiento..... | 31 |
| Tabla 12. Resumen estadístico de absorbancia para cada uno de los 3 niveles de tratamiento..... | 32 |
| Tabla 13. Prueba de Kruskal-Wallis para Absorbancia por Tratamiento..... | 33 |
| Tabla 14. Resumen estadístico de células para cada uno de los 3 tratamientos. | 34 |
| Tabla 15. Prueba de Kruskal-Wallis para Células por tratamiento. | 36 |

RESUMEN

Las microalgas marinas de la especie *Nannochloropsis oculata* son una fuente rica en aminoácidos, proteínas, vitaminas B12 y C, y Omega 3, con amplias aplicaciones en las industrias farmacéutica, alimentaria, agrícola y cosmética. Sin embargo, su producción enfrenta desafíos relacionados con altos costos y el impacto ambiental derivado del uso de productos químicos en cultivos a gran escala, lo que ha incentivado la búsqueda de métodos sustentables de cultivo. El objetivo de este estudio fue evaluar el crecimiento de *Nannochloropsis oculata* en cultivos a escala de laboratorio utilizando un fotobiorreactor con iluminación LED roja y el fertilizante orgánico BiolCatre® en diferentes concentraciones. Se empleó un fotobiorreactor equipado con luces LED de color rojo para realizar cultivos experimentales. Las pruebas incluyeron la aplicación de diferentes concentraciones del fertilizante orgánico BiolCatre®, midiendo el crecimiento celular en función de la densidad óptica de los cultivos en cada tratamiento. El tratamiento correspondiente a la corrida 1, donde se utilizó 1 ml de fertilizante orgánico BiolCatre®, mostró los mejores resultados con un valor promedio de crecimiento de $1.01139E8$, superando significativamente a las demás concentraciones evaluadas. El uso de un fotobiorreactor con iluminación LED roja y fertilizante orgánico BiolCatre® en bajas concentraciones demostró ser una estrategia prometedora para el cultivo de *Nannochloropsis oculata* de manera más sustentable. Este enfoque podría contribuir a reducir costos de producción y minimizar el impacto ambiental asociado con los métodos tradicionales de cultivo.

Palabras clave: Microalgas marina, *Nannochloropsis oculata*, Cultivo sustentable, Fotobiorreactor, Fertilizante orgánico.

ABSTRACT:

Marine microalgae of the species *Nannochloropsis oculata* are a rich source of amino acids, proteins, vitamins B12 and C, and Omega 3, with extensive applications in the pharmaceutical, food, agricultural, and cosmetic industries. However, production faces challenges such as high costs and environmental impacts associated with the use of chemicals in large-scale cultivation, driving the demand for more sustainable production methods. To evaluate the growth of *Nannochloropsis oculata* in laboratory-scale cultures using a photobioreactor equipped with red LED lighting and the organic fertilizer BiolCatre® at different concentrations. A photobioreactor with red LED illumination was utilized for experimental cultures. Various concentrations of BiolCatre® organic fertilizer were tested, and cell growth was assessed by measuring the optical density of the cultures under each treatment. The highest growth was observed in the first trial, which used 1 ml of BiolCatre® organic fertilizer, achieving an average value of 1.01139E, outperforming all other tested concentrations. The use of a photobioreactor with red LED lighting and low concentrations of BiolCatre® organic fertilizer proved to be a promising approach for cultivating *Nannochloropsis oculata* sustainably. This method has the potential to reduce production costs and minimize the environmental impact associated with conventional cultivation practices.

Keywords: Marine microalgae, *Nannochloropsis oculata*, Sustainable cultivation, Photobioreactor, Organic fertilizer

1 INTRODUCCIÓN

Las microalgas cuentan con una gran capacidad de adaptación y supervivencia, son capaces de colonizar todo tipo de ambientes, con aproximadamente 100,000 especies identificadas y distribuidas alrededor del mundo (Tebbani, 2020; Olmedo, 2019). Las microalgas son organismos microscópicos que requieren para su crecimiento de algunos nutrientes, agua, luz, CO₂ y sales minerales entre las que se encuentran principalmente alguna fuente de nitrógeno como nitrato o amonio y una fuente de fósforo que suele ser algún fosfato inorgánico. El cultivo de microalgas puede ser llevado a cabo mediante diferentes modos nutricionales, tales como el autotrófico, heterotrófico y el mixotrófico (Rehmanji-Mohammed *et al.*, 2021).

En presencia de la luz, las microalgas pueden asimilar el CO₂ para poder crecer mientras producen metabolitos y oxígeno a través de la fotosíntesis. Es por ello que estos microorganismos se consideran como los principales productores de oxígeno. Se pueden encontrar en ambientes de agua dulce, aguas termales e incluso en el hielo, en aguas ácidas o hipersalinas. Algunas especies incluso logran soportar temperaturas muy bajas o extremas. Una gran adaptabilidad resultado de sus propiedades morfológicas (Tebbani, 2020).

Las microalgas poseen muchas ventajas como el rápido crecimiento, el cual puede llegar a grandes volúmenes. Estos microorganismos pueden ser utilizados para distintos fines y a nivel industrial son consideradas un recurso importante debido a su capacidad natural de fijar dióxido de carbono y de almacenar aceites (Tenorio *et al.*, 2023). Por eso las microalgas han sido identificadas como un recurso biológico prometedor para el suministro de la generación de alimentos, biocombustibles, entre otros. La biomasa de estos microorganismos presenta una gran gama de productos potenciales como proteínas, lípidos, carbohidratos, pigmentos y vitaminas. Además, se ha propuesto como una herramienta para el tratamiento de las aguas residuales y la mitigación de CO₂.

Para el cultivo de microalgas es necesario utilizar un sistema diseñado especialmente para su óptimo crecimiento, el fotobiorreactor que se utilice debe

ser seleccionado adecuadamente en función a la cepa, los productos objetivos y las condiciones ambientales (Manzoni *et al.*, 2021).

Los fotobiorreactores con plataforma de iluminación RGB-LED (módulo LED que puede producir casi cualquier color mezclando los colores primarios rojo, verde y azul) están diseñados para experimentación y mantenimiento a escala de banco de cultivos de stock con el fin de ser utilizados para cultivar en fotobiorreactores más grandes. La plataforma de iluminación cuenta con luces LED rojas, azules y verdes, las cuales pueden personalizarse y así probar cual es la fuente de luz óptima para una especie en particular (UTEX, 2023).

La especie *Nannochloropsis oculata* es una microalga de agua salada con una rica fuente de lípidos, altas tasas de crecimiento y tolerancia a temperaturas altas, también soporta diferentes condiciones de salinidad (Gárate *et al.*, 2022).

En la actualidad, se ha generalizado el uso de medios de cultivo sintéticos en el cultivo de microalgas debido a su eficacia. Sin embargo, ha surgido una creciente inquietud sobre su impacto ambiental, atribuible al constante desarrollo de nuevas sustancias químicas. Estos medios de cultivo pueden generar una considerable contaminación ambiental y provocar efectos adversos en la salud tanto humana como animal. Por ende, se está explorando alternativas viables, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, como los medios de cultivo naturales o aquellos basados en residuos orgánicos.

El objetivo de la investigación es evaluar la influencia del color de luz roja en el crecimiento de *Nannochloropsis Oculata* en un fotobiorreactor de plataforma de iluminación RGB-LED (UTEX) utilizando el fertilizante BiolCatre® mostrando el efecto de las 3 concentraciones diferentes de fertilizante.

2 MARCO TEORICO

2.1 Microalgas.

Nannochloropsis es un género de algas de la clase *Eustigmatophyceae*, compuesto por cuatro especies marinas y una de agua dulce. En cuanto a los pigmentos, el género *Nannochloropsis* contiene únicamente clorofila a, con una ausencia distintiva de clorofila b y c, mientras que los carotenoides predominantes son xantofilas (Andriopoulos *et al.*, 2022).

Nannochloropsis oculata pertenecen a la clase *Eustigmatophyceae* y se caracteriza principalmente por su forma esférica o cilíndricas, miden entre 2 y 4 mm, contiene clorofila "a" y otros pigmentos como astaxantina, zeaxantina y canthaxantina, los cloroplastos presentan coloración de amarillo a verde, además son unicelulares (Osorio *et al.*, 2020). Se cultiva a temperaturas cálidas de entre 22-30°C, con periodicidad de luz de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad.

2.2 Factores clave para el cultivo de microalgas.

2.2.1 Luz.

Las microalgas tienen antenas captadoras de luz que absorben principalmente las longitudes de onda de la luz (400-700 nm) en el espectro visible (Johnson *et al.*, 2018). A través de la cinética de crecimiento para *N. oculata* los cultivos a intensidades de luz baja tienen una fase de adaptación prolongada a diferencia de los cultivos con intensidades de luz alta (Aguilar *et al.*, 2020). Varias investigaciones han indicado que la luz de tonalidad azul genera tasas de producción de oxígeno más reducidas que la luz roja en cianobacterias, así como en algas rojas.

2.2.2 Salinidad

La salinidad es un parámetro abiótico importante para el cultivo de microalgas que ha sido menos estudiado que la temperatura, el pH y la intensidad luminosa. Tanto la hiposalinidad como la hipersalinidad, tienen un efecto en la velocidad de crecimiento celular, el volumen celular y la composición de la biomasa. En la

Nannochloropsis, la fracción lipídica aumenta generalmente con la disminución de la salinidad (Andriopoulos *et al.*, 2022).

2.2.3 Temperatura.

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en los cultivos de microalgas. Una temperatura óptima para el cultivo se encuentra generalmente entre los 20 y 24 °C, estos valores varían dependiendo del medio de cultivo y la cepa utilizada (Muñiz, 2019).

La influencia de la temperatura en los cultivos de microalgas es un aspecto crucial, no solo en la producción de biomasa sino también en la elección de las zonas de producción, ya que puede afectar negativamente al cultivo cuando la temperatura supera ciertos límites (González *et al.*, 2022).

2.2.4 pH.

El pH es un factor determinante para el cultivo de microalgas, debido a que determina la solubilidad del dióxido de carbono e influye de manera directa o indirecta en el metabolismo. Un valor poco favorable puede afectar la absorción de nutrientes y la producción de metabolitos. Este factor varía con el crecimiento del cultivo (Gómez, 2021). Los valores de pH elevados también pueden provocar la eliminación de fosfatos por precipitación. Cuando el CO₂ es un factor limitante, la utilización de bicarbonato a través de mecanismos de concentración de carbono puede aumentar el pH. La absorción de nitrato y amonio aumenta y disminuye el pH, respectivamente. *N. oculata* puede crecer en un intervalo de pH entre 6.5 y 9.5, con una óptima para el crecimiento en 8 (Andriopoulos *et al.*, 2022).

2.2.5 CO₂

En relación con el CO₂ en particular, diferentes especies y cepas de algas requieren diferentes concentraciones óptimas para obtener la máxima producción de biomasa. Normalmente, influye en la composición bioquímica de microalgas, principalmente de eficiencia para la fotosíntesis de las microalgas e induce la síntesis de proteínas relevantes, también influye en la acumulación de

carbohidratos de la biomasa algal (Jiménez, M. 2021. Ruangsomboon *et al.*, 2022).

2.3 Medios de cultivo

N. Oculata es capaz de desarrollarse en diferentes medios de cultivo con condiciones de luz variables (Aguilar *et al.*, 2020). El medio de cultivo contribuye a que las microalgas se puedan desarrollar y mantener.

La asimilación de los nutrientes inorgánicos constituye la alimentación de las microalgas y, por tanto, limitan su desarrollo. Éstos pueden ser divididos en macronutrientes y micronutrientes. (Salgueiro, 2018).

2.3.1 Nutrientes

Los nutrientes para el cultivo de microalgas deben incluir elementos inorgánicos, vitaminas como la B1, B12 (Tiamina, cianocobalamina) y biotina, (Jimenez, M. 2021). Pero también micronutrientes como el nitrógeno, el azufre, el carbono, el hierro y el fósforo para crecer y sintetizar moléculas complejas (lípidos, proteínas, carbohidratos). La ausencia o deficiencia de cualquier nutriente tiene consecuencias en las células, como la reducción o el aumento de la acumulación de lípidos (Arribas, 2020).

2.4 Agitación

El cultivo de microalgas debe agitarse para evitar la sedimentación de las células y prevenir efectos de limitación de nutrientes, luz, metabolitos, evitar la estratificación y tener un intercambio eficiente de gases entre el medio de cultivo y el aire (Jiménez *et al.*, 2021). A su vez, la agitación facilita la homogenización del pH. Es necesario tener en cuenta que el grado de agitación está significativamente relacionado con la productividad microalgal. Esto significa que una excesiva agitación, ya sea con agitadores o con burbujeo, podría provocar un estrés hidrodinámico, lo que conlleva a una gran disminución en la tasa de crecimiento (Salgueiro, 2018).

2.5 Fotobiorreactores.

El cultivo de microalgas se puede llevar a cabo en ambientes controlados como los fotobiorreactores. Este se describe como un contenedor artificial que es capaz de generar condiciones necesarias para el crecimiento de células. Los avances tecnológicos en el diseño de estos sistemas han permitido mejorar la productividad de los cultivos para distintos fines.

La especie *Nannochloropsis* es adecuada para el cultivo en fotobiorreactores (FBR), es decir, biorreactores cerrados en los que se utiliza una fuente de luz (natural o artificial) para el cultivo autotrófico de esta especie (Zanella *et al.*, 2020).

2.5.1 Biorreactores cerrados:

En estos biorreactores el cultivo está encerrado sin posible intercambio directo de gases con la atmósfera. Las principales ventajas son el control y monitoreo de las condiciones (temperatura pH y luz), minimizar la evaporación de agua y la ausencia de contaminación externa. La luz puede ser artificial tanto como natural (Arribas, 2020).

2.5.2 Fotobiorreactores planos:

Principalmente utilizado para producir organismos fototróficos ya que facilita la medición de irradiancia en la superficie del cultivo. No es uno de los más utilizados en la producción de microalgas debido a su alto costo.

2.5.3 Fotobiorreactores tubulares:

Se compone de una serie de tubos hechos de un material transparente y colocados de manera vertical o horizontal conectados a un sistema de tuberías. Cuenta con una bomba para mantener una circulación constante del cultivo.

2.5.4 Fotobiorreactores helicoidales:

Consisten en tubos de diámetros pequeños y flexibles que se envuelven en un cilindro vertical. La circulación del cultivo se logra con una bomba. (Torres, 2021).

3 JUSTIFICACIÓN

La investigación sobre el "Uso de luz roja para el cultivo de *Nannochloropsis oculata* empleando un fotobiorreactor tipo RGB-LED y BiolCatre®" se justifica en esta tesis en dimensiones clave: ambiental, económica, social y sustentable. Desde una perspectiva ambiental, el estudio busca optimizar las condiciones de crecimiento de *Nannochloropsis Oculata*, una microalga conocida por su capacidad para capturar dióxido de carbono y producir biomasa. Al emplear luz roja, se pretende maximizar la eficiencia fotosintética y, por ende, aumentar la producción de oxígeno y reducir las emisiones de bióxido de carbono, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. En el ámbito económico, el uso de un fotobiorreactor tipo RGB-LED y el biofertilizante BiolCatre® podría resultar en un cultivo más eficiente y rentable de *Nannochloropsis Oculata*. La optimización de las condiciones de iluminación y de nutrientes contenidos en el BiolCatre® pueden aumentar significativamente la productividad, generando beneficios económicos tanto en la producción de biomasa como en posibles aplicaciones industriales de la microalga, como biocombustibles, alimentos o productos farmacéuticos. Desde una perspectiva social, la investigación puede tener impactos positivos al impulsar la generación de empleo en la industria de la ingeniería ambiental y promover el desarrollo de tecnologías sostenibles. Además, la producción de biomasa de *Nannochloropsis Oculata* puede tener aplicaciones en la seguridad alimentaria y la nutrición, contribuyendo a la salud de las comunidades. La sustentabilidad se aborda al diseñar un sistema que busca optimizar la producción de biomasa de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente. La implementación de tecnologías como el fotobiorreactor tipo RGB-LED y de un biofertilizante como el BiolCatre® reflejan un enfoque integral hacia la sostenibilidad, minimizando los impactos negativos en el ecosistema y promoviendo prácticas amigables con el medio ambiente. En resumen, la tesis propuesta no solo aborda desafíos técnicos en la ingeniería ambiental, sino que también ofrece contribuciones significativas en términos de sostenibilidad, beneficios económicos y mejoras sociales, convirtiéndola en una investigación integral y relevante para el desarrollo sostenible.

4 OBJETIVOS

4.1 General

Evaluar la influencia de luz roja en el crecimiento de *Nannochloropsis oculata* en un fotobiorreactor de plataforma de iluminación RGB-LED (UTEX) con el biofertilizante BiolCatre®.

4.2 Específicos

- Comparar y contrastar el crecimiento de *Nannochloropsis oculata* bajo condiciones de luz roja en el fotobiorreactor de plataforma de iluminación RGB-LED (UTEX), utilizando mediciones cuantitativas como la densidad celular y la tasa de crecimiento.
- Implementar el uso del biofertilizante BiolCatre® en el cultivo de *Nannochloropsis oculata* en un fotobiorreactor de plataforma de iluminación RGB-LED (UTEX), y monitorear los efectos de esta aplicación en la eficiencia del crecimiento bajo condiciones de luz roja.
- Evaluar si el color rojo proporciona las condiciones óptimas para el crecimiento de *Nannochloropsis oculata* en presencia de BiolCatre®, basándose en análisis estadísticos de los datos de crecimiento y composición bioquímica de las algas.

5 METODOLOGÍA

5.1 Área de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de microalgas, ubicado en la planta piloto 3 Tratamiento Atmosférico y de Residuos Sólidos de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, ubicado en el municipio de Centro, Tabasco, México.

5.2 Diseño experimental

Se llevó a cabo un **diseño completamente aleatorizado de un factor** para encontrar diferencias significativas en el crecimiento del alga (variable dependiente) bajo diferentes concentraciones (1 ml, 5 ml y 10 ml) de biofertilizante (variable independiente). Se contó con un testigo el cual no contenía concentración de biofertilizante. Para este estudio se utilizó el mismo reactor para los diferentes tratamientos. Esto implicó controlar las mismas condiciones de cultivo en el tiempo: misma intensidad de luz roja, misma especie de alga, pH y temperatura. La única variación fue la concentración del fertilizante. La evaluación del crecimiento del alga se registró durante 25 días (25 observaciones).

5.3 Microalgas

Se trabajó con la especie de microalgas *Nannochloropsis Oculata* la cual fue obtenida de la colección de Research And Supply® Algae, Carlsbad, CA, USA. Esta especie pertenecen a la clase Eustigmatophyceae y se caracteriza principalmente por su forma esférica o cilíndricas, miden entre 2 y 4 mm, contiene clorofila "a" y otros pigmentos como astaxantina, zeaxantina y canthaxantina y los cloroplastos presentan coloración de amarillo a verde, además son unicelulares (Osorio *et al.*, 2020). Se cultiva a temperaturas cálidas de entre 22-30°C, con periodicidad de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad.

5.4 Materiales

En la tabla No.1 se enlistan los materiales, equipos y los reactivos utilizados en la fase experimental.

Tabla 1. Materiales, equipos y los reactivos utilizados.

| Materiales | Equipos | Reactivos |
|---|--|--|
| Pipeta y micropipeta | Cámara de Neubauer | Agua destilada |
| Matraz | Microscopio óptico trinocular Quasar® QM20 | Vitaminas(Solución ProLine microalga "A" F/2) |
| Porta y cubreobjetos | Balanza | Fertilizante BiolCatre® |
| Vasos de precipitados | Espectrofotómetro Thermo Scientific Modelo Genesys 10S UV-VIS | Sales |
| Mangueras | Fotobiorreactor de plataforma de iluminación RGB-LED (UTEX) | Alcohol |
| Gasas, papel, servilletas, cinta adhesiva | COLORÍMETRO DR/890 | Tinte azul de tripán |
| Microtubos de centrífuga | Medidor portátil de pH Hanna Bomba de aireación WHISPERER 20 Air Pump. Autoclave de vapor eléctrico. Medidor de flujo. Bomba y medidor de gas. | |

5.4.1 Fotobiorreactor

El Fotobiorreactor empleado para esta investigación fue uno con plataforma de iluminación RGB-LED adquirido de la Universidad de Texas (UTEX), la plataforma de iluminación RGB-LED rodea el fotobiorreactor de 2 litros, con luces LED rojas, azules y verdes que pueden personalizarse, cuenta con 60 luces LED en total cinco filas de doce, es decir, Luces LED rojas (626 nm), verdes (525 nm) y azules (470 nm) totalmente ajustables, con superficie de mylar reflectante, una salida de 43,200 milicandelas (MCD), 40,000 horas de uso, fuente de alimentación impermeable, entrada de 120 V / 50-60 Hz y un control remoto por infrarrojos.



Figura 1. Plataforma de iluminación RGB-LED. Fuente: UTEX (2024).

El fotobiorreactor consta de un recipiente de cristal con capacidad de 2 L, incluye una tapa, un desgasificador el cual permite la liberación de los gases que se generan en el sistema dentro de los fotobiorreactores, manguera flexible con filtro preinstalado, ojales, mampara de metal, tubo de aire de metal con difusor de aire preinstalado, tubo de aire de metal adicional y piedras de aire.



Figura 2. Fotobiorreactor, accesorios y bomba de aire. Fuente: UTEX (2024).

Al contener un recipiente con su tapa, se clasifica como fotobiorreactor de sistema cerrado, esto permite un control óptimo durante el bioproceso, de igual forma ayuda a reducir el riesgo de contaminación por microorganismos indeseables, a disminuir el consumo de agua, ofrece una gran relación superficie-volumen y una alta productividad de biomasa.

5.5 Métodos

5.5.1 Viabilidad por el método de tinción.

El método de tinción es una técnica para determinar la viabilidad de las células, diferenciando entre células vivas y muertas mediante el uso de colorantes. Se basan en el supuesto de que las células vivas son impermeables a los colorantes, mientras que ciertos colorantes, como el azul de metileno, el azul tripán, la eosina o el azul del Nilo, tiñen selectivamente las células muertas a medida que penetran en las membranas citoplasmáticas dañadas.(Elizabeth *et al.*, 2021).

5.5.2 Medios de cultivo.

5.5.2.1 BiolCatre®.

Es un fertilizante orgánico líquido que se obtiene de la biodigestión anaerobia con excretas de borrego, cerdo, rumen, vaca y gallina ponedora, este será suministrado por Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE) de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). BiolCatre® es útil como fuente orgánica ya que este contiene algunos elementos como el Nitrógeno (N), Fósforo (P), micronutrientes como Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) y micronutrientes Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Zinc (Zn).

Para usarlo como medio de cultivo para microalgas este fue filtrado y esterilizado en el autoclave de vapor eléctrico, posteriormente colocado en un matraz para su conservación a temperatura ambiente.

5.5.2.2 Vitaminas.

Para el crecimiento óptimo de las microalgas se utilizarán 0.5 mililitros de multivitamínico por cada litro de agua de mar como recomienda la FAO, este contiene tiamina, biotina y Cyanocobalamina. Las Vitaminas (Solución ProLine microalga "A" F/2) de la marca PROAQUA® fueron obtenidas del Laboratorio de Acuicultura Tropical de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Estas contienen minerales iguales a la formulación F/2 de Guillard de 1975. Se conservó en refrigeración.



Figura 3. Vitaminas y BioCatre®

5.5.2.3 Agua de mar.

El agua de mar se preparó con 30 g de sal artificial de la marca Oceanic® por cada litro de agua según lo recomendado por la FAO.

5.5.3 Preparación de la muestra y fotobiorreactor.

5.5.3.1 Muestras estándar.

Se cultivó *N. oculata* de una muestra madre conservada bajo refrigeración. Se colocaron en 2 matraces con 25 ml de algas, 250 ml de agua destilada, 8.8 g de sal, 0.5 de vitaminas y 0.5 BioCatre®. Se colocaron en luz blanca por 3 días y posteriormente se expusieron a luz roja durante 3 días para su aclimatación antes de iniciar las corridas en reactor de 2 litros.



Figura 4 y 5. Muestras estándar con luz blanca y roja.

Las muestras estándar se realizaban antes de cada una de las corridas en el fotobiorreactor ya que, estos cultivos se llevarán a cabo en un solo fotobiorreactor. Al terminar un cultivo éste será reemplazado por un cultivo nuevo con una tasa de viabilidad inicial de microalgas proporcional al agregado al inicio del primer cultivo.

5.5.3.2 Fotobiorreactor.

Se aseguró el funcionamiento de la plataforma de iluminación, el estado de los accesorios y se esterilizó utilizando agua destilada cloro y alcohol.

Se configuró la plataforma de iluminación para emitir exclusivamente luz roja, y se verificó que el reloj al cual se conecta la plataforma de iluminación y la bomba de aire estuviese programado con ciclos de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad para cada uno de los cultivos.

5.5.3.3 Inoculación de los cultivos.

Se realizó viabilidad por el método de tinción para verificar cual de los cultivos estándar era más óptimo, esto en cada uno de los cultivos. Después de determinar la muestra de algas con mayor viabilidad se procedió a agregar 250 mililitros de esta al fotobiorreactor junto con 60 g de sal y 1 mililitro de vitaminas. El agua destilada y la cantidad de BiolCatre® añadida varió en cada una de las corridas.



Figura 6. Cámara de Neubauer y Microtubo. Realización de viabilidad por el método de tinción.

■ **Corrida A**

- 1.744 litros de agua destilada
- 5 mililitros de BiolCatre®



Figura 7. Inoculación de la corrida A en el fotobiorreactor.

■ **Corrida B**

- 1.748 litros de agua destilada
- 1 mililitros de BiolCatre®.

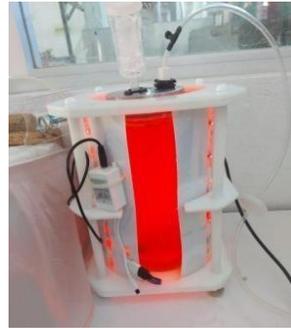


Figura 8 y 9. Inoculación de la corrida B y Fotobiorreactor colocado en la plataforma de iluminación con luz roja.

■ **Corrida C**

- 1.739 litros de agua destilada
- 10 mililitros de BiolCatre®



Figura 10. Inoculación de la corrida C después de agregar el BiolCatre®.

5.5.3.4 Inyección de CO₂

Se suministraron 10 Litros de CO₂ a cada uno de los cultivos, esto 3 días después de ser inoculados en el fotobiorreactor. La inyección se realizó con un medidor de gas en litros y un regulador de gas durante 30 minutos. Después de inyectar el gas se mantuvo el cultivo sin aireación durante 15 minutos y se procedió a tomar el pH.



Figura 11. Inyección de CO₂ al cultivo de microalgas en el fotobiorreactor.

5.5.4 Monitoreo y medición.

5.5.4.1 Evaluación de la cinética de crecimiento.

El crecimiento se midió con recuentos diarios tomando muestras de 20 mililitros del cultivo del fotobiorreactor. Estos recuentos se realizaron mediante el hemocitómetro de Neubauer mejorado “ Hemocytomer Sidekick”. Se colocaba en la cámara de Neubauer 1 gota del cultivo tomada con una micropipeta. Utilizando un microscopio óptico en el objetivo 10x se realizaban las lecturas de los 5 cuadrantes de la cámara por triplicado con los resultados de la concentración celular expresados en células /mL. En alguno de los cultivos se tuvieron que realizar conteos por dilución debido a la gran concentración de microalgas en las muestras; utilizando 1 mililitro de cultivo por 9 mililitros de agua destilada.

5.5.4.2 Absorbancia

Las mediciones de absorbancia fueron tomadas con un Espectrofotómetro Thermo Scientific Modelo Genesys 10S UV-VISo. Se colocaron muestras de 4 mililitros en 3 celdas de cuarzo, las cuales se colocaban dentro del equipo en un carrusel con numeración con capacidad para 5 celdas más 1 blanco. El equipo está programado para medir la absorbancia en 550 nanómetros.

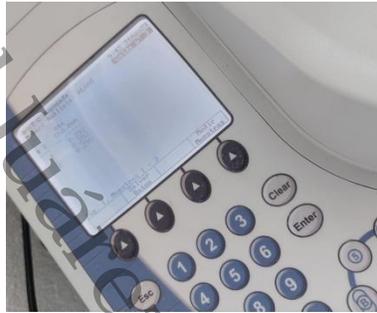
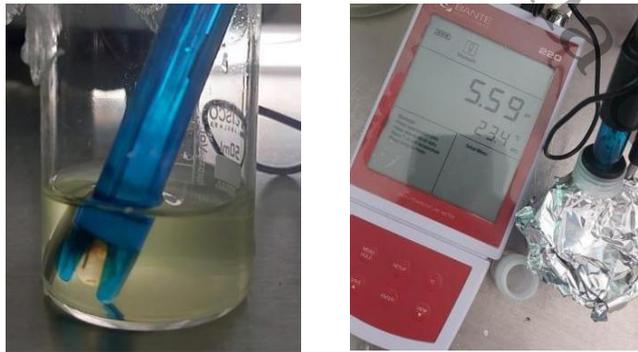


Figura 12. Medición de absorbancia.

5.5.4.3 pH y temperatura.

Las mediciones de temperatura y pH se realizaron utilizando un medidor portátil de pH Hanna y un medidor portátil de pH Bante 220. Para esto se colocaban 20 mililitros del cultivo en vasos de precipitado.



Figuras 13 y 14. Monitoreo de pH y temperatura.

5.5.4.4 Sólidos suspendidos totales, turbidez y color.

Para la medición de estos parámetros se utilizó un colorímetro DR/890, este cuenta con un frasco de cristal transparente en el cual se colocaban las muestras tomadas directamente del fotobiorreactor. Una vez cerrado el frasco con las muestras este se colocaba en el colorímetro cubriéndolo con la tapa para evitar la entrada de luz y asegurándose de que estuviera programado en el parámetro a medir.



Figura 15. Muestra diluida en el frasco para medir, color, turbidez y Sólidos Suspendidos.

Para las algunas mediciones de color se tuvo que diluir la muestra debido que la intensidad del color rebasaba el limite del colorímetro. Estas se realizaron utilizando agua destilada como marcaba la tabla que se encuentra en el manual del colorímetro DR/890.



Figuras 16, 17 y 18. Mediciones de Color, Turbidez y Solidos suspendidos totales.

5.5.4.5 Viabilidad

Para realizar la viabilidad se tomaron muestras de 15 µL del cultivo y 15 µL de azul de tripano, se agregaron en un microtubo de 2 mililitros esperando 15 minutos para poder tomar una gota de la mezcla y colocarla en la cámara de Neubauer. Las células vivas y las células muertas fueron contadas a través de microscopio óptico y con la ayuda del hemocitómetro de Neubauer mejorado “ Hemocytomer Sidekick”.

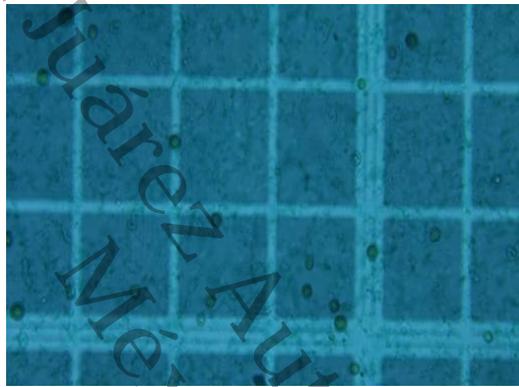


Figura 19. Conteo de células viables y no viables en la cámara de Neubauer.

Después de obtener el número de células viables y no viables por cuadrante de la cámara de Neubauer se pudo determinar el porcentaje de viabilidad y la tasa de crecimiento que corresponde.

- El porcentaje de viabilidad se determinó mediante la siguiente fórmula:
$$\% \text{ viabilidad} = (\text{número de células vivas} / \text{número total de células}) \times 100$$
- El número de células por cuadros se determinó de la siguiente forma:
$$C. \text{ por cuadros} = (\text{Células viables} / \text{número de cuadros contados})$$

- La concentración viable se determinó mediante la siguiente fórmula
 Concentración Viable= (número de células por cuadros × factor de dilución × 10⁴)



Figura 20. Registro del conteo de células en hemocitómetro de Neubauer mejorado.

6 RESULTADOS

6.1 Resultados de temperatura:

La Tabla 2 presenta las temperaturas promedio obtenidas en los distintos tratamientos, junto con sus respectivas desviaciones estándar. Se observa que la aplicación de 1 mL de BiolCatre® resultó en la temperatura más alta, mientras que el tratamiento con 10 mL registró la temperatura más baja.

Estos valores de temperatura se encuentran por debajo de los reportados por Xiaomei (2024), quien empleó temperaturas de 28°C y 25°C en su estudio, observando que la menor temperatura favoreció una mayor densidad celular. Adicionalmente, estudios en microalgas han evidenciado que el estrés térmico afecta la producción de biomasa y la fisiología celular (Chokshi *et al.*, 2020).

Tabla.2 Resumen estadístico de temperatura para cada uno de los 3 niveles de Tratamiento.

| Tratamiento | N. Datos | Temperatura Promedio (°C). | Desviación Estándar (°C) | Coficiente de Variación | Mínimo |
|---------------------|----------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|--------|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 24.6292 | 1.52842 | 6.20573% | 22.3 |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 24.7087 | 1.6113 | 6.52118% | 21.3 |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 23.9757 | 1.11211 | 4.63848% | 21.5 |
| Total | 68 | 24.4543 | 1.45897 | 5.96612% | 21.3 |

La Tabla 3 presenta el análisis de varianza (ANOVA) de la temperatura en los diferentes tratamientos evaluados. Dado que el valor p de la razón F es mayor o igual a 0.05, no se observa una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de temperatura de los distintos niveles de tratamiento, con un nivel de confianza del 95% (Figura 21). Esto indica que las variaciones observadas en la

temperatura no pueden atribuirse al efecto del tratamiento, sino que podrían estar relacionadas con la variabilidad intrínseca del sistema o con factores no controlados en el experimento.

Tabla 3. ANOVA para temperatura por tratamiento.

| Fuente | Suma de Cuadrados | G l | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|-----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 7.0323 | 2 | 3.51615 | 1.69 | 0.1933 |
| Intra grupos | 135.584 | 6 | 2.0859 | | |
| Total (Corr.) | 142.616 | 6 | | | |
| | | 7 | | | |

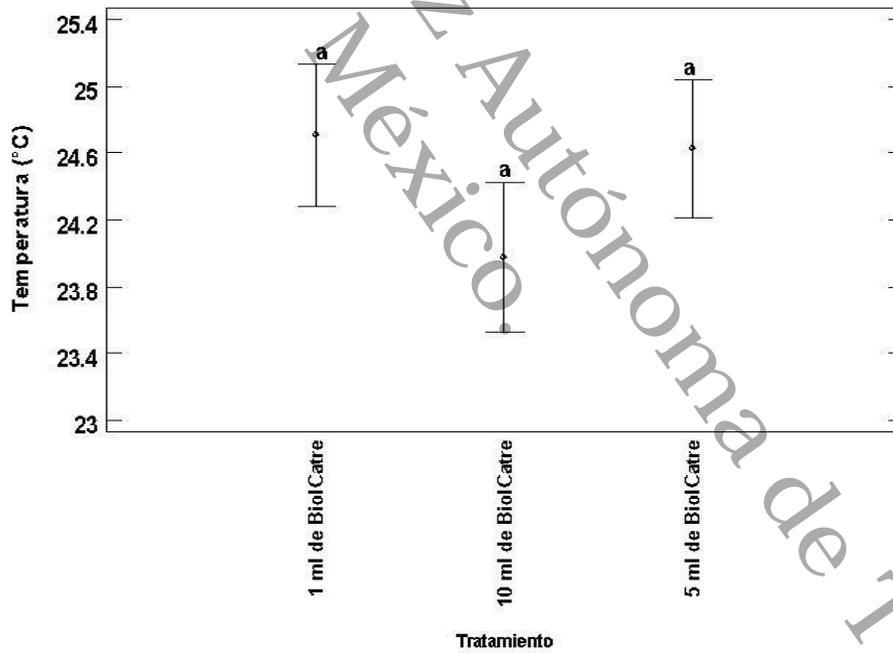


Figura 21. Temperatura de los diferentes tratamientos.

6.2 Resultados de Turbidez.

La Tabla 4 presenta los valores de turbidez promedio, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación para cada uno de los tres niveles de tratamiento con BiolCatre®. Se observa que el tratamiento con 10 mL de BiolCatre® registró el menor valor promedio de turbidez (174.714 NTU), mientras que el tratamiento con 1 mL de BiolCatre® mostró la mayor turbidez promedio (425.522 NTU). Esto sugiere que una mayor concentración de BiolCatre® puede estar relacionada con una reducción de la turbidez en el medio de cultivo.

Tabla 4. Resultados estadísticos de Turbidez para cada uno de los 3 niveles de tratamiento.

| Tratamiento | Recuento | Promedio (NTU) | Mediana | Desviación Estándar | Coficiente de Variación |
|---------------------|----------|----------------|---------|---------------------|-------------------------|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 354.0 | 340.5 | 143.928 | 40.6577% |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 425.522 | 427.0 | 203.099 | 47.7294% |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 174.714 | 158.0 | 84.2206 | 48.2048% |
| Total | 68 | 322.824 | 287.0 | 183.351 | 56.7959% |

En el contexto del cultivo de microalgas, la turbidez es un factor crítico, ya que afecta la penetración de la luz y, en consecuencia, el crecimiento y la productividad de las células fotosintéticas. Estudios previos han demostrado que la turbidez elevada puede reducir la disponibilidad de luz para las microalgas en sistemas de cultivo, lo que afecta su tasa de crecimiento y rendimiento biomásico (Martínez *et al.*, 2018). En sistemas fotobiorreactores y cultivos abiertos, la interacción entre la turbidez y la intensidad lumínica determina la eficiencia del crecimiento algal. En algunos casos, la turbidez generada por la propia biomasa puede limitar la productividad si la luz no penetra adecuadamente en el medio de cultivo.

El coeficiente de variación (CV) se mantiene elevado en todos los tratamientos (40.66% - 48.20%), lo que indica una dispersión significativa en los valores de turbidez. Esto podría estar relacionado con variaciones en la eficiencia de sedimentación de partículas o en la floculación inducida por BioCatre®. Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar el impacto de esta variabilidad en la productividad de las microalgas y determinar si existe una relación clara entre la reducción de la turbidez y el crecimiento celular.

Tabla 5. Prueba de Kruskal-Wallis para Turbidez por Tratamiento.

| Tratamiento | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|--------------------|----------------|----------------|
| 5 ml de BioCatre® | 24 | 39.6458 |
| 1 ml de BioCatre® | 23 | 44.8696 |
| 10 ml de BioCatre® | 21 | 17.2619 |

Estadístico = 23.9105 Valor-P = 0.00000642529

La prueba de Kruskal-Wallis evaluó la hipótesis de que las medianas de Turbidez dentro de cada uno de los 3 niveles de tratamiento son iguales. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

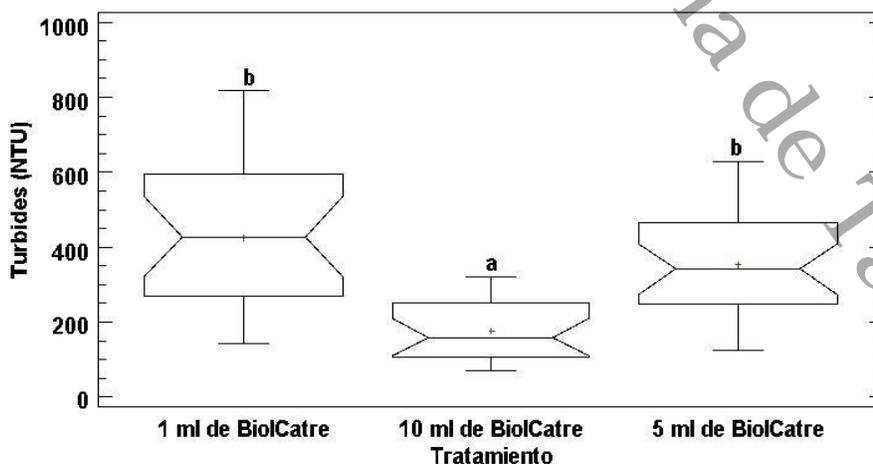


Figura 22. Turbidez de los diferentes tratamientos.

6.3 Resultados estadístico de Sólidos Suspendidos Totales.

La Tabla 6 presenta los valores promedio, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación para los sólidos suspendidos totales en cada uno de los tratamientos con BiolCatre®. Se observa que el tratamiento con 1 mL de BiolCatre® registró el mayor promedio de sólidos suspendidos (329.91 mg/L), mientras que el tratamiento con 10 mL de BiolCatre® mostró la menor concentración promedio (154.33 mg/L). Esto sugiere que el incremento en la dosis de BiolCatre® podría estar relacionado con una mayor eficiencia en la reducción de sólidos suspendidos en el medio de cultivo.

Tabla 6. Resumen de los diferentes estadísticos de Sólidos suspendidos totales para cada tratamiento.

| Tratamiento | Recuento | Promedio (mg/L) | Mediana | Desviación Estándar | Coefficiente de Variación |
|---------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------------|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 272.625 | 262.0 | 120.219 | 44.0967% |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 329.913 | 333.0 | 159.159 | 48.2427% |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 154.333 | 138.0 | 80.1981 | 51.9642% |
| Total | 68 | 255.471 | 234.0 | 142.874 | 55.9256% |

La presencia de sólidos suspendidos en medios de cultivo de microalgas influye en la disponibilidad de luz y en la eficiencia del crecimiento celular. Estudios previos han demostrado que la reducción de sólidos suspendidos en el medio mejora la eficiencia fotosintética y la tasa de crecimiento de las microalgas, al reducir la atenuación de la luz y mejorar la disponibilidad de nutrientes (Serejo *et al.*, 2021). En particular, se ha encontrado que la filtración de sólidos suspendidos no afecta negativamente la productividad de las microalgas, lo que sugiere que la eliminación de estos sólidos puede ser beneficiosa para mejorar la calidad del medio sin comprometer la biomasa producida.

En este estudio, el coeficiente de variación (CV) es relativamente alto en todos los tratamientos (44.10% - 51.96%), lo que indica una dispersión considerable en la concentración de sólidos suspendidos. Esto sugiere que factores adicionales, como la tasa de sedimentación o la capacidad de agregación de las partículas en el medio, podrían estar influyendo en la distribución de los sólidos suspendidos.

La Tabla 7 muestra el rango promedio de cada uno de los tratamientos obtenido con la prueba de Kruskal-Wallis en donde se observa que 5 mL de BioLCatre® obtuvo un rango promedio de 38.125 siendo menor al obtenido por el tratamiento de 1 mL de BioLCatre®. El valor-P es menor a 0.05.

Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para Sólidos suspendidos totales por Tratamiento.

| Tratamiento | Tamaño Muestra | Rango Promedio (mg/L) |
|---------------------|----------------|-----------------------|
| 5 ml de BioLCatre® | 24 | 38.125 |
| 1 ml de BioLCatre® | 23 | 43.913 |
| 10 ml de BioLCatre® | 21 | 20.0476 |

Estadístico = 17.2378 Valor-P = 0.000180658

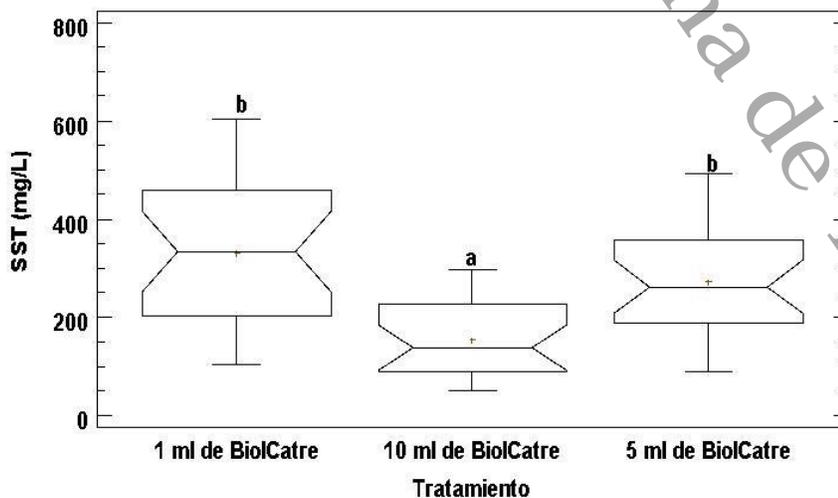


Figura 23. Sólidos suspendidos totales de los diferentes tratamientos.

6.4 Resultados de color.

La Tabla 8 presenta los valores promedio, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación para el parámetro de color en cada uno de los tratamientos con BiolCatre®. Se observa que el tratamiento con 10 mL de BiolCatre® registró el menor valor promedio de unidades de color (1409 C.U.), mientras que el tratamiento con 1 mL de BiolCatre® presentó la mayor intensidad de color (3138.09 C.U.). Esto sugiere que una mayor concentración de BiolCatre® podría estar relacionada con una mayor eficiencia en la reducción de compuestos responsables del color en el medio.

Tabla 8. Resumen estadístico de color para cada uno de los tratamientos.

| Tratamiento | Recuento | Promedio (C.U.) | Mediana (C.U.) | Desviación n Estándar(C.U.) | Coefficiente de Variación(C.U) |
|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|---|---|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 3001.67 | 3345. 0 | 1394.72 | 46.4647% |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 3138.09 | 3220. 0 | 1765.74 | 56.2681% |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 1409.0 | 1330. 0 | 744.766 | 52.8578% |
| Total | 68 | 2555.96 | 2370. 0 | 1567.46 | 61.3257% |

El color en el medio de cultivo puede influir en la eficiencia fotosintética de las microalgas al afectar la cantidad y calidad de la luz disponible para la fotosíntesis. Investigaciones previas han demostrado que la turbidez y el color en medios de cultivo de microalgas pueden reducir la penetración de la luz, limitando el crecimiento y la productividad celular (Martínez *et al.*, 2018). En particular, la presencia de compuestos cromóforos puede disminuir la eficiencia del cultivo, especialmente en sistemas abiertos donde la disponibilidad de luz es un factor crítico.

El coeficiente de variación (CV) es relativamente alto en todos los tratamientos (46.46% - 56.27%), lo que indica una dispersión significativa en los valores de

color. Esto sugiere que factores adicionales, como la composición química del medio y la interacción de los componentes del BiolCatre®, podrían estar influyendo en la reducción del color.

Tabla 9. Prueba de Kruskal-Wallis para Color por Tratamiento.

| Tratamiento | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------------------|----------------|----------------|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 41.0833 |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 40.913 |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 19.9524 |

Estadístico = 16.4482 Valor-P = 0.000268113

En la Tabla 9 se presentan los rangos del color promedio obtenidos mediante el análisis de Kruskal-Wallis para los diferentes tratamientos. El valor-P es menor a 0.05, lo que indica una diferencia estadística significativa entre los tratamientos.

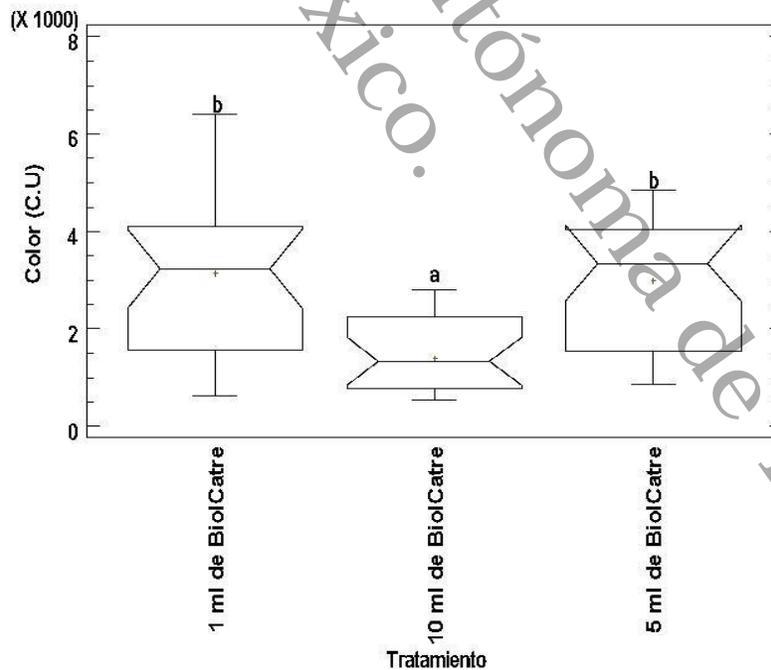


Figura 24. Color de los diferentes tratamientos.

6.5 Resultado estadístico de pH.

La Tabla 10 presenta los valores promedio, desviación estándar, coeficiente de variación y el valor mínimo del pH para cada uno de los tratamientos con BiolCatre®. Se observa que los tratamientos con 1 mL y 10 mL de BiolCatre® presentan valores promedio de pH similares (8.018 y 8.040, respectivamente), mientras que el tratamiento con 5 mL de BiolCatre® registró un valor menor (7.644). Todos los valores promedio de pH se encuentran por encima del valor reportado en estudios previos con *Chlorella sp.*, como el de Castillo (2023) que encontró un pH óptimo entre 7.23 para el crecimiento y producción de *Chlorella sp.*

Tabla 10. Estadísticos de pH para cada uno de los 3 niveles de tratamiento.

| Tratamiento | Recuento | Promedio | Desviación Estándar | Coeficiente de Variación | Mínimo |
|---------------------|----------|----------|---------------------|--------------------------|--------|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 7.64417 | 0.470688 | 6.15748% | 7.02 |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 8.01783 | 0.535435 | 6.67806% | 7.1 |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 8.04048 | 0.489974 | 6.09385% | 7.23 |
| Total | 68 | 7.89294 | 0.525548 | 6.65845% | 7.02 |

La Tabla 11 presenta los resultados del ANOVA para el parámetro de pH entre los tratamientos. Dado que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa en la media de pH entre al menos dos de los tratamientos, con un nivel de confianza del 95.0% (Figura 25).

Tabla 11. ANOVA para pH por Tratamiento.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 2.30114 | 2 | 1.15057 | 4.62 | 0.0134 |
| Intra grupos | 16.2043 | 65 | 0.249296 | | |
| Total (Corr.) | 18.5054 | 67 | | | |

Este análisis muestra que la variabilidad entre los tratamientos es estadísticamente significativa, lo que sugiere que el tratamiento influye en el pH de manera notable.

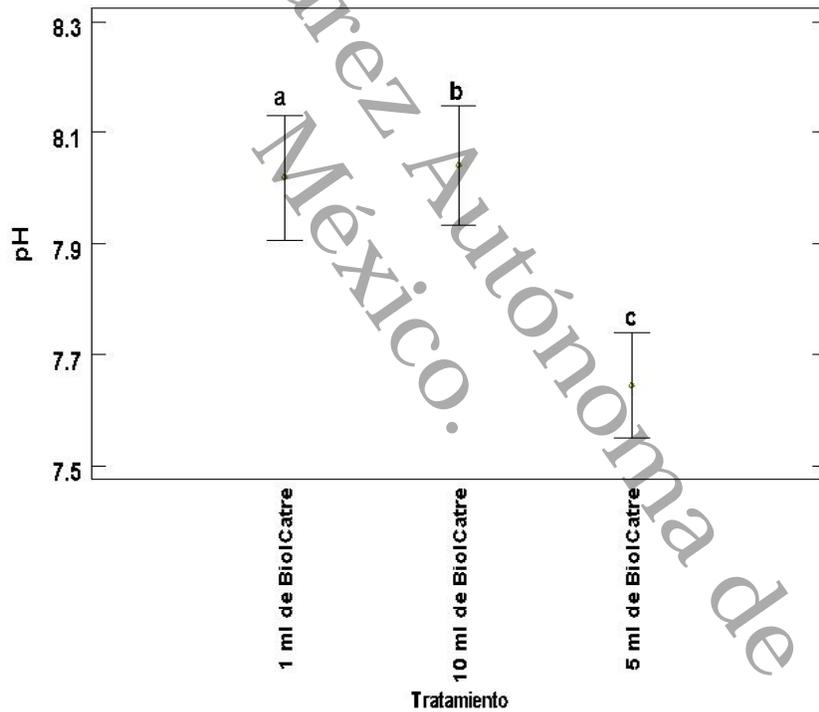


Figura 25. pH de los diferentes tratamientos.

6.6 Resumen Estadístico para Absorbancia

La Tabla 12 presenta los valores estadísticos de absorbancia para cada uno de los tratamientos con BiolCatre®. Se observa que el tratamiento con 1 mL de BiolCatre® registró el mayor valor promedio de absorbancia (0.675 AU), mientras que el tratamiento con 10 mL de BiolCatre® mostró el menor valor promedio (0.272 AU). Esto sugiere que una mayor cantidad de BiolCatre® podría estar relacionada con una reducción en la absorbancia del medio en comparación con dosis menores.

Tabla 12. Resumen estadístico de absorbancia para cada uno de los 3 niveles de tratamiento.

| Tratamiento | Recuento | Promedio | Mediana | Desviación Estándar | Coefficiente de Variación |
|---------------------|----------|----------|---------|---------------------|---------------------------|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 0.570625 | 0.576 | 0.232723 | 40.7839% |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 0.674609 | 0.721 | 0.294286 | 43.6233% |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 0.272286 | 0.248 | 0.13224 | 48.5666% |
| Total | 68 | 0.513662 | 0.4735 | 0.283841 | 55.2584% |

Los valores de absorbancia están por encima de los reportados en estudios previos, como el de Alejos (2023), quien observó valores máximos de 0.445 AU y 0.443 AU en cultivos de *Chaetoceros calcitrans*. En el contexto del cultivo de microalgas, la absorbancia es un parámetro crucial que refleja la densidad óptica del cultivo y está relacionada con la cantidad de biomasa celular en suspensión.

En la Tabla 13, se muestran los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para absorbancia entre los tratamientos. El tratamiento con 1 mL de BiolCatre® tiene el mayor rango promedio, mientras que el tratamiento con 10 mL tiene el menor, lo que indica una respuesta más baja en este tratamiento. Por su parte, el tratamiento con 5 mL presenta una variabilidad intermedia entre los dos extremos.

Tabla 13. Prueba de Kruskal-Wallis para Absorbancia por Tratamiento.

| Tratamiento | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|--------------------|----------------|----------------|
| 1 ml de BiolCatre | 23 | 45.3478 |
| 10 ml de BiolCatre | 21 | 17.2143 |
| 5 ml de BiolCatre | 24 | 39.2292 |

Estadístico = 24.3432 Valor-P = 0.00000517538

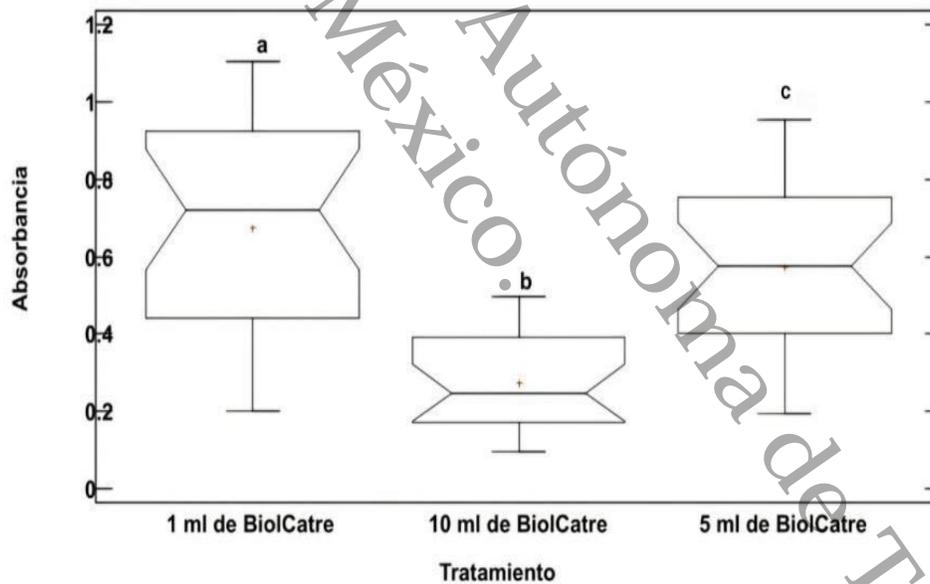


Figura 26. Absorbancia de los diferentes tratamientos.

6.7 Resultados estadísticos para recuento de células.

El coeficiente de variación (CV) es mayor en el tratamiento con 1 mL de BiolCatre® (57.13%), lo que indica una mayor dispersión en los valores obtenidos, posiblemente debido a variaciones en el metabolismo celular o la interacción de los nutrientes presentes en el medio. Esta variabilidad podría deberse a que concentraciones bajas de BiolCatre® favorecen la proliferación celular hasta un punto óptimo, pero incrementos en la concentración pueden inducir estrés osmótico o afectar la disponibilidad de nutrientes (Tabla 14).

Tabla 14. Resumen estadístico de células para cada uno de los 3 tratamientos.

| Tratamiento | Recuento | Promedio | Mediana | Desviación Estándar | Coefficiente de Variación |
|---------------------|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------------|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 6.91977E7 | 8.169E7 | 2.28543E7 | 33.0275% |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 1.01139E8 | 1.326E8 | 5.77805E7 | 57.1296% |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 5.55924E6 | 5.69E6 | 1.72672E6 | 31.0604% |
| Total | 68 | 6.03484E7 | 4.549E7 | 5.30713E7 | 87.9415% |

Estos resultados coinciden con estudios previos sobre el efecto de los nutrientes en la densidad celular de microalgas. Sanuddin (2023) observaron que en cultivos de *Nannochloropsis sp.*, la adición de ciertos nutrientes a concentraciones moderadas incrementaba la densidad celular, pero dosis más altas generaban una disminución en el crecimiento, posiblemente debido a la saturación de nutrientes, o efectos tóxicos en la fisiología celular.

El cultivo puede reproducirse con una sola dosis inicial del fertilizante BiolCatre® al igual que los cultivos presentados por Osorio *et al.* (2020) donde utilizó una sola dosis inicial de F/2 Guillard en diferentes concentraciones de salinidad.

Además, los valores obtenidos en este estudio para el recuento celular ($1.01E8$ cel/mL en 1 mL de BiolCatre®) se encuentran por encima de los reportados por Caiza (2023), quien obtuvo un máximo de $4.5E6$ cel/mL en cultivos de *Chlorella* sp. con luz roja durante 27 días. Esto sugiere que el BiolCatre® podría estar proporcionando un efecto promotor del crecimiento celular, aunque se recomienda realizar estudios adicionales para determinar su impacto a largo plazo y en diferentes condiciones ambientales.

La Tabla 15 presenta los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para comparar los efectos de tres tratamientos de BiolCatre® (1 ml, 10 ml y 5 ml) en términos de recuento celular.

El valor-P obtenido ($1.83539E-10$) es significativamente menor que 0.05, lo que indica que existen diferencias altamente significativas entre los tratamientos. Esto significa que al menos uno de los tratamientos es diferente de los otros, con el tratamiento 1 ml destacándose como el más efectivo, la diferencia en la efectividad entre los tratamientos con 1 ml y 5 ml no es tan grande. Sin embargo, el tratamiento con 10 ml es significativamente menos eficaz en comparación con ambos, lo que podría sugerir que un volumen mayor no necesariamente se traduce en un mejor resultado.

Tabla 15. Prueba de Kruskal-Wallis para Células por tratamiento.

| Tratamiento | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------------------|----------------|----------------|
| 5 ml de BiolCatre® | 24 | 41.0833 |
| 1 ml de BiolCatre® | 23 | 49.087 |
| 10 ml de BiolCatre® | 21 | 11.0 |

Estadístico = 44.8372 Valor-P = 1.83539E-10

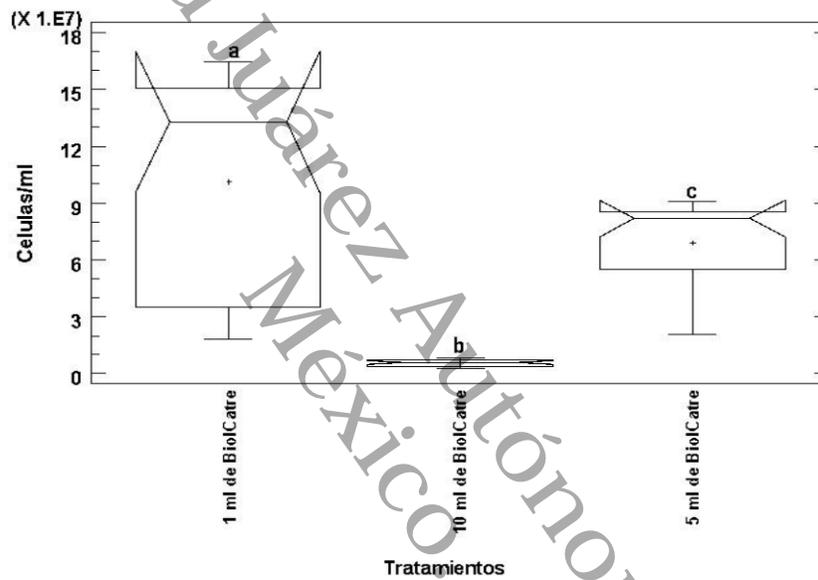


Figura 27. Conteo celular de los tratamientos.

7 CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que el tratamiento con 1 mL de BiolCatre® favoreció de manera óptima el crecimiento celular de *Nannochloropsis oculata*, mientras que dosis mayores (5 mL y 10 mL) resultaron menos efectivas. Esto sugiere que un exceso de biofertilizante podría generar efectos adversos, posiblemente debido a fenómenos de sobrealimentación o toxicidad que alteran el equilibrio de nutrientes esenciales para el desarrollo de las microalgas.

Además, la luz roja se identificó como un estímulo eficaz para promover el crecimiento de *N. oculata*, lo que confirma su importancia como factor clave en la optimización del cultivo de esta especie. Sin embargo, los hallazgos resaltan la necesidad de ajustar cuidadosamente la dosis del biofertilizante para evitar alteraciones fisiológicas que puedan afectar la capacidad de asimilación y la viabilidad del cultivo a largo plazo.

Este estudio cumple con los objetivos planteados, validando que la combinación de luz roja con una dosis óptima de BiolCatre® es una estrategia viable para maximizar el crecimiento de *N. oculata*. A partir de estos resultados, se abre una nueva línea de investigación enfocada en la optimización y producción de esta microalga para diversas aplicaciones.

Entre las posibles áreas de investigación futura se sugiere evaluar la calidad de la biomasa obtenida con BiolCatre®, su rentabilidad para la producción a escala de biocombustibles o alimentos, su impacto en otras especies de algas marinas, y la exploración de otros biofertilizantes orgánicos. Estas investigaciones contribuirían al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en biotecnología, agricultura y remediación ambiental, fortaleciendo el potencial de *Nannochloropsis oculata* en aplicaciones industriales.

8 REFERENCIAS

Aguilar R. R., Martínez M. M. 2020. Efecto de diferentes condiciones de cultivo en composición química y parámetros de crecimiento de *Nannochloropsis Oculata* para su posible uso como biosorbente de contaminantes. Memorias del V. Congreso Nacional de Tecnologías y Ciencias Ambientales. (pp. 62). México: ITSON

Alejos Cabrera, R. M., Ynga Huamán, G. A., & Gaspar Reyes, W. A. (2023). Uso del método espectrofotométrico para la cuantificación celular de microalgas marinas de uso en la acuicultura. *Revista ION*, 36(3), 75–84. <https://doi.org/10.18273/revion.v36n3-2023007>

Andriopoulos, V., Lamari, F. N., Hatziantoniou, S., & Kornaros, M. (2022). Production of Antioxidants and High Value Biomass from *Nannochloropsis oculata*: Effects of pH, Temperature and Light Period in Batch. *Photobioreactors. Marine drugs*, 20(9), 552. <https://doi.org/10.3390/md20090552>

Arribas, A. (2020). Fotobiorreactores, técnicas y parámetros implicados en la producción de biocombustibles de origen microalgal. [Tesis Grado en Ingeniería Química]. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.

Caiza-Lincango, K., Soto, G., & Coello, M. (2023). Influencia de las longitudes de onda en el crecimiento de cepas aisladas de *Chlorella* sp. *Tesla Revista Científica*, 3(2), e316. <https://doi.org/10.55204/trc.v3i2.e316>

Chokshi, K., Pancha, I., Trivedi, K., Maurya, R., Ghosh, A., & Mishra, S. (2020). Physiological responses of the green microalga *Acutodesmus dimorphus* to temperature induced oxidative stress conditions.. *Physiologia plantarum*. <https://doi.org/10.1111/ppl.13193>.

Elisabeth, B., Rayen, F. y Behnam, T. (2021). Indicadores de calidad del cultivo de microalgas: una revisión. *Critical Reviews in Biotechnology* , 41 (4),457–473. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1854672>

Garate, A., Valdez, A., Franco, M., Guevara, O., & Santos, D. 2022. Análisis del comportamiento de *Nannochloropsis oculata* cultivada en un fotobiorreactor bajo condiciones de estrés térmico. *Identidad energética: Todosobre energía*. Vol. 5, No. 2.

http://cinergiaug.org/Revista/VI_2022.2/REVISTA2022_Vol5_N2_23Dic22.12.pdf.

González Hernández, J., Rodríguez Miranda, E., Guzmán Sánchez, J. L., Acien Fernández, F. G., & Visioli, A. (2022). Optimización de temperatura en reactores raceway para la producción de microalgas mediante regulación de nivel. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, 19(2),164–173. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16586>

Gómez L. L., Ortega D., Tormos C. L. 2021. Efecto del pH sobre el crecimiento y viabilidad celular de una cepa local de *Chlorella vulgaris Beijerinck*. *Tecnología Química*, 41(2), 252-276. Epub 30 de julio de 2021. Recuperado en 01 de febrero de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222461852021000200252&lng=es&tlng=es.

Jimenez Escobedo, M. ., & Castillo Calderón, A. 2021. Biomasa microalgal con alto potencial para la producción de biocombustibles. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 265-282. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.030>

Johnson, T. J., Katuwal, S., Anderson, G. A., Gu, L., Zhou, R., & Gibbons, W. R. (2018). Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. *Biotechnology progress*, 34(4), 811–827. <https://doi.org/10.1002/btpr.2628>

Lomas, E. 2017. El empleo de las microalgas en la agricultura sostenible.
Martínez, C., Mairet, F., & Bernard, O. (2018). Theory of turbid microalgae cultures. *Journal of Theoretical Biology*, 456, 190-200
<https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.07.016>

Manzoni, M., C., & Martínez, A. 2021. Perspectivas sobre los sistemas de cultivo de microalgas: una revisión crítica. Vol.25 No.5.
<https://smbb.mx/wpcontent/uploads/2021/12/Manzoni-Maroneze-et-al.-2021.pdf>
(30 de enero de 2024)

Muñiz, R. 2019. Los fotobiorreactores de microalgas: Un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales: Microalgae photobioreactors: A resource for tertiary wastewater treatment. *Tekhné*, 22(3). Recuperado a partir de <https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/4062>

Olmedo Galarza, V. 2019. Carbohydrates and proteins in microalgae: potential functional foods. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22, e2019043.
<https://doi.org/10.1590/1981-6723.04319>

Osorio, K., Palacios, K., Lumbi, D., Hsieh, P., Zuniga-González, C. A., & Aguilar, A. (2020). Capacidad reproductiva de *Nannochloropsis oculata* en diferentes concentraciones de salinidad y fertilizante: Una contribución a la bioeconomía acuícola. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 6(12).
<https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i12.9977>

Potes C. D., Valle M. R. 2020. Uso de la aplicación GLOBE observer Mosquito Habitat mapper para la identificación de criaderos potenciales de *Aedes aegypti* en dos municipios del departamento del Atlántico, Colombia. En N. Ríos, G. Dévora, R. Ulloa, y E. Yepiz (Comp.). *Memorias del V. Congreso Nacional de Tecnologías y Ciencias Ambientales*. (pp. 11). México: ITSON

Rehmanji M., Suresh S., Nesamma A. A., Jutur P. P. 2021. Chapter 26 Microalgal cell factories, a platform for high-value-added biorenewables to improve the economics of the biorefinery, Editor(s): Surajit Das, Hirak Ranjan Dash, Microbial and Natural Macromolecules, Academic Press, Pages 689731, ISBN 9780128200841, DOI:10.1016/B978-0-12-820084-1.00027-2

Castillo Rojas, E. W. (2023). Efecto de la densidad poblacional de chlorella sp en la remoción de acetaminofén del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín, Cajamarca, 2021. [Tesis de maestría] Universidad nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5709>

Ruangsomboon, S., & Chonudomkul, D. (2022). Effect of CO₂ Concentration on Growth, CO₂ Fixation, and Biochemical Composition of the Microalga *Nannochloropsis oculata*. CHIANG MAI JOURNAL OF SCIENCE, 49(2), 325-338.

Salgueiro, J.(2018). Cultivo de microalgas en aguas residuales y aprovechamiento energético de la biomasa algal.[Tesis doctoral].Universidad de Vigo.

Serejo, M., Ruas, G., Braga, G., Paulo, P., & Boncz, M. (2021). *Chlorella vulgaris* growth on anaerobically digested sugarcane vinasse: influence of turbidity.. Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 93 1, e20190084 . <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190084>.

Tebbani, S. 2020. Biofijación de CO₂ por microalgas: modelado, estimación y control. ISTE.

Tenorio, C., Hernández, H., Aguirre, M. y Aguilar, C. (2023). Actualización del Manual para obtención de cepas de microalgas. Inf Inst Mar Perú, 50(1),68-82.

Torres, Y. 2021. Fotobiorreactores para el cultivo de microalga *Chlorella vulgaris*. Renia. Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura. Vol.2 (3) e24 (2021) ISSN: 2307-471X

Torres-Virviescas, Martha J.; Henao-Castro, Alejandro; Coulson-Reinel, Johana P. and Tejada-Benitez, Lesly. (2023). Efecto de lixiviado sobre el crecimiento de consorcios de microalgas marinas y dulceacuícolas. Rev.MVZ Cordoba [online]. vol.28, n.3, pp.21-31. Epub Oct 31, 2024.ISSN 0122-0268.
<https://doi.org/10.21897/rmvz.3202>

UTEX Culture Collection of Algae. UTEX RGB-LED Lighting Platform. UTEX Culture Collection of Algae. 2020. [en línea]. Disponibilidad: <https://utex-org.translate.goog/collections/pbr-relatedproducts/products/utex-rgb-led-lightingplatform? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es419& x tr pto=sc>. Fecha de consulta: 25 Enero 2024

UTEX Culture Collection of Algae. Culture Maintenance. UTEX Culture Collection of Algae. 2020 [en línea]. Disponibilidad: <https://utex.org/pages/culture-maintenance>. Fecha de consulta: 25 Enero 2024.

UTEX Culture Collection of Algae. (2020). UTEX Photobioreactor: Basic Package. UTEX Culture Collection of Algae. [en línea]. Disponibilidad: <https://utex.org/collections/pbr-related-products/products/utexphotobioreactor-basic-package>. Fecha de consulta: 25 Enero 2024.

Shang Xiaomei , Yang Yaning , Zan Yongling , Sun Zhenwei , Lu Zhengyi , Sun Jun (2024) Effects of temperature on the growth, total lipid content and fatty acid composition of *Skeletonema dohrnii*. Journal of Frontiers in Marine Science, Volumen 11.
<https://www.frontiersin.org/journals/marinescience/articles/10.3389/fmars.204.1361157>.

Sanuddin, N., Hairol, M., Nian, C., Robles, R., Illud, H., Muyong, J., Ebbah, J., & Sarri, J. (2023). Impact of Different Nutrient Enrichment Concentrations on the Growth of Microalga *Nannochloropsis* sp. (Monodopsidaceae) Culture. *Acta Natura et Scientia*. <https://doi.org/10.29329/actanatsci.2023.353.09>.

Zanella, L., & Vianello, F. (2020). Microalgae of the genus *Nannochloropsis*: Chemical composition and functional implications for human nutrition. *Journal of Functional Foods*, 68, 103919.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ANEXO 7

| Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional | |
|---|---|
| Título de la Tesis: | “CULTIVO DE <i>NANNOCHLOROPSIS OCULATA</i> EMPLEANDO UN FOTOBIORREACTOR TIPO RGB-LED Y BiolCatre®” |
| Autor(a) o autores(as) de la Tesis: | Karen Alcudía Calderón |
| ORCID: | https://orcid.org/0009-0005-0874-3225 |
| Resumen de la Tesis: | Las microalgas marinas de la especie <i>Nannochloropsis oculata</i> son una gran fuente de aminoácidos, proteínas vitaminas B12, C y Omega 3, por lo tanto son un gran interés debido a su gran variedad de aplicaciones en la industria farmacéutica, alimentaria, agrícola y cosmética, etc., y una de las principales fuentes de investigación para instituciones privadas y públicas. Sin |

| | |
|--|---|
| | <p>embargo, los costos de producción para dichas industrias son elevados, además de la utilización de químicos para los cultivos de algas a gran escala que perjudican el ambiente optando por la producción de manera sustentable debido a la preferencia de los consumidores. En este trabajo se propuso utilizar un fotobiorreactor con plataforma de iluminación de luces LED para realizar cultivos a escala laboratorio con el propósito de evaluar el crecimiento de <i>Nannochloropsis Oculata</i> con el fertilizante orgánico BiolCatre® en diferentes concentraciones y luces de color rojo. Como resultado, se determinó que la corrida 1, donde se utilizó 1 mililitro de fertilizante orgánico alcanzó los resultados más altos con un valor promedio de 1.01139E8.</p> |
| <p>Palabras claves de la Tesis:</p> | <p>Palabras clave: Microalgas marina, <i>Nannochloropsis oculata</i>, Cultivo sustentable, Fotobiorreacto, Fertilizante orgánico.</p> |

Referencias de la Tesis:

Aguilar R. R., Martínez M. M. 2020. Efecto de diferentes condiciones de cultivo en composición química y parámetros de crecimiento de *Nannochloropsis Oculata* para su posible uso como biosorbente de contaminantes. Memorias del V. Congreso Nacional de Tecnologías y Ciencias Ambientales. (pp. 62). México: ITSON

Alejos Cabrera, R. M., Ynga Huamán, G. A., & Gaspar Reyes, W. A. (2023). Uso del método espectrofotométrico para la cuantificación celular de microalgas marinas de uso en la acuicultura. *Revista ION*, 36(3), 75–84.

<https://doi.org/10.18273/revion.v36n3-2023007>

Andriopoulos, V., Lamari, F. N., Hatziantoniou, S., & Kornaros, M. (2022). Production of Antioxidants and High Value Biomass from *Nannochloropsis oculata*: Effects of pH, Temperature and Light Period in Batch. *Photobioreactors. Marine drugs*, 20(9), 552.

<https://doi.org/10.3390/md20090552>

Arribas, A. (2020). Fotobiorreactores, técnicas y parámetros implicados en la producción de biocombustibles de origen

| | |
|--|---|
| | <p>microalgal. [Tesis Grado en Ingeniería Química]. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.</p> <p>Caiza-Lincango, K., Soto, G., & Coello, M. (2023). Influencia de las longitudes de onda en el crecimiento de cepas aisladas de <i>Chlorella</i> sp. <i>Tesla Revista Científica</i>, 3(2), e316. https://doi.org/10.55204/trc.v3i2.e316</p> <p>Chokshi, K., Pancha, I., Trivedi, K., Maurya, R., Ghosh, A., & Mishra, S. (2020). Physiological responses of the green microalga <i>Acutodesmus dimorphus</i> to temperature induced oxidative stress conditions. <i>Physiologia plantarum</i>. https://doi.org/10.1111/ppl.13193.</p> <p>Elisabeth, B., Rayen, F. y Behnam, T. (2021). Indicadores de calidad del cultivo de microalgas: una revisión. <i>Critical Reviews in Biotechnology</i> , 41 (4),457–473. https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1854672</p> <p>Garate, A., Valdez, A., Franco, M., Guevara, O., & Santos, D. 2022. Análisis del comportamiento de <i>Nannochloropsis oculata</i> cultivada en un fotobiorreactor bajo condiciones de estrés térmico. <i>Identidad</i></p> |
|--|---|

| | |
|--|--|
| | <p>energética: Todosobre energía. Vol. 5, No. 2. http://cinergiaug.org/Revista/VI_2022.2/REVISTA2022_Vol5_N2_23Dic22.12.pdf.</p> <p>González Hernández, J., Rodríguez Miranda, E., Guzmán Sánchez, J. L., Acíen Fernández, F. G., & Visioli, A. (2022). Optimización de temperatura en reactores raceway para la producción de microalgas mediante regulación de nivel. <i>Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial</i>, 19(2),164–173. https://doi.org/10.4995/riai.2022.16586</p> <p>Gómez L. L., Ortega D., Tormos C. L. 2021. Efecto del pH sobre el crecimiento y viabilidad celular de una cepa local de <i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck. <i>Tecnología Química</i>, 41(2), 252-276. Epub 30 de julio de 2021. Recuperado en 01 de febrero de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222461852021000200252&lng=es&tlng=es.</p> <p>Jimenez Escobedo, M. ., & Castillo Calderón, A. 2021. Biomasa microalgal con alto potencial para la producción de biocombustibles. <i>Scientia Agropecuaria</i>,</p> |
|--|--|

| | |
|--|--|
| | <p>12(2), 265-282. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.030</p> <p>Johnson, T. J., Katuwal, S., Anderson, G. A., Gu, L., Zhou, R., & Gibbons, W. R. (2018). Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. <i>Biotechnology progress</i>, 34(4), 811–827. https://doi.org/10.1002/btpr.2628</p> <p>Lomas, E. 2017. El empleo de las microalgas en la agricultura sostenible.</p> <p>Martínez, C., Mairet, F., & Bernard, O. (2018). Theory of turbid microalgae cultures. <i>Journal of Theoretical Biology</i>, 456, 190-200 https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.07.016</p> <p>Manzoni, M., C., & Martínez, A. 2021. Perspectivas sobre los sistemas de cultivo de microalgas: una revisión crítica. Vol.25 No.5. https://smbb.mx/wpcontent/uploads/2021/12/Manzoni-Maroneze-et-al.-2021.pdf (30 de enero de 2024)</p> <p>Muñiz, R. 2019. Los fotobiorreactores de microalgas: Un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales: Microalgae.</p> |
|--|--|

| | |
|---|---|
| <p>Universidad Juárez del Estado de Durango</p> | <p>photobioreactors: A resource for tertiary wastewater treatment. Tekhné, 22(3). Recuperado a partir de https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/4062</p> <p>Olmedo Galarza, V. 2019. Carbohydrates and proteins in microalgae: potential functional foods. Brazilian Journal of Food Technology, 22, e2019043. https://doi.org/10.1590/1981-6723.04319</p> <p>Osorio, K. Palacios, K. 2020. Capacidad reproductiva de Nannochloropsis oculata en diferentes concentraciones de salinidad y fertilizante: Una contribución a la Bioeconomía acuícola. Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, Nicaragua. vol. 6, núm. 12. http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/8745/1/3941759003.pdf.</p> <p>Potes C. D., Valle M. R. 2020. Uso de la aplicación GLOBE observer Mosquito Habitat mapper para la identificación de criaderos potenciales de Aedes aegypti en dos municipios del departamento del Atlántico, Colombia. En N. Ríos, G. Dévora,</p> |
|---|---|

| | |
|--|--|
| <p>Universidad Juárez Autónoma de México</p> | <p>R. Ulloa, y E. Yepiz (Comp.). Memorias del V. Congreso Nacional de Tecnologías y Ciencias Ambientales. (pp. 11). México: ITSON</p> <p>Rehmanji M., Suresh S., Nesamma A. A., Jutur P. P. 2021. Chapter 26 Microalgal cell factories, a platform for high-value-added biorenewables to improve the economics of the biorefinery, Editor(s): Surajit Das, Hirak Ranjan Dash, Microbial and Natural Macromolecules, Academic Press, Pages 689731, ISBN 9780128200841. DOI:10.1016/B978-0-12-820084-1.00027-2</p> <p>Castillo Rojas, E. W. (2023). Efecto de la densidad poblacional de chlorella sp en la remoción de acetaminofén del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín, Cajamarca, 2021. [Tesis de maestría] Universidad nacional de Cajamarca. http://hdl.handle.net/20.500.14074/5709</p> <p>Ruangsomboon, S., & Chonudomkul, D. (2022). Effect of CO₂ Concentration on Growth, CO₂ Fixation, and Biochemical Composition of the Microalga <i>Nannochloropsis oculata</i>. CHIANG MAI</p> |
|--|--|

| | |
|--|--|
| | <p>JOURNAL OF SCIENCE, 49(2), 325-338.</p> <p>Salgueiro, J.(2018). Cultivo de microalgas en aguas residuales y aprovechamiento energético de la biomasa algal.[Tesis doctoral].Universidad de Vigo.</p> <p>Serejo, M., Ruas, G., Braga, G., Paulo, P., & Boncz, M. (2021). Chlorella vulgaris growth on anaerobically digested sugarcane vinasse: influence of turbidity..Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 93 1, e20190084 . https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190084.</p> <p>Tebbani, S. 2020. Biofijación de CO2 por microalgas: modelado, estimación y control. ISTE.</p> <p>Tenorio, C., Hernández, H., Aguirre, M. y Aguilar, C. (2023). Actualización del Manual para obtención de cepas de microalgas. Inf Inst Mar Perú, 50(1),68-82.</p> <p>Torres, Y. 2021. Fotobiorreactores para el cultivo de microalga Chlorella vulgaris. Renia. Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura. Vol.2 (3) e24 (2021) ISSN: 2307-471X</p> |
|--|--|

| | |
|--|---|
| | <p>Torres-Virviescas, Martha J.; Henao-Castro, Alejandro; Coulson-Reinel, Johana P. and Tejada-Benitez, Lesly. (2023). Efecto de lixiviado sobre el crecimiento de consorcios de microalgas marinas y dulceacuólicas. Rev.MVZ Cordoba [online]. vol.28, n.3, pp.21-31. Epub Oct 31, 2024.ISSN 0122-0268. https://doi.org/10.21897/rmvz.3202</p> <p>UTEX Culture Collection of Algae. UTEX RGB-LED Lighting Platform. UTEX Culture Collection of Algae. 2020. [en línea]. Disponibilidad: https://utex.org.translate.goog/collections/pbr-relatedproducts/products/utex-rgb-led-lightingplatform?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es419&_x_tr_pto=sc. Fecha de consulta: 25 Enero 2024</p> <p>UTEX Culture Collection of Algae. Culture Maintenance. UTEX Culture Collection of Algae. 2020 [en línea]. Disponibilidad: https://utex.org/pages/culture-maintenance.Fecha de consulta: 25 Enero 2024.</p> <p>UTEX Culture Collection of Algae. (2020). UTEX Photobioreactor: Basic Package. UTEX Culture Collection of Algae. [en línea].</p> |
|--|---|

| | |
|---|--|
| <p>Universidad Juárez México Autónoma de Tlaxcala</p> | <p>Disponibilidad: https://utex.org/collections/pbr-related-products/products/utexphotobioreactor-basic-package. Fecha de consulta: 25 Enero 2024.</p> <p>Shang Xiaomei , Yang Yaning , Zan Yongling , Sun Zhenwei , Lu Zhengyi , Sun Jun (2024) Effects of temperature on the growth, total lipid content and fatty acid composition of <i>Skeletonema dohrnii</i>. Journal of Frontiers in Marine Science, Volumen 11. https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2024.1361157.</p> <p>Sanuddin, N., Hairol, M., Nian, C., Robles, R., Illud, H., Muyong, J., Ebbah, J., & Sarri, J. (2023). Impact of Different Nutrient Enrichment Concentrations on the Growth of Microalga <i>Nannochloropsis</i> sp. (Monodopsidaceae) Culture. Acta Natura et Scientia. https://doi.org/10.29329/actanatsci.2023.353.09.</p> <p>Zanella, L., & Vianello, F. (2020). Microalgae of the genus <i>Nannochloropsis</i>: Chemical composition and functional implications for human nutrition. Journal of Functional Foods, 68, 103919.</p> |
|---|--|