

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

FACULTAD DE POSGRADOS

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

Obtención de biochar mediante la optimización de parámetros de pirólisis térmica a partir de espirulina (*Arthrospira platensis*) cosechada en un fotobiorreactor semiabierto.

AUTOR:

Alava Navarrete Damarys Juverlys

Saltos Enríquez Diego Fernando

DIRECTOR:

MsC. Barzallo Granizo Diego Geovanny. PhD

Milagro, 2024

Derechos de Autor

Sr. Dr.

Fabricio Guevara Viejo

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Nosotros, **Alava Navarrete Damaris Juverlys** y **Salto Enriquez Diego Fernando**, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de Magíster en Biotecnología, como aporte a la Línea de Investigación Agrobiotecnología de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 22 de octubre del 2024



Firmado electrónicamente por:
DAMARYS JUVERLYS
ALAVA NAVARRETE

Alava Navarrete Damaris Juverlys

120836044-4



Firmado electrónicamente por:
DIEGO FERNANDO
SALTOS ENRIQUEZ

Salto Enriquez Diego Fernando

050405681-3

Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación

Yo, **MsC. Barzallo Granizo Diego Geovanny** en mi calidad de director del trabajo de titulación, elaborado por **Alava Navarrete Damaris Juverlys** y **Salto Enriquez Diego Fernando**, cuyo tema es Obtención de biochar mediante la optimización de parámetros de pirólisis térmica a partir de espirulina (*Arthrospira platensis*) cosechada en un fotobiorreactor semiabierto que aporta a la Línea de Investigación **Agrobiotecnología**, previo a la obtención del Grado Magister en biotecnología, Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 22 de Octubre del 2024



Escaneado electrónicamente por:
**DIEGO GEOVANNY
BARZALLO GRANIZO**

MsC. Diego Geovanny Barzallo Granizo

C.I.: 0603923095

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

El TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de **MAGISTER EN BIOTECNOLOGÍA**, presentado por **ING. ALAVA NAVARRETE DAMARYS JUVERLYS**, otorga al presente proyecto de investigación denominado "OBTENCIÓN DE BIOCHAR MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PIRÓLISIS TÉRMICA A PARTIR DE ESPIRULINA (ARTHROSPIRA PLATENSIS) COSECHADA EN UN FOTOBIOREACTOR SEMIABIERTO.", las siguientes calificaciones:

TRABAJO ESCRITO	60.00
SUSTENTACIÓN	35.50
PROMEDIO	95.50
EQUIVALENTE	Muy Bueno



CESAR ANIBAL
BARZOLA GAIBOR

Ing. BARZOLA GAIBOR CESAR ANIBAL
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



KATHERINE LISSETTE
ROMERO VASQUEZ

Mgs ROMERO VASQUEZ KATHERINE LISSETTE
VOCAL



ALEX EDWIN GUILLEN
BONILLA

Ing. GUILLEN BONILLA ALEX EDWIN
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

El TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de **MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**, presentado por **ING. SALTOS ENRIQUEZ DIEGO FERNANDO**, otorga al presente proyecto de investigación denominado "OBTENCIÓN DE BIOCHAR MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PIRÓLISIS TÉRMICA A PARTIR DE ESPIRULINA (ARTHROSPIRA PLATENSIS) COSECHADA EN UN FOTOBIORREACTOR SEMIABIERTO.", las siguientes calificaciones:

TRABAJO ESCRITO	60.00
SUSTENTACIÓN	35.33
PROMEDIO	95.33
EQUIVALENTE	Muy Bueno



CESAR ANIBAL
BARZOLA GAIBOR

Ing. BARZOLA GAIBOR CESAR ANIBAL
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



KATHERINE LISSETTE
ROMERO VASQUEZ

Mgs ROMERO VASQUEZ KATHERINE LISSETTE
VOCAL



ALEX EDWIN GUILLEN
BONILLA

Ing. GUILLEN BONILLA ALEX EDWIN
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL

Dedicatoria

A Dios y mis padres, por su incondicional apoyo y amor inquebrantable. Su ejemplo de perseverancia y esfuerzo ha sido mi mayor fuente de inspiración para alcanzar este logro.

Y a todos aquellos que, de una u otra manera, creyeron en mí y me alentaron a continuar cuando el camino se hacía difícil. Este triunfo es también de ustedes.

Damarys Alava Navarrete

A mis queridos padres, cuyo amor y apoyo incondicional han sido importante en cada paso de este camino. Su sacrificio y dedicación me han enseñado el verdadero valor del esfuerzo y la perseverancia. Agradezco cada palabra de aliento, que me han impulsado a alcanzar mis sueños.

También quiero dedicar esta tesis a Dios, cuya guía y fortaleza han sido fundamentales en mi vida. Gracias por estar siempre a mi lado.

Diego Saltos Enriquez

Agradecimientos

Primero, agradezco a Dios por darme la fuerza, sabiduría y fe necesarias para completar este camino. Sin Su guía y bendiciones, este logro no habría sido posible.

A mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi mayor fuente de motivación. Gracias por su paciencia y por creer en mí en todo momento.

A Stalin Apolo, por su paciencia, comprensión y motivación constante en cada paso de este camino.

A mi compañero de tesis por su colaboración y dedicación durante todo este proceso. ¡Gracias a todos por siempre estar a mi lado!

Damarys Alava Navarrete

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, cuyo amor y apoyo incondicional han sido el pilar de mi vida. Su confianza en mí y su dedicación constante han sido una fuente de inspiración en cada paso de este camino. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

También quiero agradecer a Dios, cuya guía y fortaleza me han acompañado en momentos de duda y desafío. Este logro es tanto mío como de ellos, ya que, sin su amor y apoyo nada de esto sería posible.

A mi compañera de tesis por su colaboración en este arduo y largo proceso en el cual nos encaminamos, agradezco a mi tutor de tesis por todos sus conocimientos compartidos en este proceso.

Diego Saltos Enriquez

Resumen

El biochar obtenido a partir de biomasa mediante procesos termoquímicos, como la pirólisis, es un potencial adsorbente para la remoción de contaminantes, promoviendo una gestión integral del agua y un enfoque sostenible en el uso y conservación de los recursos hídricos. Este biomaterial es particularmente relevante en el contexto de la creciente contaminación de cuerpos de agua y la necesidad de soluciones económicas y sostenibles. En este sentido, el objetivo principal de la presente investigación es optimizar los parámetros de operación de un reactor de pirólisis térmica, específicamente la temperatura y el tiempo de reacción, para la producción de biochar a partir de espirulina (*Arthrospira platensis*). La espirulina fue cultivada y cosechada en un fotobiorreactor semiabierto construido con materiales de bajo costo, ofreciendo una fuente abundante y económica de biomasa para este fin. La optimización del proceso de pirólisis se llevó a cabo mediante un diseño central compuesto (CCD) multivariante, con el objetivo de maximizar el rendimiento y las propiedades adsorbentes del biochar. Tanto la espirulina como el biochar resultante fueron caracterizados mediante espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), lo que permitió identificar los grupos funcionales presentes en la superficie del biochar y su potencial para interactuar con distintos tipos de contaminantes en el agua a través de interacciones covalentes y no covalentes. Los resultados muestran que el rendimiento óptimo de biochar (46.51%) se alcanza a una temperatura de 350 °C y un tiempo de reacción de 23 minutos. Este rendimiento se debe a las condiciones específicas de cultivo y tratamiento postcosecha de la espirulina, que permiten obtener biochar de calidad a baja temperatura y en tiempos de reacción reducidos. Finalmente, se recomienda para futuras investigaciones realizar una caracterización más detallada de la espirulina y el biochar, así como la evaluación de la capacidad de absorción de este adsorbente en particular para metales pesados en cuerpos de agua.

Palabras claves: Espirulina, Biochar , Pirólisis térmica, Adsorbente, Remediación ambiental.

Abstract

The biochar obtained from biomass through thermochemical processes, such as pyrolysis, serves as a potential adsorbent for the removal of contaminants, promoting an integrated water management approach and a sustainable methodology for the utilization and conservation of water resources. This biomaterial is particularly relevant in the context of increasing water body pollution and the need for economical and sustainable solutions. In this regard, the primary objective of the present research is to optimize the operational parameters of a thermal pyrolysis reactor, specifically the temperature and reaction time, for the production of biochar from spirulina (*Arthrospira platensis*). Spirulina was cultivated and harvested in a semi-open photobioreactor constructed from low-cost materials, providing an abundant and economical biomass source for this purpose. The optimization of the pyrolysis process was conducted using a multivariate central composite design (CCD) to maximize the yield and adsorptive properties of the biochar. Both spirulina and the resultant biochar were characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), which facilitated the identification of functional groups present on the biochar's surface and its potential to interact with various types of contaminants in water through covalent and non-covalent interactions. The results indicate that the optimal yield of biochar (46.51%) is achieved at a temperature of 350 °C and a reaction time of 23 minutes. This yield is attributed to the specific cultivation conditions and post-harvest treatment of spirulina, enabling the production of high-quality biochar at low temperatures and reduced reaction times. Finally, it is recommended that future research include a more detailed characterization of both spirulina and biochar, as well as an assessment of the adsorption capacity of this particular

Keywords: Spirulina, Biochar, Thermal pyrolysis, Adsorbent, Environmental remediation.

Lista de Figuras

Figura 1. Espirulina bajo microscopio	26
Figura 2. Vista aérea del lago Texcoco	30
Figura 3. Farms	30
Figura 4. Cyanotech	31
Figura 5. Fotobiorreactor tubular	32
Figura 6. Fotobiorreactor de panel plano	33
Figura 7. Fotobiorreactor de columna de burbujeo	34
Figura 8. Fotobiorreactor	43
Figura 9. Obtención de la espirulina	45
Figura 10. Obtención de biochar	46
Figura 11. Proceso de obtención del biochar	49
Figura 12. Relación entre el rendimiento del biochar y el valor previsto	54
Figura 13. Optimización del biochar. Efecto de la temperatura y tiempo de reacción	55
Figura 14. Rendimiento del biochar frente al tiempo de reacción	55
Figura 15. Curva de rendimiento del biochar	56
Figura 16. FTIR espirulina seca	57
Figura 17. FTIR biochar de espirulina	58
Figura 18. FTIR espirulina seca	61
Figura 19. Los grupos funcionales presentes en la superficie de los biocarbones se analizaron mediante espectroscopia infrarroja	62

Lista de Tablas

Tabla 1. Variables independientes de la espirulina	22
Tabla 2. Variables dependientes de la espirulina	22
Tabla 3. Variables independientes de la biochar	23
Tabla 4. Variables dependientes de la biochar	23
Tabla 5. Condiciones de operación de diferentes tipos de pirólisis	37
Tabla 6. Límites permisibles recomendados de varios metales pesados /metaloides en el suelo según algunas organizaciones	40
Tabla 7. Materiales utilizados para la elaboración del medio de cultivo	42
Tabla 8. Equipos y Modelos utilizados para el fotobiorreactor.....	42
Tabla 9. Diseño central compuesto (CCD) en la optimización de condiciones de pirólisis....	50
Tabla 10. Pirólisis para la obtención de biochar	50
Tabla 11. Valores promedios del pH obtenidos en la producción de la espirulina	52
Tabla 12. Temperatura promedios obtenidas en la producción de espirulina	53
Tabla 13. Modelo matemática para la optimización de procesos.....	53
Tabla 14. Rendimiento biochar para las configuraciones experimentales.....	60

Índice / Sumario

Contenido	
Derechos de Autor	II
Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación	III
Certificación de Defensa.....	VI
Dedicatoria	VI
Agradecimientos.....	VII
Resumen.....	VIII
Lista de Figuras	X
Lista de Tablas	XI
Índice / Sumario	XII
Introducción	16
CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación.....	18
1.1. Planteamiento del problema	18
1.2. Delimitación del problema	19
1.3. Formulación del problema.....	19
1.4. Preguntas de investigación.....	19
1.5. Objetivos.....	20
1.5.1 Objetivo general	20
1.5.2 Objetivos específicos.....	20
1.6. Hipótesis	20
1.7. Justificación.....	20
1.8. Declaración de las variables de la espirulina.....	22
1.8.2. Variables dependientes	22

1.9. Declaración de las variables del biochar	23
1.9.1. Variables independientes.....	23
2.1. Antecedentes Referenciales.....	24
2.2. Marco Teórico.....	26
2.2.1. Cianobacterias.....	26
2.2.2. Espirulina.....	26
2.3 Usos de la Espirulina	27
2.3.1 Aplicativos de la espirulina en la medicina.....	27
2.3.1 Aplicativos de la espirulina en ingeniería	27
2.3.2 Aplicativos de la espirulina en biotecnología.....	28
2.3.3 Cultivo de la Espirulina.....	29
2.3.4 Sistemas De Cultivo Abiertos.....	29
2.3.5 Lagos y estanques naturales.....	29
2.3.6 Raceways.....	30
2.3.7 Espirulina en condiciones de laboratorio.....	31
2.3.8 Sistemas de cultivos cerrado	31
2.4 Tipos de fotobiorreactores	32
2.4.1 Fotobiorreactor tubular	32
2.4.2 Fotobiorreactor de panel plano	33
2.4.3 Fotobiorreactor de columna de burbuja.....	33
2.4.4 Biochar	34
2.4.5 Pirólisis.....	34
2.5 Procesos para obtener biochar	35
2.5.1 Tipos de pirólisis.....	35
3.1. Tipo y diseño de investigación	41
3.2. La población y la muestra.....	41
3.3. Los métodos y las técnicas.....	42
3.3.1. Selección de cepa	42

3.3.2.	Materiales y métodos del fotobiorreactor	42
3.3.3.	Diseño e implementación de un fotobiorreactor	43
3.3.4.	VARIABLES QUE SE OPTIMIZARÁ EN EL CRECIMIENTO DE LAS MICROALGAS	43
3.3.5.	Post procesamiento de la espirulina	44
3.3.6.	Medición del pH	44
3.3.7.	Medición de la temperatura	44
3.3.8.	Proceso de escalamiento	44
3.3.9.	Pirólisis.....	45
3.4	Parámetros de operación del reactor pirolítico	46
3.5	Obtención de biochar	48
3.6	Diseño experimental	50
3.7	Análisis estadístico	51
4.1.	Parámetros de producción de espirulina.....	52
4.1.1.	pH.....	52
4.1.2.	Temperatura.....	52
4.2.	Pirólisis térmica	53
4.2.1.	Rendimiento del biochar	53
4.3.	Caracterización de espirulina y biochar.....	56
4.3.1.	FTIR espirulina seca.....	56
4.3.2.	FTIR biochar de espirulina.....	57
5.1.	Discusión.....	59
5.1.1.	pH y Temperatura	59
5.1.2.	Rendimiento del biochar	59
5.1.3.	FTIR espirulina seca.....	60
5.1.4.	FTIR biochar de espirulina.....	61
5.1.5.	Caracterización del biochar	62
5.2.	Conclusiones.....	63
5.3.	Recomendaciones.....	64

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS	74

Introducción

La espirulina (*Arthrospira platensis*) es una cianobacteria filamentosa que habita en cuerpos de agua alcalinos, siendo ampliamente cultivada por su valor nutricional y potencial en aplicaciones medioambientales. Esta microalga presenta un bajo contenido calórico, alta proporción de proteínas, mínimos lípidos, abundancia de carbohidratos y polisacáridos no digeribles para el cuerpo humano (Guillen et al., 2020). Además de su riqueza en macro y micronutrientes, la espirulina es valorada por sus múltiples beneficios para la salud, ya que contribuye al aumento de los niveles de energía, mejora el metabolismo, ofreciendo protección antioxidante debido a su contenido en vitaminas y otros cofactores esenciales.

En los últimos años, la espirulina ha sido objeto de interés, no solo como suplemento nutricional, sino también como una fuente de biomasa, que cultivada en condiciones controladas permite la obtención de productos de mayor valor, como adsorbentes para la remediación ambiental. Los entornos controlados de cultivo facilitan la optimización de la biomasa, potenciando sus características adsorbentes y su aplicación en la eliminación de contaminantes, especialmente metales pesados. Estos contaminantes representan una seria amenaza para la calidad del agua y la salud pública, debido a sus propiedades tóxicas y persistentes. Estos metales, entre ellos el cadmio (Cd), el cobre (Cu), el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el níquel (Ni) y el cromo (Cr), son subproductos de diversas industrias, como la minería, la agricultura y la manufactura. Aun en bajas concentraciones, pueden causar efectos adversos tanto para los ecosistemas acuáticos como para la salud humana (Enriquez & Layana, 2021).

La pirólisis de biomasa se presenta como una técnica efectiva para la producción de biochar: un material sólido rico en carbono, con una estructura porosa que maximiza su capacidad de adsorción. Dependiendo de la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia, existen tipos de pirólisis como la lenta, la rápida y la instantánea; cada una generando distintos balances de productos sólidos, líquidos y gaseosos. Por ejemplo, la pirólisis rápida, con tiempos de residencia de gas de 0.5 a 10 segundos y una velocidad de calentamiento de 10 a 200 °C/s, produce mayor cantidad de bio-oil. En cambio, la pirólisis lenta favorece la producción de biochar sólido (Pandey et al., 2020; Masqsood et al., 2021). Este biochar es un recurso versátil en la remediación ambiental, ya que su estructura microporosa y la abundancia de grupos funcionales facilitan la adsorción de contaminantes y metales pesados, ya sea de forma aislada o en combinación con otros agentes (Zhang et al., 2020).

Asimismo, la espirulina en procesos de biorremediación muestra gran potencial como material adsorbente para el tratamiento de cuerpos de agua contaminados. Las microalgas poseen propiedades ficorremediadoras que les permiten captar y transformar contaminantes, eliminándolos o reduciendo su toxicidad. Este proceso de ficorremediación depende de la especie, del sistema de cultivo y de las condiciones ambientales. También permite que la biomasa resultante pueda ser cosechada y valorizada para otros usos comerciales (Hernández-Pérez & Labbe, 2014). En conjunto, el uso de biochar derivado de espirulina no solo posibilita la remediación de aguas afectadas por metales pesados, sino que también contribuye a una economía circular, al transformar residuos biológicos en adsorbentes de alto valor para la sostenibilidad ambiental.

En el presente trabajo se abordan varios capítulos, que se detallan a continuación:

Capítulo I: Se especifican los problemas de la investigación, en base a datos de estudios anteriores. Así como también, el alcance que se pretende lograr, la hipótesis, la justificación, los objetivos de la investigación y su relevancia.

Capítulo II: Se presenta el marco teórico, que aporta teorías y conceptos relacionados con la investigación, proporcionando las bases conceptuales sobre la obtención de biochar y la adsorción de metales pesados en el agua.

Capítulo III: Se enfatiza la metodología utilizada para realizar la investigación, presentando los métodos, los materiales y el diseño experimental empleado. Así como las variables, las interacciones entre ellas y los procesos estadísticos utilizados para analizar los resultados.

Capítulo IV: Se muestran los datos obtenidos a partir de la investigación en sus distintas etapas, con un análisis e interpretación detallados. Asimismo, se formulan discusiones basadas en la bibliografía y otras investigaciones relacionadas con la producción de biochar.

Capítulo V: Se exponen los datos de manera clara y concisa, enfatizando en las conclusiones originales planteadas en la investigación y presentando recomendaciones para futuras investigaciones o aplicaciones que puedan derivarse de los datos obtenidos.

CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación

1.1. Planteamiento del problema

En Ecuador, la contaminación de los cuerpos de agua por metales pesados constituye un desafío significativo, que impacta tanto la salud humana como el medio ambiente. La utilización de metales pesados en diversas industrias, como la curtición de pieles, la metalurgia y la minería, ha llevado a la acumulación de estos contaminantes en el suelo, el agua y, en algunos casos, los alimentos. Esto puede provocar graves efectos adversos en la salud de personas y animales.

La industria minera, en particular, es una fuente notable de contaminación. Durante la extracción de metales, como el mercurio, este puede liberarse al medio ambiente a través de escorrentías y polvo generado en el proceso. Además, la agricultura contribuye a este problema mediante el uso excesivo de pesticidas, que contaminan tanto el suelo como las aguas subterráneas. La combinación de estos factores ha creado un escenario crítico que requiere atención urgente.

Ante esta problemática, el biochar emerge como una solución potencial. Este material, obtenido a partir de la pirolisis de biomasa vegetal, presenta características únicas que lo convierten en un absorbente eficaz para metales pesados. Cuando se somete la espirulina a este proceso, se genera un biochar con una estructura porosa, que incrementa considerablemente su superficie de contacto y, por ende, su capacidad para adsorber contaminantes del agua.

El biochar, al ser un producto derivado de un recurso renovable como la espirulina, representa una alternativa sostenible frente a los absorbentes convencionales. Su potencial para ser producido a gran escala y a bajo costo, lo convierte en una opción atractiva. Sin embargo, el aprovechamiento del biochar como absorbente enfrenta varios retos, como la necesidad de optimizar las condiciones de producción, escalar el proceso de manera eficiente y realizar estudios a largo plazo que evalúen su estabilidad y durabilidad.

La pirólisis, el proceso fundamental para la producción de biochar, es una descomposición térmica que ocurre en ausencia de oxígeno y consta de tres etapas: dosificación, alimentación de la materia prima, transformación de la masa orgánica y, finalmente, obtención y separación de productos como: coque, bioaceite y gas (Klug, 2012). Este proceso no solo es crucial para la producción de biochar, sino que también deja sentadas las bases para futuras investigaciones sobre su efectividad en la remediación de metales pesados, en cuerpos de agua contaminados.

1.2. Delimitación del problema

La presente investigación se centra en optimizar las condiciones de operación de la pirólisis térmica, para la obtención de biochar a partir de espirulina. Esta etapa es crítica para su posterior uso como adsorbente en remediación ambiental o su uso como biofertilizantes. Además, se caracterizará la espirulina y el biochar mediante FTIR, para establecer una relación entre sus propiedades y su capacidad adsorbente.

1.3. Formulación del problema

La creciente preocupación por la contaminación de los cuerpos de agua con metales pesados, ha generado una urgente necesidad de encontrar métodos efectivos para remediar esta situación. En este contexto, las investigaciones sobre procesos de biorremediación que utilizan microorganismos, específicamente la obtención de biochar, se presentan como una alternativa viable para la absorción de contaminantes en estos cuerpos acuáticos. A pesar de los estudios que evidencian resultados prometedores en la capacidad de absorción de metales pesados, por parte del biochar, persisten importantes desafíos que limitan su aplicación práctica. Estos incluyen la falta de conocimiento sobre los procesos de producción del biochar, así como el tratamiento postcosecha de la espirulina, que son cruciales para optimizar sus propiedades como adsorbente. Por lo tanto, el problema central de esta investigación se formula en torno a dos interrogantes fundamentales: ¿Cuáles son las características adecuadas para la obtención de biochar, mediante el proceso de pirolisis? ¿Qué influencia tienen las condiciones de producción, cosecha y tratamiento postcosecha, en las propiedades finales del biochar? Abordar estas preguntas es esencial para avanzar en la utilización efectiva del biochar, como un método de remediación de metales pesados en cuerpos de agua, así como para contribuir al desarrollo de procesos más sostenibles y eficientes en el tratamiento de estos contaminantes.

1.4. Preguntas de investigación

¿Qué características deben considerarse para la implementación efectiva de un fotobiorreactor, destinado a la producción de espirulina?

¿Cuáles son las condiciones óptimas que necesita la espirulina para su cultivo y producción?

¿Cómo se lleva a cabo el proceso de pirolisis para obtener biochar a partir de la biomasa de espirulina?

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Obtener biochar a partir de pirólisis térmica usando espirulina cosechada (*Arthrospira platensis*), mediante la implementación de un fotobiorreactor semiabierto.

1.5.2 Objetivos específicos

- Establecer las condiciones adecuadas de operación de producción de espirulina a partir de un fotobiorreactor implementado.
- Optimizar las condiciones de pirólisis de microalgas para la obtención de biochar aplicando un análisis multivariante mediante un diseño central compuesto (CCD) para encontrar los valores óptimos para su producción.
- Caracterizar la espirulina (*Arthrospira platensis*) cosechada y el biochar obtenido mediante Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR).

1.6. Hipótesis

Hipótesis alternativa: Es apropiada la implementación de un fotobiorreactor semiabierto para la producción de espirulina y posterior obtención de biochar a partir de pirólisis térmica.

Hipótesis nula: No es apropiada la implementación de un fotobiorreactor semiabierto para la producción de espirulina y posterior obtención de biochar a partir de pirólisis térmica.

1.7. Justificación

El biochar se presenta como una solución innovadora ante la creciente problemática de la contaminación de los cuerpos de agua por metales pesados. Su estructura porosa le confiere una excepcional capacidad de adsorción, lo que le permite capturar iones metálicos de manera eficaz, resultando crucial para mitigar la toxicidad de estos contaminantes en el medio ambiente. La espirulina, una microalga de rápido crecimiento y fácil cultivo, se erige como una fuente abundante y económica para la producción de biochar, optimizando así la producción de biomasa y promoviendo un enfoque sostenible en la biorremediación.

La producción de biochar a partir de espirulina, no solo ofrece una alternativa eficaz a los métodos tradicionales de tratamiento de aguas contaminadas, sino que también se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Por ejemplo, contribuye a ODS 6 (Agua

limpia y saneamiento) al mejorar la calidad del agua y proporcionar soluciones para el tratamiento de aguas contaminadas. Asimismo, aborda el ODS 12 (Producción y consumo responsables) al promover el uso de recursos renovables y minimizar la generación de residuos.

Un aspecto crítico para maximizar la eficacia del biochar en la adsorción de contaminantes, es la optimización de los parámetros de operación de la pirólisis térmica. Variables como la temperatura, el tiempo de residencia y la tasa de calentamiento, no solo determinan las propiedades físicas y químicas del biochar obtenido, sino que también influyen en su capacidad de adsorción. Una pirólisis bien optimizada puede resultar en un biochar con una mayor porosidad y superficie específica, potenciando así su rendimiento en la remediación de aguas contaminadas.

Además, este enfoque fomenta la economía circular del agua, una estrategia clave para la gestión integral de recursos hídricos. Al integrar el uso de biochar en los sistemas de tratamiento de aguas, se optimizan los recursos disponibles, permitiendo la reutilización del agua tratada y reduciendo la presión sobre fuentes hídricas naturales. Esto no solo mejora la sostenibilidad del proceso, sino que también promueve un ciclo más eficiente en la gestión del agua.

En resumen, la investigación sobre la producción de biochar a partir de espirulina, no solo tiene el potencial de mejorar la calidad del agua y ofrecer soluciones a la contaminación por metales pesados, sino que también contribuye a la economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible. La optimización de los parámetros de operación de la pirólisis térmica, es esencial para maximizar las propiedades del biochar, impulsando prácticas responsables en la gestión de recursos naturales y abordando de manera directa la grave problemática de la contaminación ambiental.

1.8. Declaración de las variables de la espirulina

1.8.1. Variables independientes

Tabla 1. Variables independientes de la espirulina

Variable	Definición	Indicador	Escala
Temperatura	Es una magnitud referida a la noción de calor de un termómetro	Grados Celsius	Ordinal
Luz	Onda electromagnética que en movimiento	Lumen	Ordinal
pH	Expresa el grado de acidez o alcalinidad de un medio acuoso	Escala de 0 a 14	Ordinal
Aireación	Acción o efecto de airear o airearse	Caudal de aire	Ordinal

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

1.8.2. Variables dependientes

Tabla 2. Variables dependientes de la espirulina

Variable	Definición	Indicador	Escala
Espirulina	Cianobacteria filamentosa que crece y se multiplica en cuerpos de agua naturales	- Masa fresca (g)	Ordinal

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

1.9. Declaración de las variables del biochar

1.9.1. Variables independientes

Tabla 3. Variables independientes de la biochar

Variable	Definición	Indicador	Escala
Temperatura	Es una magnitud referida a la noción de calor de un termómetro	- Grados Celsius	Ordinal
Tiempo de reacción	Unidad de medida con la que miden los sucesos ocurridos	- Minutos	Ordinal

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

1.9.2. Variables dependientes

Tabla 4. Variables dependientes de la biochar

Variable	Definición	Indicador	Escala
Rendimiento	Cantidad de producto obtenido de una reacción química	Porcentaje (%)	Ordinal

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial

2.1. Antecedentes Referenciales

Las investigaciones realizadas con microalgas han proporcionado una amplia gama de productos biotecnológicos, que están abriendo las puertas a un futuro más sostenibles. Por ejemplo, la producción de biocombustibles a partir de las mismas para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir la huella de carbono. Otra de las funciones de las microalgas es la adsorción de metales pesados. En esta investigación, se enfatizará el uso del biochar obtenido de la espirulina mediante un proceso de pirolisis, como agente adsorbente de cromo en el agua.

Una fuente de investigación previa, reporta la implementación de un proceso sostenible para la obtención de un biocombustible a base de espirulina y raquis de plátano, con la implementación de un fotobiorreactor semiabierto. Se optimizaron variables que se aplicaron en el cultivo, manteniendo la temperatura de 35 °C, un caudal de aire de 3.2 L/min con intervalos de 30 minutos, con unas luces led de 1500 y 3800 lúmenes con un fotoperiodo de 12 a 13 horas. Los resultados obtenidos expresaron que las condiciones fueron favorables en el crecimiento eficiente de la espirulina, aumentando el rendimiento en la producción de la biomasa. Por otro lado, la integración del raquis de plátano en el proceso de copirólisis demostró una alta eficiencia, mejorando la calidad y rendimiento del biocombustible obtenido (Duarte Cuesta & Játiva Carofalo, 2023).

La investigación realizada por (Guevara Salinas & Odar Ruiz , 2023) en la producción del biochar de residuos lignocelulósicos, específicamente cáscara de yuca y paja de trigo, evaluaron su efecto en suelos degradados y en el cultivo de *Lactuca sativa*. Realizaron pruebas en diferentes temperaturas de pirolisis (800°C, 850°C, 900°C, 950°C y 1000°C) para determinar cómo estas afectan las propiedades del biochar. Los resultados obtenidos mostraron que las temperaturas que mejor conservaron las cualidades fisicoquímicas del biochar fueron de 800°C y 900°C, con un contenido óptimo de carbono y nitrógeno. En términos del cultivo, se observó que el biochar obtenido a una temperatura de 800°C, con una dosis de 40 g/kg de suelo, tuvo una mejora significativa en el crecimiento de *Lactuca sativa*. En cambio, con una temperatura de 900 °C, con una dosis de 60 g/kg, se obtuvieron buenos resultados, aunque no presentaron un gran impacto en el cultivo.

En una investigación realizada por (Muñoz Ríos, *et al*, 2024) evaluaron la producción de biochar a partir de biomasa residual, específicamente cáscara de palma, cisco de café y contenido ruminal bovino, utilizando el proceso de pirólisis. Este enfoque busca abordar el problema ambiental que representa la gran cantidad de residuos generados por la actividad agroindustrial, transformándolos en productos de valor agregado. La investigación se llevó a cabo en Bucaramanga, Colombia, donde se recolectaron las materias primas y se sometieron a un proceso de secado antes de la pirólisis, que se realizó a 750°C durante 2 horas. El biochar resultante, denominado FT-750, fue caracterizado en términos de su composición elemental, contenido de cenizas y área superficial. Los análisis revelaron que el FT-750 tenía un contenido de carbono del 73,6% y un contenido de cenizas del 16,1%, con un área superficial de 0,88 m²/g. Para evaluar su capacidad de adsorción, se realizaron pruebas de remoción de azul de metileno en soluciones acuosas a diferentes pH (2-10). Los resultados mostraron que el biochar logró una remoción máxima del 37% (53,9 mg/g) a pH 10, lo que indica su efectividad como adsorbente. Además, los datos experimentales se ajustaron al modelo cinético de pseudo-primer orden y a la isoterma de Freundlich, lo que sugiere que el proceso de adsorción es favorable y eficiente. En conclusión, el estudio demuestra el potencial del biochar producido a partir de biomasa residual como una solución viable para la remoción de contaminantes en el agua, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al aprovechamiento de recursos agroindustriales.

En el trabajo investigativo realizado por (Myung, *et al*, 2024) investigaron el potencial del biocarbón derivado de la espirulina para la remediación de suelos contaminados con metales pesados. Al someter la espirulina a altas temperaturas en un ambiente de nitrógeno, se obtuvo un biocarbón rico en nitrógeno, gracias a las proteínas presentes en el alga. Los análisis de FTIR revelaron la presencia de grupos funcionales como piridina-N y pirrol-N en el biocarbón, los cuales son cruciales para la adsorción de metales pesados. Los experimentos de adsorción mostraron que el biocarbón derivado de espirulina fue altamente eficiente en la remoción de plomo (Pb) y zinc (Zn) de soluciones acuosas, atribuido a las interacciones electrostáticas, el intercambio de cationes y la formación de complejos entre los metales y los grupos funcionales del biocarbón. Además, se evaluó la eficacia del biocarbón como enmienda para remediar suelos agrícolas contaminados. Los resultados indicaron que el biocarbón derivado de espirulina inmovilizó de manera efectiva el Pb y el Zn en el suelo, reduciendo su movilidad y biodisponibilidad.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Cianobacterias

Las cianobacterias son organismos que no posean membrana celular ni mitocondrias, son diferentes de otros organismos procariotas por sus ácidos grasos no saturados de dos o más enlaces. Las cianobacterias tienen las características de ser organismos fotosintetizadores y heterótrofos que comparten con otras bacterias que hacen uso de N^2 atmosférico como fuente nitrogenada y convertirla a amonio ($NH_3 + H$) y con esto las células puedan aprovechar toda esta fuente. Las cianobacterias se encuentran en su mayoría en ecosistemas lenticos (lagos y lagunas) también se encuentran en otros lugares con presencia alta de humedad como suelos con una alta humedad, troncos en procesos de descomposición, corteza de árboles, aguas salobres y en algunos casos en aguas termales en casos de ser organismos extremófilos. (Sandoval Simbaña, 2017)

2.2.2. Espirulina

La espirulina es una cianobacteria filamentosa que crece y se multiplica en cuerpos de agua naturales que posean cierta alcalinidad, ha sido descrita dentro del género de las *Arthrospira*. Las más usadas industrialmente son *Arthrospira platensis* y *Arthrospira máxima*. La espirulina es considerada una microalga que realiza un proceso de fotosíntesis. El nombre de espirulina proviene de una palabra que se deriva del latín que significa "espiral o hélix" que se refiere a su morfología helicoidal. La espirulina presenta una coloración azul verdosa dado a la presencia de clorofila de la cual obtiene su color verde y a la presencia de ficocianina de la cual obtiene su color azulado. (Camacho Ayala, 2017)



Figura 1. Espirulina bajo microscopio
Fuente: (Camacho Ayala, 2017)

2.3 Usos de la Espirulina

La espirulina tiene una amplia variedad de usos en diversos campos como medicina, ingeniería y biotecnología los cuales se los explica a detalle a continuación:

2.3.1 Aplicativos de la espirulina en la medicina

El uso de la espirulina en el campo medico tiene un sin fin de aplicaciones ya que se han hecho un sin número de investigaciones de la espirulina sobre diversas enfermedades humanas.

La depresión es un trastorno que afecta la bioquímica del cerebro y las emociones que se presentan en un estado de abatimiento e infelicidad. La ingesta de espirulina contribuye a resolver el desorden emocional que provoca la depresión. La espirulina posee una componente llamado triptófano, el cual es un aminoácido esencial el cual el cuerpo convierte en serotonina, el cual es un neurotransmisor reconocido por poseer efectos relajantes, la serotonina reduce la posibilidad de padecer insomnio y estrés. Otro de los aplicativos de la espirulina es el los problemas estomacales y en la flora intestinal ya que es un alimento alcalino, gracias a h esto tiene un efecto antiácido en el cuerpo y previene un sin número de enfermedades que surgen a partir de la acidez. (Shamosh Halabe , 2009)

2.3.1 Aplicativos de la espirulina en ingeniería

Las espirulinas son cianobacterias que se consideran buenas candidatas para la biofijación de CO_2 , debido a su rápida tasa de crecimiento celular. Además, la *Spirulina platensis* puede crecer en condiciones alcalinas y puede absorber CO_2 de manera más eficiente en un sistema de cultivo. La eficiencia de eliminación de CO_2 de las microalgas y las cianobacterias es 10 veces mayor que la de las plantas terrestres, debido a su tasa de crecimiento celular más rápida. Además, la biomasa de algas también se puede utilizar como materia prima para producir una variedad de productos posteriores, incluidos biocombustibles, carbohidratos, alimentos para humanos, alimentos para animales, cosméticos y medicamentos. Por lo tanto, existen varios beneficios asociados con la mitigación de CO_2 basada en microalgas. Además, es ambientalmente sostenible mitigar el CO_2 con microalgas cuando se combina con otros procesos de protección ambiental, como la eliminación de metales pesados o el tratamiento de

aguas residuales. Como resultado, la fijación de CO₂ basada en microalgas ha despertado mucha atención en todo el mundo. (Chun-Yen, *et al*, 2013)

Estudios recientes han demostrado que los bioplásticos podrían no ser tan respetuosos con el medio ambiente como se esperaba. Algunos bioplásticos, incluidos ciertos tipos de plásticos biodegradables, pueden no biodegradarse fácilmente en entornos naturales como los ecosistemas marinos o terrestres. Además, el cultivo de materias primas para bioplásticos, como cultivos de monocultivo u organismos modificados genéticamente, puede provocar impactos ambientales negativos, debido al agotamiento de los nutrientes del suelo y, en última instancia, la degradación del medio ambiente a largo plazo, se realizó un ACV para evaluar los impactos ambientales del bioplástico de espirulina. La principal ventaja de realizar el ACV es que proporcionó información valiosa sobre el comportamiento ambiental del bioplástico de espirulina en comparación con otros plásticos basados en algas o incluso convencionales. Los criterios ambientales incluyen el uso de recursos, el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de desechos, entre otros. (Chalermthai, *et al*, 2024)

2.3.2 Aplicativos de la espirulina en biotecnología

Se ha demostrado que el uso de extractos de espirulina puede impedir la motilidad bacteriana, la invasión, la formación de biopelículas y la detección de quórum. Además, se ha informado que afecta directamente a las bacterias al disminuir la fuerza de sus paredes celulares y aumentar su permeabilidad, lo que conduce a la fuga de contenido citoplasmático. La espirulina ha suscitado un gran interés como agente inmunomodulador. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue centrarse en el posible papel de la *S. platensis* como agente prebiótico para mediar la respuesta antibacteriana de los probióticos, por ejemplo, *L. casei*. Los datos presentados en el presente estudio indican que la adición de *S. platensis* a una concentración de 5 mg/mL aumentó significativamente el número de organismos probióticos vivos, lo que resultó en una mejora posterior de la actividad antibacteriana de *L. casei*. El estudio destacó el impacto de *L. casei*, cultivada con una concentración óptima de *S. platensis*, en la supresión del crecimiento bacteriano y la formación de biopelículas. (Elwakil, *et al*, 2024)

La cianobacteria *Spirulina platensis* tiene una alta capacidad para absorber hierro y convertirlo de formas inorgánicas a orgánicas. Por lo tanto, el cultivo de espirulina en presencia de algunos compuestos coordinativos utilizados como reguladores del contenido de hierro en la biomasa aumenta el enriquecimiento de hierro de la biomasa de espirulina. Esta biomasa cargada de

hierro se sugiere como una fuente de suplementos alimenticios, para aumentar la inmunidad, así como un posible remedio para la profilaxis y un tratamiento para la anemia y otras enfermedades relacionadas con la inmunodeficiencia del cuerpo humano. (Melnic, *et al*, 2011)

2.3.3 Cultivo de la Espirulina

El cultivo de espirulina de carácter intensivo se puede realizar en un sistema abierto a su vez en un sistema cerrado, los cuales comúnmente son denominado fotobiorreactores. Cada sistema de cultivo tiene una de series de ventajas y desventajas, por ejemplo, el sistema abierto presenta una mayor exposición a variables ambientales, pero estos sistemas son más baratos y de un menor mantenimiento, este sistema posee un cierto grado de dificultad en su control, la producción de biomasa tiende a ser menor y además presenta una mayor posibilidad de subir algún tipo de contaminación, en cambio el sistema de cultivo cerrado o fotobiorreactores el cultivo presenta un nulo contacto con la atmosfera, este sistema tienden a ser más seguros que los sistemas abiertos, y tiene un mejor control de operación, el único inconveniente de este sistema sería su costo de implementación. (Cruz Woo, 2022)

2.3.4 Sistemas De Cultivo Abiertos

Los sistemas de cultivos cerrados presentan ventajas en que no se requiere de una gran inversión, mantenimiento y es de fácil escalado, pero su control es más complicado por lo cual este sistema tiende a presentar una baja productividad y eficiencia de la biomasa, además que su susceptibilidad a sufrir contaminación por parte de otras algas o bacterias es alta, aunque su costo sea menor. Por lo general los cultivos de espirulina abiertos buscan que las cepas de microalgas puedan desarrollarse en condiciones que para otros organismos sea complicado su desarrollo como un pH alto o bajo, temperaturas específicas y un requerimiento nutricional muy específico (Sánchez, *et al*, 2020). De la amplia variedad de sistemas de cultivos abiertos se detallan los siguientes:

2.3.5 Lagos y estanques naturales

Las microalgas cuando se hayan en condiciones ambientales favorables y con un gran abastecimiento de nutrientes, estas pueden crecer de forma abundante de forma natural. Este suceso ocurre invariablemente con especies extremófilas, que crecen en condiciones que limitan el crecimiento de microorganismos contaminantes, como pH ácido o alcalino, temperatura extrema y alta concentración de sal. Un claro ejemplo de esto son los cultivos de

espirulina, este microorganismo crece de forma natural en lagos alcalinos de zonas tropicales y subtropicales, cuyo pH óptimo para el crecimiento está en un rango de 8 a 10. Según registros históricos los primeros producir y consumir la biomasa de la espirulina es de los aztecas los cuales cosechaban *Arthrospira maxima* conocida como Tecuitlatl por los prehispánicos en el lago de Texcoco el cual se encuentra en el Estado de México (Manzoni Moroneze, *et al*, 2021).



Figura 2. Vista aérea del lago Texcoco
Fuente: (Manzoni Moroneze y otros, 2021)

2.3.6 Raceways

Los tanques de cultivo raceway son utilizados en su mayoría en las plantas comerciales de producción de biomasa de espirulina. En el mundo hay dos productores de espirulina que utilizan estos tanques, los cuales se encuentran en Estado Unidos, la empresa Cyanotech con base en Hawái y Earthrise Farms con sede en California poseen tanques de 75.000 y 140.000 m^2 respectivamente.



Figura 3. Farms
Fuente: (Barra Galárraga, 2010)

Estos tanques tienen la característica de que para su óptimo funcionamiento el nivel de agua no debe superar los 15 cm por que pueden causar una disminución en el flujo y turbulencia del agua la cual es proporcionada por una rueda con aspas en medio del tanque, otra desventaja

sería la evaporación que se da en climas cálidos y un control deficiente en la temperatura. (Barra Galárraga, 2010)



Figura 4. Cyanotech
Fuente: (Pérez Romero & Arrendondo Vega, 2023)

2.3.7 Espirulina en condiciones de laboratorio

La espirulina también se puede producir a menor escala en condiciones de laboratorio, el procedimiento es mediante escalamiento desde matraces, botellones, columnas de diferentes volúmenes y desde piletas pequeñas las cuales pueden estar equipadas de forma similar a los raceways o no. Estos cultivos son solo utilizados de a nivel de escala piloto o en otros casos para son usados para investigación científica. Estos cultivos que son relajados a nivel de laboratorio tengan sistemas para monitorear y controlar ciertos parámetros como la luz, el pH, temperatura y el medio de cultivo en el cual se desarrollan, y son estos parámetros los que tienen un mayor efecto en el crecimiento de las cianobacterias. (Pérez Romero & Arrendondo Vega, 2023)

2.3.8 Sistemas de cultivos cerrado

Los sistemas de cultivos cerrados o también denominados fotobiorreactores (FBR) proporcionan un sin número de ventajas, como el control de variables del cultivo el cual en los sistemas abiertos tienen su cierta complejidad. Los fotobiorreactores poseen una cualidad única la cual es que están completamente aislados del exterior. Lo cual presenta una ventaja ya que el cultivo al estar completamente aislado del exterior evita que este sea infectado por otra especie externa y al estar sellado aumenta la rentabilidad de este tipo de cultivo. Este tipo de sistemas presenta una serie de ventajas y desventajas que se debe considerar al menos

implementar un sistema de cultivo: Una de las ventajas de los sistemas cerrados es que se posee un mayor control en las condiciones del cultivo y esto conlleva un mejor rendimiento del cultivo, también otra ventaja presente en este sistema es la baja posibilidad de contaminación del cultivo por un microorganismo ajeno al cultivo dando como resultado un cultivo puro consistente. Así como ventajas tiene sus desventajas como el alto costo de inversión para implementar el cultivo y el mantenimiento del mismo, aunque se puede optar por un fotobiorreactor casero, otra desventaja sería la falta de exposición de luz solar al que encontrarse aislados de la luz solar depende de una fuente lumínica para que se lleve a cabo el proceso de fotoperiodo. (Sisalema & Zambrano, 2023)

2.4 Tipos de fotobiorreactores

Los diferentes tipos de sistemas de cultivo cerrado para microalgas son:

2.4.1 Fotobiorreactor tubular

Los fotobiorreactores tubulares consisten en tubos recto transparentes usualmente son fabricados de plástico o vidrio la luz solar se capta en la matriz o en un colector solar a. <0,1 m. las microalgas van en dirección hacia el colector solar y después regresan de nuevo hasta el depósito. Para obtener una óptima captura de luz solar, el colector debe estar orientado en sentido norte y sur. Por lo general los tubos deben estar colocados en paralelo entre sí y planos sobre el suelo. Los tubos en lugar de colocarse de manera horizontal en el suelo, los tubos podrían estar elaborados de plástico flexible y pueden enrollarse alrededor de un marco de soporte para formar una bobina helicoidal tubular de fotobiorreactor. (Yuhua & Fan, 2014)



Figura 5. Fotobiorreactor tubular

Fuente: (Yuhua & Fan, 2014)

2.4.2 Fotobiorreactor de panel plano

Un fotobiorreactor de panel plano posee una serie de paneles o placas que se conectan entre sí de que se encuentran dispuestas de manera vertical u horizontal y estas a su vez se encuentran colocadas en cajas rectangulares. Este tipo de biofotorreactor se dividen en dos partes para llevar a cabo la agitación con recirculación del cultivo dentro del fotobiorreactor. Estas conexiones son utilizadas para realizar el proceso de llenado y vaciado, la introducción del gas (CO_2) y el transporte de sustancias nutritivas. La introducción de los gases de combustión se produce por la parte inferior de la caja o panel, así se asegura que el dióxido de carbono tenga el tiempo suficiente interactuar el tiempo suficiente con las microalgas en el seno del líquido del biorreactor. (Santiesteban Torres, 2021)



Figura 6. Fotobiorreactor de panel plano
Fuente: (Santiesteban Torres, 2021)

2.4.3 Fotobiorreactor de columna de burbuja

Este tipo de fotobiorreactor se llama reactor de columna de burbuja porque este fotobiorreactor tiene la característica particular que el aire se bombea desde el fondo de cada tubo y se forman las burbujas. Este fotobiorreactor tiene la ventaja que el costo de implementación es bajo, y también una alta relación de área superficial a volumen, falta de partes móviles, transferencia de calor y masa satisfactoria, liberación eficiente de O_2 y mezcla de gases residuales. La mezcla y la transferencia de masa de CO_2 se realiza con el burbujeo de la mezcla de los gases desde el burbujeador. Cuando se tiene que aumentar la escala, se utilizan placas perforadas en la columna de burbujas para romperlas y redistribuir las partículas coalescidas. La luz se proporciona externamente y la eficiencia fotosintética depende en gran medida del caudal de gas, que depende del ciclo de luz y oscuridad, ya que el líquido circula regularmente desde la zona oscura central a la zona fótica externa a un caudal de gas mayor. (Yuhua & Fan, 2014)



Figura 7. Fotobiorreactor de columna de burbujeo
Fuente: (Yuhua & Fan, 2014)

2.4.4 Biochar

El Biochar es el producto de la descomposición térmica de biomasa que se obtiene a través de la pirólisis de los mismos con escaso suministro de oxígeno y a temperaturas relativamente altas (inferiores a los 700 °C). En general, a mayor temperatura, el grado de carboxilación es mayor, por lo que el área superficial es mayor. A mayores temperaturas, el biocarbón tendrá mayor área superficial específica, pero se reduce el contenido de materia orgánica amorfa, afectando la capacidad de retener contaminantes orgánicos (Soto Muñoz, *et al*, 2023). El proceso de pirólisis permite, en principio, que no haya limitaciones importantes en cuanto a la tipología de residuo (incluye, por ejemplo, residuos plásticos), por lo que consigue una reducción importante del volumen de residuos con la transformación en tres componentes: líquido (bioaceite), sólido (Biochar) y gaseoso (syngas o gas de síntesis), con posibilidad de retroalimentación energética y evitando o minimizando las emisiones de CO_2 . (García Montero, *et al*, 2021)

2.4.5 Pirólisis

La pirólisis es un proceso de características endotérmicas que induce temperaturas altas para la descomposición de materiales de alimentación sin la presencia de gases reactivos como el aire u oxígeno o con un suministro regulado del mismo. La eficiencia de este proceso pirolítico depende de la adición de productos pirolíticos como combustibles, sin la adición de estos

productos se puede alcanzar un 70% de eficiencia en el proceso, pero se puede aumentar su eficiencia en un 90%. (Mejía Madrigal & Upegui Sosa, 2021)

2.5 Procesos para obtener biochar

Las tecnologías termoquímicas para transformar las biomásas en fuentes de energía de tipo renovable, tiene una debida clasificación y son las siguientes: pirólisis lenta, pirólisis rápida, pirólisis ultrarrápida y la última conocida como gasificación. (Muñoz Vélez, 2021)

2.5.1 Tipos de pirólisis

Existen diferentes tipos de pirólisis, cada una se adapta a diferentes condiciones en el proceso, lo cual genera una diversidad de productos obtenidos. Los tipos de pirolisis las detallamos a continuación.

2.5.2 Pirólisis lenta

La pirólisis lenta es un de características robustas y energéticamente eficiente. Con la pirólisis lenta se ha descubierto que la eficiencia del biochar es mejor comparada con los productos de origen gaseosos y líquido. En la pirólisis lenta en rango de temperatura va desde los 300 °C a 700 °C, en cuanto al tipo de residencia es largo (de minutos a horas), la velocidad de calentamiento es baja 0,1-10 °C min⁻¹, lo cual favorece a la eliminación de vapores en el proceso de calentamiento. La temperatura y la velocidad de calentamiento juega un papel sumamente importante en la calidad de biochar obtenido. Durante la pirólisis lenta, la baja velocidad de calentamiento reduce la pirólisis secundaria y el proceso de craqueo térmico en biomásas lignocelulósicas y de lignina, lo que da como resultado el biochar como producto principal. Cuando se tiene una velocidad de calentamiento inferior a 10 °C min⁻¹, los enlaces químicos se rompen y las estructuras de la biomasa se ve afectada lo que ocasiona que la estructura de la matriz se reordene en una más estable que tiende a inhibir que se formen materiales volátiles. La materia volátil del biochar se ve disminuida en un 25,2 % al 11,6 % a una velocidad de calentamiento de 10 °C min⁻¹. (Tan, *et al*, 2021)

2.5.3 Pirólisis rápida

La pirólisis rápida es un proceso de conversión de termoquímica innovador para la producción de biocombustibles y productos químicos muy valiosos derivados de biomasa. Esta pirolisis implica el calentamiento rápido de la biomasa sin la presencia de oxígeno para así obtener biocombustible, carbón vegetal y productos gaseosos. (Saha, *et al*, 2024)

2.5.4 Pirólisis ultrarrápido

La pirolisis ultrarrápida se le conoce también como pirólisis "flash" por la velocidad de adquiere en su calentamiento, con lo cual se obtiene como producto un bioaceite en un 75%. Este procedimiento es llevado a cabo mediante una desvolatilización en una atmósfera inerte con la utilización de una velocidad de calentamiento mucho más alta con temperaturas que rondan alrededor de 450 y 1000 °C. (Gosgot Angeles, *et al*, 2021)

2.5.5 Torrefacción

La torrefacción es un tipo de pirólisis lenta que tiende a mejorar la propiedad de la biomasa lignocelulósica para transformarla en combustible de una mejor calidad. Este proceso consiste en un calentamiento lento de la biomasa en una atmósfera inerte ósea en ausencia del oxígeno aun temperatura que tiende a variar de 200 a 300 °C, durante un tiempo de residencia que va desde unos cuantos minutos hasta una hora. Las variaciones que se presentan después de la torrefacción son la reducción del contenido de humedad, aumento de la densidad energética, aumento de la relación Carbono-Oxígeno, mejora de la hidrofobicidad, inflamabilidad, reactividad y molienda, además que facilita el almacenamiento y el transporte. (Bustamante García, *et al*, 2016)

2.5.6 Gasificación

La gasificación es un importante proceso termoquímico que lleva a cabo varios pasos para la conversión de biomasa a altas temperaturas y en entornos con carencia de oxígeno. La descomposición térmica, combinada a su vez con la oxidación parcial, hace más facilita producción de un gas que se encuentra enriquecido en H_2 y CO. Y este gas tiene un alto potencial para ser usado en la generación de electricidad, puede ser usado para la extracción de sustancias bioquímicas, producir hidrógeno y también es usada para sintetizar combustibles líquidos. Un paso muy importante a seguir para la gasificación es el desvolatilización del gas. El proceso de gasificación con vapor en un reactor de lecho fluidizado es particularmente interesante para la gasificación de biomasa y residuos. Entre sus características más destacables se incluyen altas capacidades de mezcla y tasas superiores de transferencia de calor y masa, lo que garantiza temperaturas uniformes en todo el gasificador. Sin embargo, la gasificación directa de biomasa húmeda podría resultar ineficiente. Además, el contenido de alquitrán afecta significativamente el uso de gas de síntesis en los procesos posteriores. (Papa, *et al*, 2024)

Tabla 5. Condiciones de operación de diferentes tipos de pirólisis

Tipo	Condición	Líquidos (bio-aceites)	Sólidos (biochar)	Gas (syngas)	Velocidad de calentamiento
Torrefacción	(<300°), tiempo de exposición (>2h)	20%	75%	5%	<1 °C/s
Pirólisis Lenta	(300-500 °C), tiempo de residencia (horas o días) (425-600 °C)	30% (70% agua)	35%	35%	1-1,8 °C/s
Pirólisis rápida	Tiempo de resistencia del vapor (<2s)	75% (25% agua)	12%	13%	10-1000 °C/s
Pirólisis flash	(75-1000 °C) (0,5 s)	-			>1 °C

Fuente: (Gosgot Angeles, *et al*, 2021)

2.5.7 Optimización multivariante

La optimización multivariante fue presentada por Harrington en el año 1965 y en 1980 fue sometida a una modificación por parte de Derringer y Suich. Este método consiste en una función de deseabilidad para cada una de las variables de respuesta y a partir de estas se define la deseabilidad global es decir que las respuestas den su mejor valor, y con este el problema de la optimización multivariante se transforma en un problema de optimización univariante ya que se requiere maximizar la deseabilidad global para encontrar un punto óptimo. Una vez que los modelos están ajustados para cada una de las respuestas se define la función de deseabilidad. (Bacio Barrera, 2007)

2.5.8 Diseño central compuesto

Es una técnica estadística utilizada en experimentación para estudiar como múltiples factores influyen en un resultado, facilita los cálculos, estandariza las variables eliminando las unidades de medida de las variables originales e incrementa la precisión al estimar los coeficientes de dicho modelo. Los niveles codificados de los factores de un diseño factorial 2^k se presentan mediante la siguiente formula: $x_i = 2(A_i - A^-) / R_i$, en el cual A_i es el i -ésimo nivel del factor A , A^- es el nivel promedio de los factores A y R_i es el rango que se encuentra entre el valor

más alto y más bajo del factor A. El diseño central compuesto son diseños de tratamientos factoriales 2^k con 2^k con combinaciones adicionales que son llamados puntos axiales y puntos centrales. Las coordenadas de los puntos axiales del eje del factor codificados son $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0, \dots, 0)$, \dots , $(0, 0, 0, \dots, \pm\alpha)$ y de los puntos centrales son de la forma $(0, 0, 0, \dots, 0)$. Dependiendo de la elección de α que se haga en los puntos axiales, el diseño central compuesto adopta diferentes propiedades tales como ortogonalidad, rotabilidad y uniformidad. Es considerada solamente una propiedad deseable en estos diseños consistente en que la varianza de los valores estimados sea constante en puntos equidistantes del centro del diseño. La rotabilidad se logra cuando se establece $\alpha = (2^k)^{1/4}$. Así, el valor de α para un diseño con dos factores es $\alpha = 1,414$ y cuando se presentan tres factores es $\alpha = 1,682$. La fórmula para α se cambia si se realizan réplicas del diseño o si a su vez se utiliza un diseño factorial fraccionario. (Jiménez Careaga, 2015)

2.5.9 Diseño de Box Behnken

El diseño de Box-Behnken es un tipo de diseño de superficie de respuesta que no posee un diseño factorial o factorial incrustados. Este tipo de diseños permiten una estimación eficiente de los coeficientes de primer y segundo orden. Como los diseños de Box-Behnken poseen menos puntos de diseño, y pueden ser menos costoso de realizar en comparación con el diseño central compuesto con el mismo número de factores. Pero al no poseer un diseño factorial incrustados, no son adecuados para experimentos secuenciales. Los diseños de Box-Behnken pueden ser utilizados siempre y cuando se conozca la zona de operación segura de su proceso, una de las características de los diseños centrales compuestos es que poseen puntos axiales fuera del "cubo", setos puntos pueden hallarse fuera de la zona de nuestro interés o pueden ser imposibles de ejecutarlos porque están más allá de los límites de operación segura. En cambio, los diseños de Box-Hehnken no posee puntos axiales porque todos los puntos se encuentran dentro de la zona de operación segura. Este diseño también nos asegura que no se establezcan todos los factores en sus niveles altos al mismo tiempo. (Minitab, 2024)

2.5.10 Aplicaciones del biochar

Hoy en día el biochar posee una gran cantidad de usos posibles gracias a que posee una estructura porosa y además de poseer unas características químicas que lo conviértete en un material interesante con el que se trabaja en intentar resolver problemáticas ambientales como es el tratamiento de aguas residuales o con presencia de contaminantes, al usar el biochar como filtro y retener metales pesados y contaminantes químicos. De igual forma puede ser utilizados

en chimeneas industriales para reducir la emisión de gases contaminantes. El biochar puede ser utilizados en el sector ganadero en las camas y en el tratamiento de estiércol para reducir los olores y facilitar su tratamiento. En las últimas décadas se ha estudiado la aplicación del biochar en el suelo y sus aplicativos en los cultivos. El origen del biochar como enmienda orgánica data de épocas precolombinas más precisamente en la Amazonía Brasileña en suelos que los aborígenes denominan Terra Petra que se le atribuye a la carbonización de material vegetal. En la agricultura el potencial que presenta el biochar se mide por el aumento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, que se da por una mejora en la capacidad de intercambio catiónico de la estructura del suelo y a la porosidad lo que favorece en gran medida a la fauna microbiana y por ende se da un aumento en la actividad biología del suelo. (García Montero, *et al*, 2021)

2.5.11 Adsorbente para remediación ambiental

La biorremediación es considerada una tecnología ecológica y de bajo costo que se basa en la degradación de contaminantes mediante procesos de carácter microbiológico tales como bioacumulación, biomineralización, biosorción, biolixiviación o biotransformación. Otra definición es como el proceso en el cual los desechos de origen orgánico se degradan biológicamente en condiciones controladas a un estado inocuo o a niveles por debajo de los límites de concentración respectivos. La biorremediación puede ser de dos tipos biorremediación *in situ* o *ex situ*, donde la *in situ* el material contaminado pertenece en su ubicación original y se denomina *ex situ* cuando el material contaminado se retira del lugar original para su posterior tratamiento. La biorremediación con relación a otras tecnologías suele tener un menor costo, provoca una menor intrusión en el sitio contaminado y en consecuencia un daño menos significativo en la destrucción de los componentes contaminantes. Adicionalmente la biorremediación puede ser combinada con otras tecnologías en cadena, favoreciendo el tratamiento de los residuos mezclados y complejo, además tienen la característica de reducirlo o descomponer de una forma más segura los contaminantes resueltos del proceso de recuperación. (Cuatle Hernández, *et al*, 2021)

2.5.12 Metales pesados

Los metales pesados es un término común utilizado para nombrar a un grupo de metales y metaloides, estos tienen una densidad atómica superiores a 5.8 g/cm^{-3} están incluidos el zinc (Zn), cadmio (Cd), níquel (Ni), plomo (Pb) y cromo (Cr). Debido a que son altamente tóxicos, estabilidad y propiedades de bioacumulación, estos metales se encuentran entre los contaminantes más agresivos y peligrosos. Las fuentes de contaminación más comunes son por

la actividad ejercida por el hombre incluidas la minería, agricultura, actividades eléctricas y los vertidos en los ríos que son depositados por las industrias. Los metales pesados afectan negativamente los procesos fisiológicos de los organismos, especialmente de los humanos, dando lugar a una amplia gama de trastornos. (Soudani, *et al*, 2024)

Los límites permitidos de algunos metales pesados en el suelo se enumeran en la Tabla 6

Tabla 6. Límites permisibles recomendados de varios metales pesados /metaloides en el suelo según algunas organizaciones

Metales pesados/ metaloides	Limite permisible OMS/FAO mg/kg en el suelo (en ppm)
Cobre (Cu)	100
Zinc (Zn)	300
Cadmio (Cd)	3
Cromo (Cr)	100
Plomo (Pb)	100
Manganeso (Mg)	2000
Arsénico (As)	20
Hierro (Fe)	50.000
Cobalto (Co)	50
Selenio (Se)	10
Níquel (Ni)	50
Mercurio (Hg)	-0,08

Fuente: (Gupta y otros, 2024)

CAPÍTULO III: Diseño Metodológico

3.1. Tipo y diseño de investigación

El presente trabajo se considera cuantitativo, ya que su objetivo principal es ajustar los parámetros para la producción de espirulina en un fotobiorreactor y optimizar las condiciones de operación de la pirólisis térmica para la obtención de biochar. Para lograr estos objetivos, se implementará un análisis multivariante mediante un diseño central compuesto. Este enfoque cuantitativo no solo permite medir el rendimiento de los productos obtenidos en las pruebas experimentales, sino que también destaca la relevancia de ajustar adecuadamente los parámetros de producción de espirulina y optimizar los parámetros de operación de la pirólisis térmica, lo que destaca su potencialidad con una metodología metódica comprobable.

Además, esta investigación sigue un enfoque hipotético-deductivo, donde las hipótesis formuladas actúan como punto de partida para generar nuevas deducciones. Estas hipótesis se desarrollan a partir de datos empíricos, y su veracidad será verificada a través de la aplicación de reglas de deducción.

3.2. La población y la muestra

3.2.1. Delimitación de la población

La población utilizada para esta investigación fue espirulina, específicamente la cepa *Arthrospira platensis*, obtenida de la empresa Biotech Plant, ubicada en la provincia de Los Ríos, cantón Babahoyo. Esta cepa fue cultivada y cosechada en un fotobiorreactor implementado para el estudio.

3.2.2. Tipo de muestra

La muestra utilizada para la obtención de biochar fue la espirulina cultivada en un fotobiorreactor, donde se ajustaron los parámetros de operación. El proceso de crecimiento se llevó a cabo durante 120 días, tras lo cual se realizó la filtración y el secado de la biomasa.

3.2.3. Tamaño de la muestra y selección de muestra.

Se utilizaron 255 gramos de espirulina seca, recolectada de un total de 510 gramos de biomasa fresca, para realizar diversos tratamientos de biochar en el reactor pirolítico. Esta cantidad se seleccionó para optimizar las condiciones de operación del reactor y maximizar el rendimiento de biochar en las pruebas de pirólisis posteriores.

3.2.4. Caracterización de la población

La espirulina se cosechó semanalmente mediante el uso de una malla filtrante, que permitió separar el agua de la biomasa. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de secado en un horno diseñado específicamente para este fin, asegurando la esterilización. Se mantuvo una temperatura baja hasta que la espirulina se deshidrató completamente, tras lo cual se pulverizó para su uso posterior.

3.3. Los métodos y las técnicas

3.3.1. Selección de cepa

La cepa de espirulina se obtuvo de la empresa Biotech Plant, ubicada en la ciudad de Babahoyo, donde se adquirió un litro de espirulina.

Tabla 7. Materiales utilizados para la elaboración del medio de cultivo

Materiales	Cantidades
Bicarbonato de Sodio	10 g/L
Cloruro de sodio (Sal)	5 g/L
Macronutrientes	20 mL/L
Micronutrientes	2 mL/L

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

3.3.2. Materiales y métodos del fotobiorreactor

Para la elaboración del fotobiorreactor, se utilizó un recipiente de diferentes volúmenes, una bomba aireadora para el intercambio de gases y una luz LED blanca con una intensidad de 2500 Lumen programada para un fotoperiodo de 12 horas. Inicialmente, el fotobiorreactor se construyó en un recipiente de 5 litros, y su volumen se fue escalando a medida que aumentaba la densidad de la espirulina, hasta alcanzar un volumen final de 20 litros.

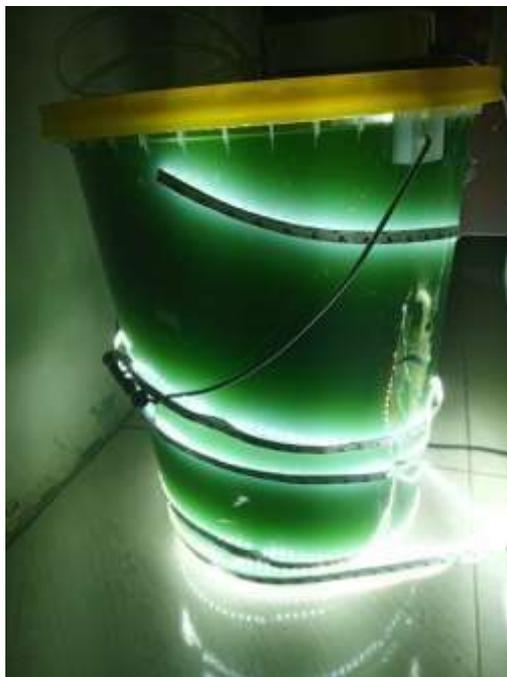
Tabla 8. Equipos y Modelos utilizados para el fotobiorreactor

Equipos	Modelo
Recipientes de diferentes volúmenes	1L, 3L, 5L y 20L
Termostato	W1209 a 12V
PHmetro	EZ – 9901
Luz Led	RGB 5055
Luz Led tubular	Tubular
Luxometro	Crunchy ByteBox
Temporizador	116 A. 250 Voltio
Bomba aireadora	SC – 7500

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

3.3.3. Diseño e implementación de un fotobiorreactor.

El diseño del fotobiorreactor se llevó a cabo en las primeras semanas utilizando botellas plásticas de mayor tamaño del necesario para asegurar una reproducción adecuada de la espirulina. Se incorporó una bomba aireadora debido a que el cultivo necesita dióxido de carbono y esta genera oxígeno y luces LED que ayudan a mantener la temperatura adecuada. En caso de ser necesario, se utilizó un termostato para regular la temperatura. Además, un temporizador se empleó para controlar el tiempo de funcionamiento de las luces LED y la bomba. A medida que se incrementaba la cantidad de espirulina, también se aumentaba el tamaño del fotobiorreactor, lo que permitía incrementar las cantidades de nutrientes y, por



ende, facilitar la reproducción de la microalga.

Figura 8. Fotobiorreactor

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

3.3.4. Variables que se optimizará en el crecimiento de las microalgas

Las variables optimizadas en este estudio incluyeron la temperatura, que, según la literatura consultada, debe mantenerse en un rango de 28 °C a 35 °C para favorecer el crecimiento de la espirulina. Otra variable crítica fue el pH, que debe estar entre 9 y 10.5 para asegurar un desarrollo óptimo de la microalga. El fotoperíodo se estableció entre 12 y 13 horas, durante el cual se utilizó una bomba aireadora para facilitar el intercambio gaseoso. Esta bomba se activó

durante 30 minutos, 5 a 6 veces a lo largo del fotoperiodo, garantizando así un ambiente adecuado para la proliferación de la espirulina.

3.3.5. Post procesamiento de la espirulina

El postprocesamiento de la espirulina se realizó utilizando una tela filtrante para su cosecha, filtrándose varias veces hasta recuperar la mayor cantidad posible de la microalga. Posteriormente, la espirulina cosechada fue sometida a un tratamiento térmico en un horno a una temperatura de 50 °C durante un lapso de 2 horas. Este proceso de secado asegura la eliminación de la humedad, lo que es fundamental para su conservación y preparación para etapas posteriores.

3.3.6. Medición del pH

Para medir el pH, se utilizó un pHmetro previamente calibrado y desinfectado. Se sumergió el pHmetro en el fotobiorreactor para realizar la medición, obteniendo valores que oscilaban entre 9 y 9.5.

3.3.7. Medición de la temperatura

Se utilizó un termómetro clínico para medir la temperatura del medio de cultivo. Después de desinfectar el electrodo, se sumergió en el fotobiorreactor, donde se determinó que la temperatura óptima era de 35 °C.

3.3.8. Proceso de escalamiento

El proceso de escalamiento se llevó a cabo en un periodo de siete días, o hasta que la espirulina adquiriera un color verde intenso, lo que indicaba su óptimo desarrollo. Para este proceso, se utilizaron bicarbonato de sodio y sal común, así como una combinación de micro y macronutrientes en proporciones que se detallan en la imagen, necesarios para el crecimiento saludable de la espirulina. Estos componentes contribuyen a crear un ambiente propicio para la producción de esta microalga, asegurando que reciba los nutrientes esenciales para su desarrollo.

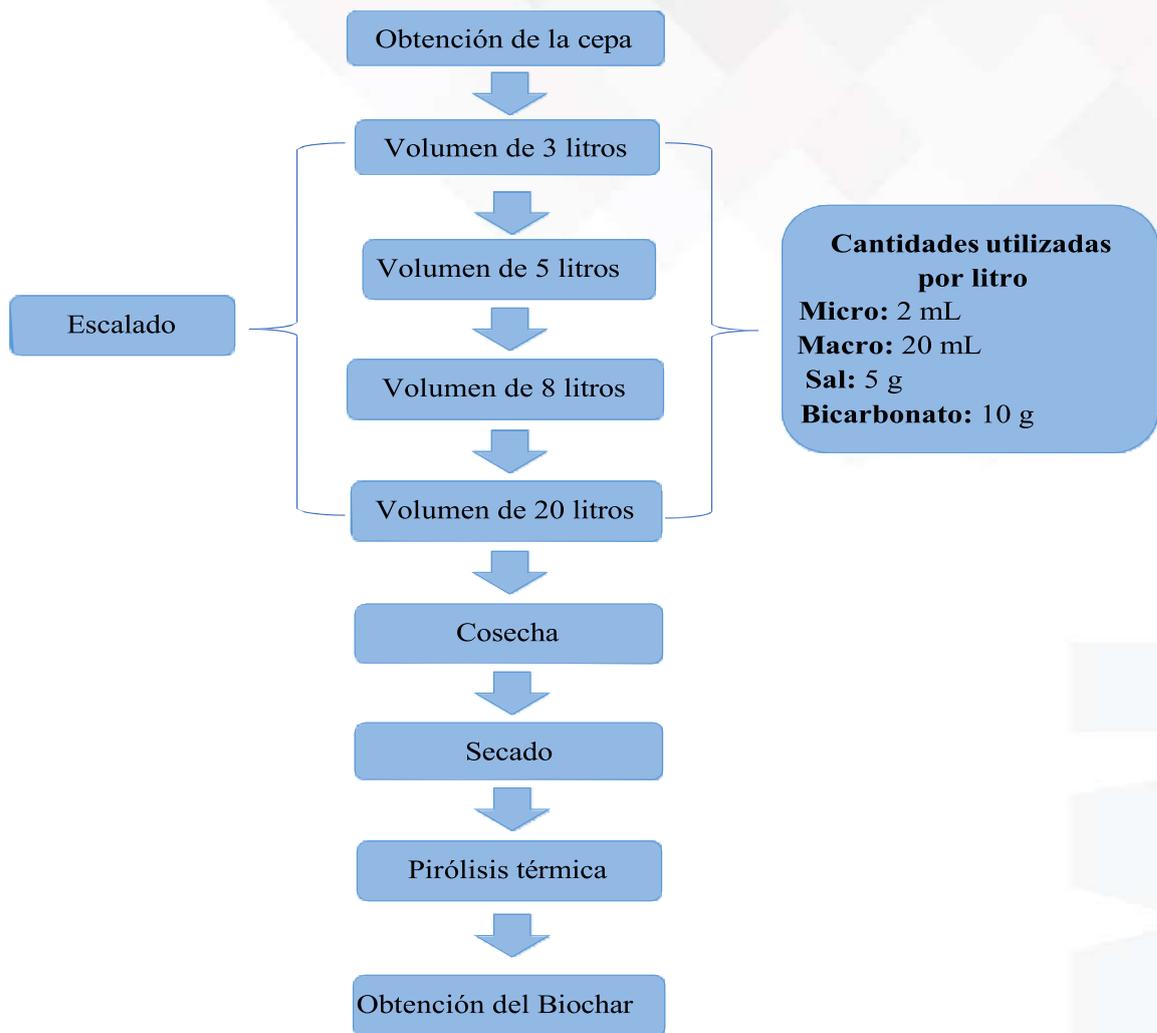


Figura 9. Obtención de la espirulina

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

3.3.9. Pirólisis

El proceso de pirólisis se realizó con la biomasa seca de espirulina en la ciudad de Riobamba, utilizando un reactor pirolítico en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica del Chimborazo (ESPOCH).

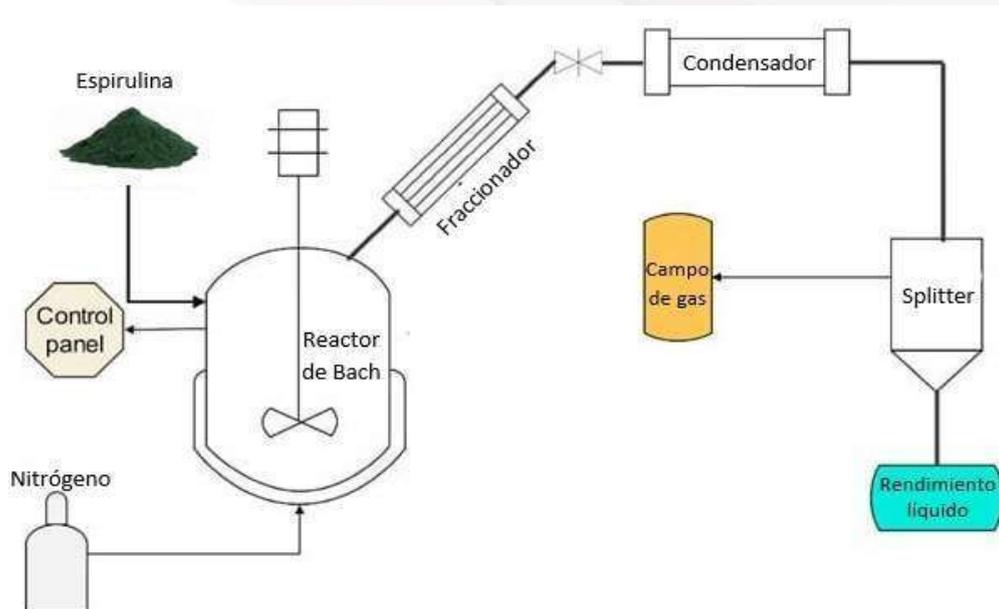


Figura 10. Obtención de biochar

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

3.4 Parámetros de operación del reactor pirólítico

3.4.1 Preparativos para la seguridad:

- Se realizó una limpieza integral de la cámara de reacción.
- **Verificación de conexiones y sellos:** Antes de iniciar el proceso, se aseguró que todas las conexiones entre las tuberías del reactor y el tanque de hidrógeno estuvieran bien ajustadas y selladas para prevenir posibles fugas.
- **Equipo de protección:** El personal utilizó adecuadamente los equipos de protección personal, como gafas, guantes y mascarillas, además de trabajar en un entorno ventilado.
- **Detección de fugas:** Se utilizó una solución jabonosa para comprobar que no hubiera fugas en las conexiones.

3.4.2 Hermetización del reactor pirólítico:

- **Cerrar válvulas de escape:** Se verificó que todas las válvulas que permiten la salida de gases estuvieran completamente cerradas.
- **Cierre del reactor:** Se aseguró que el reactor estuviera correctamente sellado, sin puntos de fuga.
- **Prueba de hermeticidad:** Con el reactor sellado, se realizó una prueba de presión introduciendo gas a presión en el reactor hasta alcanzar el nivel deseado (20 Psi) monitoreando con un manómetro. Se observó la presión durante un periodo de tiempo para verificar que no hubiera caídas significativas. No se observaron caídas notables en

la presión, pues la presión se mantuvo estable, entonces el reactor superó la prueba y quedó listo para el ingreso de hidrógeno.

3.4.3 Suministro de hidrógeno al reactor:

- **Conexión al tanque de hidrógeno:** Se conectó el tanque al puerto de entrada del reactor utilizando tuberías de alta presión, asegurándose de que las conexiones estuvieran bien selladas.
- **Ajuste del regulador del tanque:** Se abrió lentamente la válvula principal del tanque y se ajustó el regulador de presión para liberar hidrógeno de manera controlada. El rango de presión para el hidrógeno se ubicó cerca de los 20 Psi.
- **Llenado del reactor:** Una vez ajustado el regulador, se abrió la válvula de alimentación para que el hidrógeno entrara en el reactor. Se llenó el reactor hasta que la presión interna alcanzó el nivel deseado (20 Psi), monitoreado mediante un manómetro.
- **Parámetro de presión:** La presión fue ajustada de acuerdo al tipo de reacción realizada, manteniéndose dentro de los valores seguros para evitar accidentes.

3.4.4 Operación del tanque de hidrógeno:

- **Control del flujo:** Se ajustó el flujo de hidrógeno que ingresó al reactor utilizando el regulador de presión del tanque.
- **Verificación de válvulas:** Se aseguró que las válvulas del tanque permanecieran cerradas cuando no se necesitó más hidrógeno o cuando se alcanzó la presión adecuada en el reactor.
- **Medidas de seguridad:** El tanque se colocó en un área bien ventilada y alejada de fuentes de calor o ignición, debido a la inflamabilidad del hidrógeno.

3.4.5 Calentamiento del reactor:

- **Configuración de la temperatura:** Se utilizó el panel de control del reactor para seleccionar la temperatura del pirólisis. La temperatura inicial se ajustó en 100°C.
- **Monitoreo de la temperatura:** Se supervisó constantemente la temperatura del reactor a medida que este se calentaba.
- **Estabilidad térmica:** El sistema de control mantuvo la temperatura establecida. Cada vez que fue necesario, se realizaron ajustes con los controles.

3.4.6 Parámetros del reactor:

- **Presión:** El reactor se mantuvo a una presión constante, la cual fue monitoreada continuamente. Para el pirólisis, la presión se mantuvo en 20 Psi.

- **Rangos de Temperatura por cada corrida:** Para cada una de las 11 corridas que se plantearon en el experimento, se inició con una temperatura de 100°C, incrementando gradualmente la temperatura en incrementos periódicos de 50°C hasta alcanzar la temperatura deseada para cada una de las corridas las cuales iban desde los 279°C hasta los 421°C, tal como se desglosa en la siguiente tabla:
- **Seguridad:** El reactor estaba equipado con válvulas de alivio de presión que liberaban el exceso cuando se superaban los límites establecidos. El gas expulsado, incluido el metano, era dirigido a través de una manguera hacia un recipiente con agua, donde se recolectaba de forma segura.

3.4.7 Ejecución del proceso:

A medida que el hidrógeno ingresó al reactor y la temperatura alcanzó el nivel adecuado, comenzó la descomposición del material. Se monitorearon continuamente tanto la temperatura como la presión para mantener el proceso dentro de los límites seguros.

Al finalizar la pirólisis, se apagó el calentador del reactor y se permitió que el sistema se enfriara antes de abrirlo para recuperar los productos obtenidos.

3.4.8 Consideraciones finales:

- **Purgado del reactor:** Al finalizar el proceso, se purgó el reactor de manera segura, liberando la presión lentamente a través de las válvulas adecuadas.
- **Mantenimiento:** Se revisaron periódicamente los sellos y las conexiones para prevenir fugas o accidentes futuros.

Este procedimiento se llevó a cabo con cuidado extremo, ya que el manejo de hidrógeno a alta presión y temperatura puede ser peligroso si no se siguen las normas de seguridad adecuadas.

3.5 Obtención de biochar

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento llevado a cabo en el reactor pirolítico para la obtención de biochar.

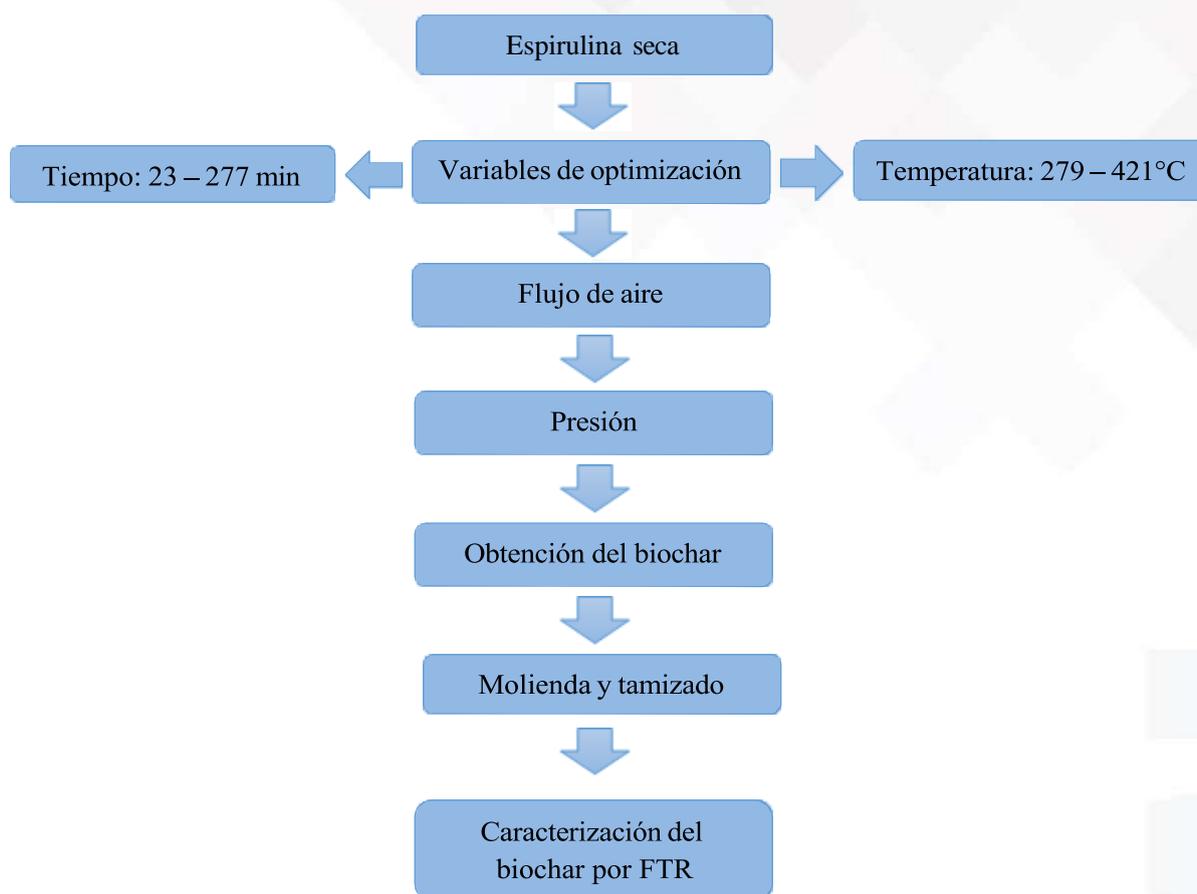


Figura 11. Proceso de obtención del biochar

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

3.5.1 Caracterización de la microalga y biochar mediante espectroscopia FTIR

La espectroscopia FTIR es una herramienta esencial para la determinación simultánea y cuantitativa de componentes orgánicos, como proteínas, carbohidratos y lípidos, en una amplia variedad de muestras, incluyendo pastas, polvos, líquidos, películas y gases. El espectro resultante proporciona datos de absorción en función del número de onda y se divide en tres regiones: el espectro lejano ($<400\text{ cm}^{-1}$), el espectro IR medio ($400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) y el espectro IR cercano ($4000\text{-}13000\text{ cm}^{-1}$). Aunque el espectro IR medio es el más utilizado en el análisis de muestras, tanto el espectro IR lejano como el cercano también aportan información valiosa sobre las características de las muestras analizadas.

En este estudio, la espirulina (*Arthrospira platensis*) fue caracterizada mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizando un espectrómetro JASCO FT/IR-4100. Este método se llevó a cabo con el programa Spectra Analysis, el cual realiza la

adquisición y el tratamiento de los datos, proporcionando un valor numérico basado en la altura o área del pico en un rango de escaneo de 4000 a 400 cm^{-1} .

3.6 Diseño experimental

Para este estudio, se empleó un CCD de dos factores y cinco niveles con 11 ejecuciones. Los tres factores seleccionados en la optimización de las condiciones de pirólisis para la obtención de un mayor rendimiento de biochar (%) son: la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y el tiempo de reacción (min) que se denotaron como X_1 y X_2 respectivamente. Cada factor se evaluó en cinco niveles diferentes: combinando puntos factoriales (-1 , $+1$); puntos axiales ($-\alpha$, $+\alpha$) y tres puntos centrales (0) como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Diseño central compuesto (CCD) en la optimización de condiciones de pirólisis.

Factores	Símbolo	Nivel codificado				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	X1	279	300	350	400	420
Tiempo de reacción (min)	X2	23	60	150	240	277

Fuente: (Alava & Saltos, 2024)

En la tabla 10, se muestra el número de experimentos y los valores reales de cada uno de los factores: temperatura y tiempo de reacción (variables independientes) frente al rendimiento de biochar (variable dependiente).

Tabla 10. Pirólisis para la obtención de biochar

Corridas	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Tiempo (min)
1	300	60
2	400	60
3	300	240
4	400	150
5	279	150
6	421	23
7	350	277
8	350	150
9	350	150
10	350	150
11	350	150

Fuente: Alava & Saltos (2024)

El porcentaje de rendimiento de biochar se analizó utilizando una ecuación polinómica de segundo orden y los datos se ajustaron mediante un procedimiento de regresión múltiple. La relación matemática de la respuesta (Y) con las variables independientes significativas, a saber, X_1 y X_2 se da mediante la siguiente ecuación polinómica cuadrática:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 \cdot X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2$$

donde Y es la respuesta (porcentaje de rendimiento de biochar); X_1 y X_2 son variables independientes significativas. β_1 , β_2 son coeficientes de regresión lineal; β_{11} , β_{22} , son coeficientes de regresión cuadrática; β_{12} es un coeficiente de regresión interactiva; β_0 es un término constante.

3.7 Análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis estadístico del modelo para evaluar el análisis de varianza (ANOVA) en el contexto del diseño experimental multivariante realizado. Este análisis incluyó la prueba de Fisher (prueba F), su probabilidad asociada $P(F)$ y el coeficiente de determinación (R^2), que son indicadores clave de la bondad de ajuste del modelo de regresión. Además, se utilizaron superficies de respuesta y gráficos de contorno de las respuestas predichas para evaluar la interacción entre los factores significativos.

Para el diseño de experimentos multivariantes y el análisis de regresión de los datos experimentales obtenidos, se empleó el software Minitab® 18, desarrollado en Pennsylvania, EE. UU.

CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados

4.1. Parámetros de producción de espirulina

4.1.1. pH

En la Tabla 11 se presentan los resultados del pH registrados a lo largo del proceso de producción de espirulina, evidenciando valores que oscilan entre 8 y 10. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Muñoz Puetate et al. (2021), quienes reportaron valores similares. Asimismo, los estudios realizados por Duarte Cuesta y Játiva Carofalo (2023) también reflejaron pH en un rango de 9 a 10.5 durante el proceso de escalamiento del fotobiorreactor, coincidiendo con los valores obtenidos en nuestra investigación.

Tabla 11. Valores promedios del pH obtenidos en la producción de la espirulina.

Mes	Ph
Mayo	9,8
Junio	10,1
Julio	9,2
Agosto	9,5

Fuente: Alava & Saltos (2024)

4.1.2. Temperatura

En la Tabla 12 se presentan las temperaturas registradas a lo largo del proceso de producción de espirulina, las cuales deben mantenerse entre 28 °C y 35 °C para asegurar un desarrollo óptimo. La temperatura promedio en mayo fue de 30,5 °C, en junio alcanzó los 31,9 °C, en julio llegó a 34 °C, y en el último mes de medición se registró una temperatura de 34,5 °C. Según la literatura revisada, diferentes autores, como Muñoz Puetate et al. (2021), indican que la temperatura óptima para el crecimiento de la espirulina se sitúa entre 30 °C y 35 °C. Por otro lado, Cruz Woo (2022) señala que el crecimiento de la espirulina es exponencial en un rango de 22 °C a 32 °C.

Tabla 12. Temperatura promedios obtenidas en la producción de espirulina

Mes	Temperatura
Mayo	30,5 °C
Junio	31,9 °C
Julio	34 °C
Agosto	34,5 °C

Fuente: Alava & Saltos (2024)

4.2. Pirolisis térmica

En la Tabla 13 se observa que a medida que aumenta la temperatura, el rendimiento del biochar tiende a disminuir. Por ejemplo, al utilizar una temperatura de 421 °C durante 150 minutos, se obtuvo un rendimiento del 33,58%, lo que indica que temperaturas más elevadas pueden degradar la materia orgánica, resultando en un menor rendimiento. En contraste, al aplicar una temperatura de 350 °C con un tiempo de reacción de 23 minutos, el rendimiento alcanzó un 46,51%. Además, cuando se mantuvo la temperatura en 350 °C pero se extendió el tiempo de reacción a 150 minutos, los rendimientos fluctuaron entre 31,20% y 31,99%.

Tabla 13. Modelo matemática para la optimización de procesos

Experimentos	Temperatura °C	Tiempo (min)	Rendimiento biochar (%)	Valor predicho
1	300	60	44,02	43,73
2	400	60	40,61	40,73
3	300	240	39,94	39,58
4	400	240	34,25	34,30
5	279	150	38,88	39,27
6	421	150	33,58	33,41
7	350	23	46,51	46,57
8	350	277	38,93	39,09
9	350	150	31,20	31,63
10	350	150	31,72	31,63
11	350	150	31,99	31,63

Fuente: Alava & Saltos (2024)

4.2.1. Rendimiento del biochar

En la Figura 12 se presentan los resultados obtenidos en el experimento en comparación con las predicciones del modelo. La línea roja en la imagen actúa como guía, mostrando los resultados previstos, mientras que los puntos cercanos a la línea indican que el modelo fue adecuado. Para los experimentos 9, 10 y 11, se predijo un rendimiento del biochar del 31,63%, y los resultados obtenidos fueron de 31,20%, 31,72% y 31,99%, respectivamente, lo que refleja

una ligera discrepancia con las predicciones. Por otro lado, el experimento 6 tuvo un valor previsto de 33,41% y un rendimiento real de 33,58%. El valor más alto se registró en el experimento 7, donde se predijo un rendimiento del 46,57%, y el rendimiento obtenido fue de 46,51%.

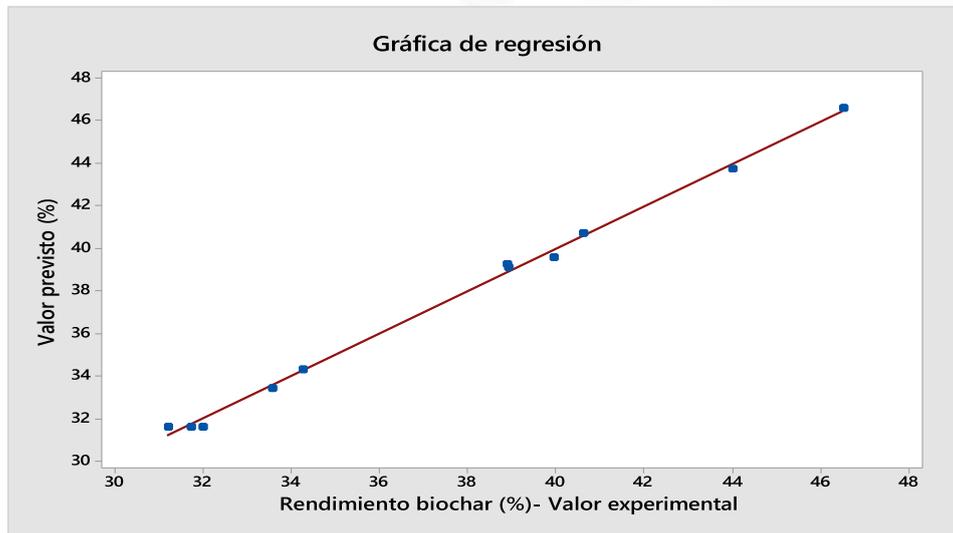


Figura 12. Relación entre el rendimiento del biochar y el valor previsto

Fuente: Alava & Saltos (2024)

La Figura 13 ilustra la interacción entre el tiempo de reacción y la temperatura en relación con el rendimiento del biochar. Cada color en la gráfica representa un rango específico del rendimiento del biochar. Por ejemplo, los colores claros indican un rendimiento inferior al 35%. Los tonos más oscuros reflejan un rendimiento de entre el 35% y el 40%, y a medida que el color se oscurece aún más, el rendimiento del biochar aumenta, alcanzando valores superiores al 50% en las tonalidades más oscuras.

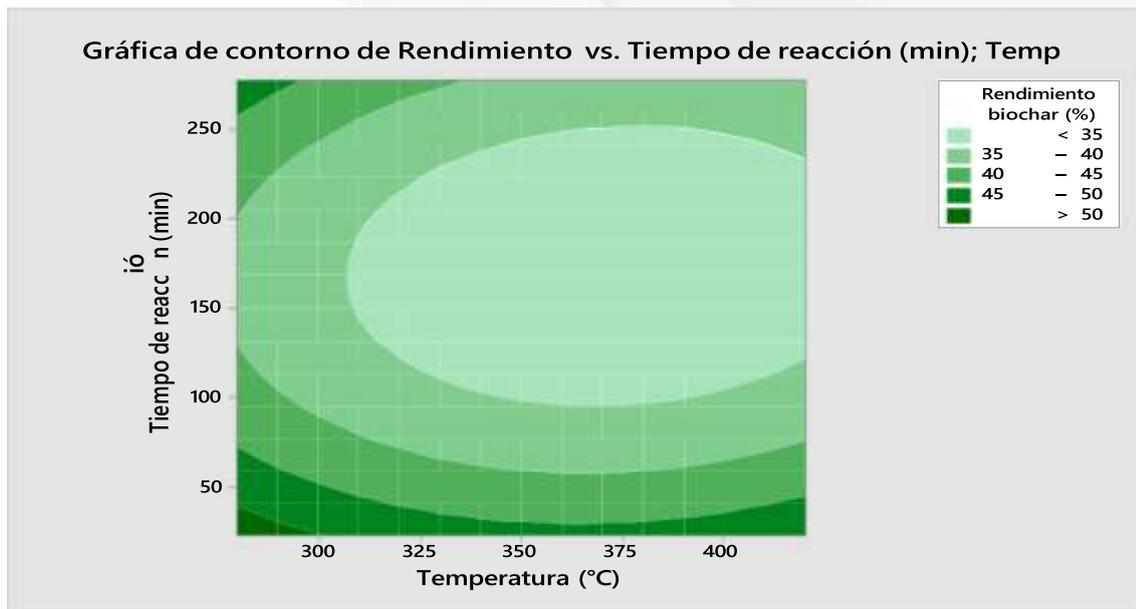


Figura 13. Optimización del biochar. Efecto de la temperatura y tiempo de reacción
Fuente: Alava & Saltos (2024)

La Figura 14 presenta una imagen en 3D que ilustra la superficie de respuesta en función del tiempo de reacción y la temperatura. En esta gráfica, los picos más altos indican los mejores rendimientos, y los colores más oscuros corresponden a rendimientos más elevados. El punto más alto, representado en un verde oscuro, muestra un rendimiento del biochar de 46.51% con un tiempo de reacción de 23 minutos a una temperatura de 350 °C. Por otro lado, los puntos más bajos reflejan rendimientos de 31.20%, 31.72% y 31.99%, todos obtenidos con un tiempo de reacción de 150 minutos a la misma temperatura de 350 °C.

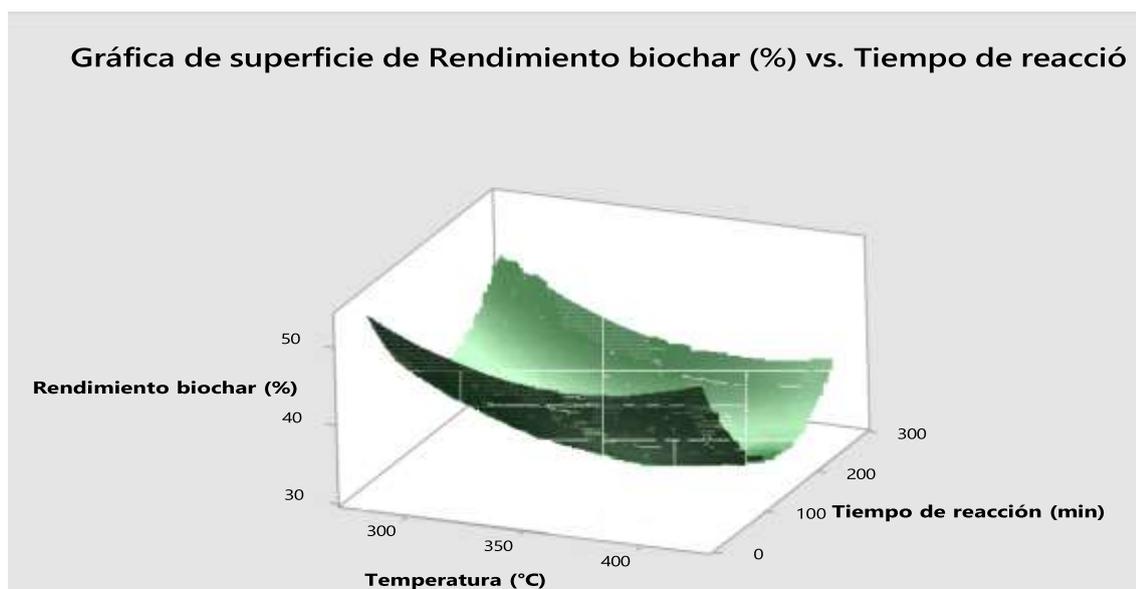


Figura 14. Rendimiento del biochar frente al tiempo de reacción
Fuente: Alava & Saltos (2024)

En la Figura 15 se muestran las variables que interactúan con el rendimiento del biochar, específicamente la temperatura y el tiempo de reacción. Esta gráfica se divide en dos partes, donde cada segmento presenta cómo el rendimiento del biochar varía en función de la combinación de temperatura y tiempo de reacción. El rendimiento máximo del biochar alcanzado fue de 53.07%, con un tiempo óptimo de reacción de 22.72 minutos y una temperatura óptima de 279.28 °C. Además de estos valores óptimos, se presentan rangos aceptables para ambas variables, que son más amplios que los valores óptimos obtenidos. Esto indica que, al ajustar la temperatura o el tiempo dentro de estos rangos, se puede lograr un rendimiento óptimo, aunque no se alcanzará el máximo rendimiento del biochar.

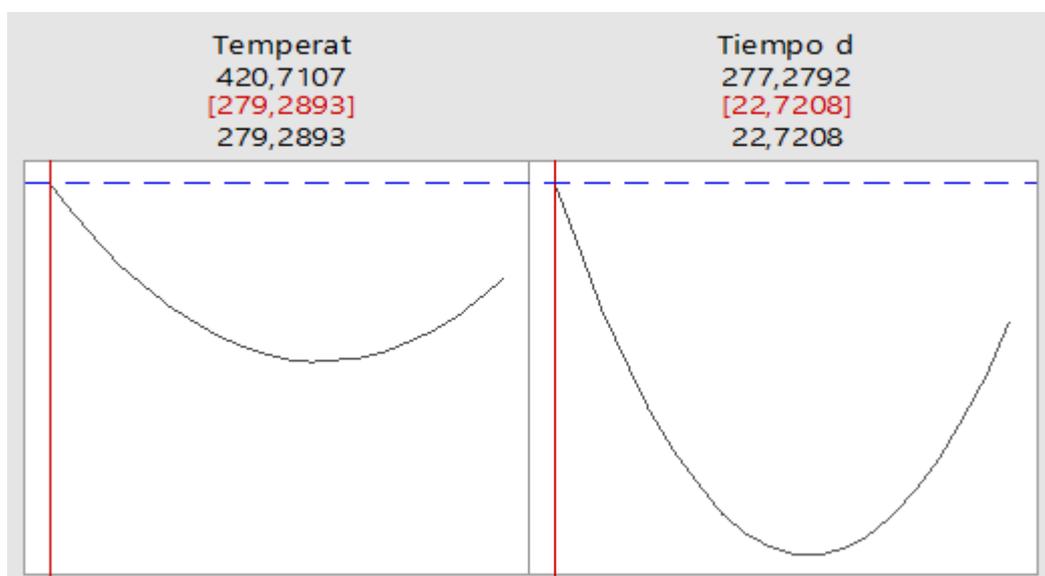


Figura 15. Curva de rendimiento del biochar
Fuente: Alava & Saltos (2024)

4.3. Caracterización de espirulina y biochar

4.3.1. FTIR espirulina seca

El análisis FT-IR de la muestra de espirulina seca dio como resultados diversos picos de grupos funcionales. Las presentes entre los 3000-3500 cm^{-1} corresponden a los enlaces del grupo Hidroxilo (OH) y del grupo Amino (NH), los cuales son muy intensos. Esto nos da a entender que existe una alta proporción del grupo hidroxilo y amino en la espirulina. En las bandas entre los 1600 a 1800 cm^{-1} están asociadas con la presencia de enlaces C-O, que corresponden a los carbohidratos, también presentes con una intensidad muy alta, manifestando la presencia del grupo carbonilo de una manera significativa en la molécula. También se observó la presencia

de enlaces C-N y C-O, lo que manifiesta la presencia de aminoácidos y otros compuestos nitrogenados en una escala moderada en las bandas correspondientes a los 1200-1500 cm^{-1} .

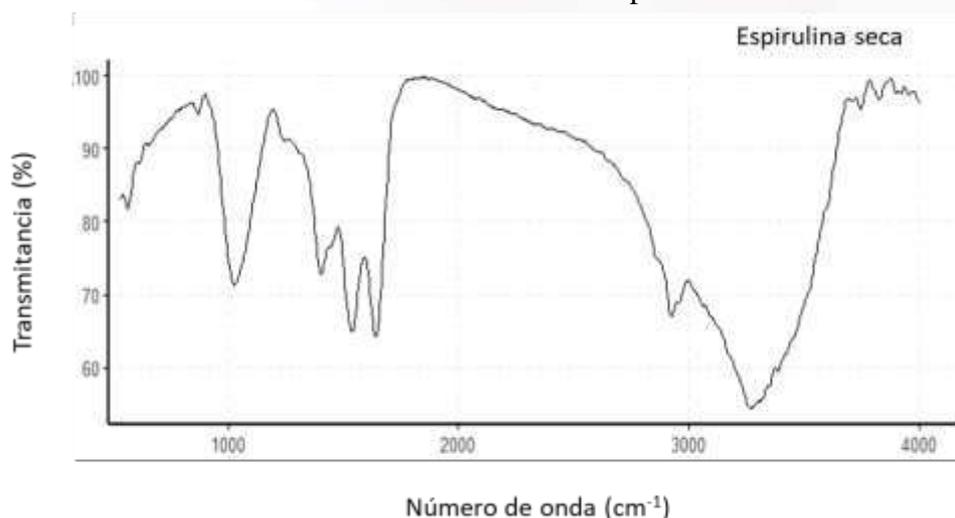


Figura 16. FTIR espirulina seca

Fuente: Alava & Saltos (2024)

4.3.2. FTIR biochar de espirulina

Las bandas que están dentro de los 3000-3500 cm^{-1} que corresponden a los enlaces OH (hidroxilo) y NH (amino), son moderadamente intensos. Esto indica una presencia en mayor medida de los grupos hidroxilo y amino en el biochar, lo cual es esperado debido a la presencia de celulosa, hemicelulosa y proteínas en la biomasa de la espirulina. Las bandas presentes entre los 1600-1800 cm^{-1} presentan enlaces C=O (carbonilo), también están presentes en una intensidad un tanto moderada. La presencia del grupo carbonilo nos indica que aparecen compuestos como ácidos carboxílicos, ésteres y amida. Las bandas presentes en los 1200-1500 cm^{-1} corresponden a los enlaces C-N y C-O, estos son menos intensos que los anteriores, lo que indica una menor presencia de estos grupos funcionales en comparación con los hidroxilos y carbonilos. La intensidad que va de moderada a alta en las bandas que están asociadas a los grupos hidroxilo y carbonilo, no expresan que el biochar posee una cantidad significativa de compuestos oxigenados como celulosa, hemicelulosa y ácidos carboxílicos. También la presencia de compuesto nitrogenados como proteínas y aminoácidos, pero en menor proporción. La presencia de bandas por debajo de 1500 cm^{-1} sugiere que durante el proceso de pirólisis se formaron estructuras aromáticas.

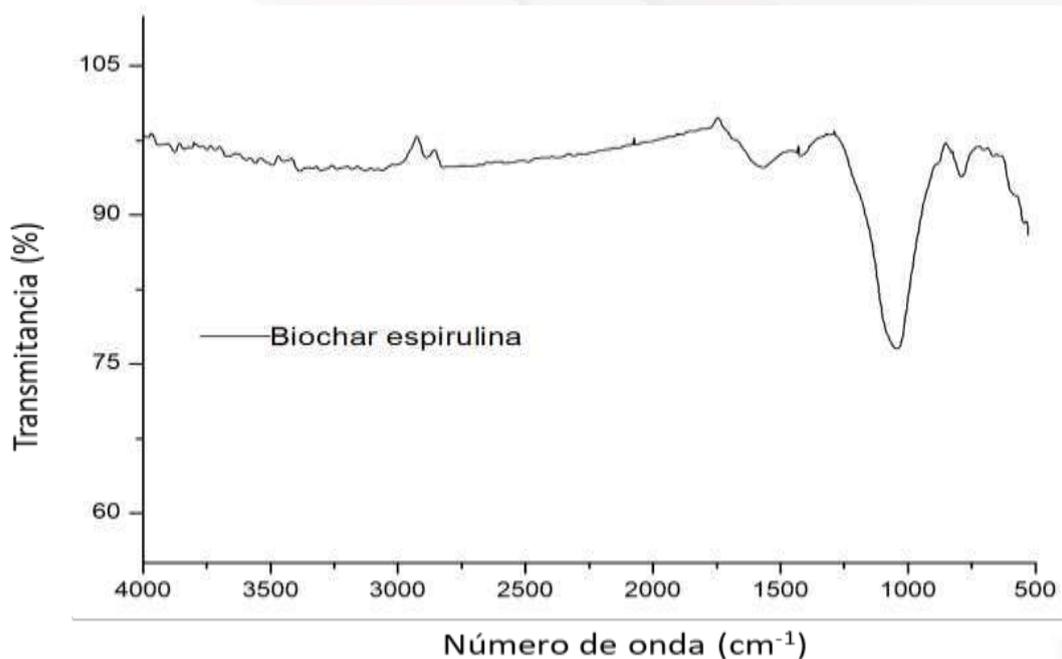


Figura 17. FTIR biochar de espirulina
Fuente: Alava & Saltos (2024)

4.3.3. Caracterización del biochar

Las bandas presentes entre los $3000\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ están asociadas con los enlaces del grupo hidroxilo (OH) y aminos (NH), que son muy típicos en los compuestos como agua, aminas y amidas. En la espirulina, estos grupos pueden estar presentes en proteínas, carbohidratos y agua. Las bandas de $1600\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ están relacionadas con los enlaces C=O (carbonilo), presentes en los grupos como carbonilos, ésteres y amidas. Estos enlaces son característicos de proteínas, carbohidratos y lípidos. En las bandas de $1200\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ se hallan los enlaces C-N y C-O, típicos de las aminas, amidas y ésteres. Estos enlaces nos indican la presencia de proteínas y carbohidratos. Las bandas que están por debajo de los 1200 cm^{-1} a los enlaces C-C y C-H que son comunes en compuesto de origen orgánicos en general. La huella digital ($1200\text{-}900\text{ cm}^{-1}$) es muy útil para la identificación de diferentes tipos de polisacáridos.

CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Discusión

5.1.1. pH y Temperatura

(Colorado Gómez & Moreno Tirado, 2017) realizaron un estudio sobre la producción de espirulina (*Arthrospira maxima*) mediante la implantación de fotobiorreactores en La Guajira, Colombia, donde obtuvieron resultados positivos en el cultivo de esta cianobacteria. Iniciaron los cultivos en fotobiorreactores de 1 litro, de los cuales se extrajeron inóculos para escalarlos a fotobiorreactores de mayor capacidad, alcanzando hasta 50 litros. Las condiciones de cultivo se mantuvieron controladas, con temperaturas entre 30 y 36 °C y un pH de 9.0 a 10.0, lo que favoreció al crecimiento óptimo de la espirulina. A partir de un cultivo inicial de un litro, se escaló hasta alcanzar una capacidad de 20 litros. Los resultados obtenidos durante el cultivo mostraron valores casi idénticos, con temperaturas de 30.5 °C y 34.5 °C, y un pH de 9.2 a 10.1, que se consideraron óptimos para el desarrollo de la espirulina.

5.1.2. Rendimiento del biochar

Los resultados obtenidos por (Rhenals Hoyos, 2024) en su trabajo de investigación, se centraron en evaluar la cantidad de biochar producido a partir de biomasa durante un proceso de pirólisis (Tabla 14). Realizó experimentos variando la temperatura de pirólisis y la tasa de calentamiento, para identificar las condiciones óptimas que maximicen el rendimiento. Con una temperatura de 350 °C y una tasa de calentamiento de 10 °C/min, utilizando una biomasa del 33.28%, se obtuvo un rendimiento del 18.84%, que fue el menor rendimiento registrado durante el proceso. En contraste, a una temperatura de 450 °C y un tiempo de calentamiento de 5 °C/min, con una biomasa del 34.62%, se alcanzó un rendimiento del 25.13%. En otro conjunto de experimentos, al mantener la temperatura de 350 °C durante 150 minutos y utilizar 25 gramos de biomasa, se registraron rendimientos de 31.20%, 31.72% y 31.99%, que también fueron los valores más bajos de rendimiento del biochar. Sin embargo, con una temperatura de 350 °C y un tiempo de calentamiento de 23 minutos utilizando el mismo peso de biomasa, se logró un rendimiento más alto de 46.51% en la producción de biochar.

Tabla 14. Rendimiento biochar para las configuraciones experimentales

Temperatura (°C)	Tasa de calentamiento (°C/min)	Biomasa (g)	Biochar (g)	Rendimiento (%)
350	10	33.28	6.27	18.84
350	10	32.98	6.70	20.33
350	10	33.61	6.56	19.51
350	5	32.86	6.94	21.11
350	5	33.47	6.65	19.86
350	5	33.15	6.64	20.02
450	10	34.05	7.88	23.13
450	10	33.56	8.06	24.02
450	10	34.23	8.12	23.71
450	5	34.72	8.51	24.51
450	5	34.62	8.70	25.13
450	5	33.74	8.30	24.61

Fuente: (Rhenals Hoyos, 2024)

5.1.3. FTIR espirulina seca

Los resultados obtenidos por (Quites Larrosa, *et al*, 2015) observaron bandas en la región de 3800 a 3500 cm^{-1} , correspondientes al estiramiento de grupos -OH libres. A 3300 cm^{-1} se identificó la deformación axial del enlace NH de las aminas primarias. La región de 3000 cm^{-1} mostró deformaciones del CH. Un fuerte estiramiento vibratorio de C=O se registró a 1700 cm^{-1} . En 1550 cm^{-1} se observó la deformación angular del grupo NH. La deformación angular de CH se identificó a 1400 cm^{-1} . A 1250 cm^{-1} se registró el tramo C-N. La deformación axial del COH se observó a 1100 cm^{-1} . Las bandas entre 900 y 760 cm^{-1} correspondieron a deformaciones CH fuera del plano. Las muestras secadas en bandeja mostraron menor intensidad en ciertas bandas en comparación con las secadas en lecho de pico. La ruptura celular afectó la intensidad de las bandas, especialmente en la región de 1700 cm^{-1} . Los picos obtenidos en el FTIR de la espirulina seca nos muestran resultados similares en los grupos funcionales en las bandas de la región de 3000-3500 cm^{-1} corresponden al grupo Hidroxilo y al grupo Amino. En ambos casos se nos da eh entender existe una alta presencia de estos grupos.

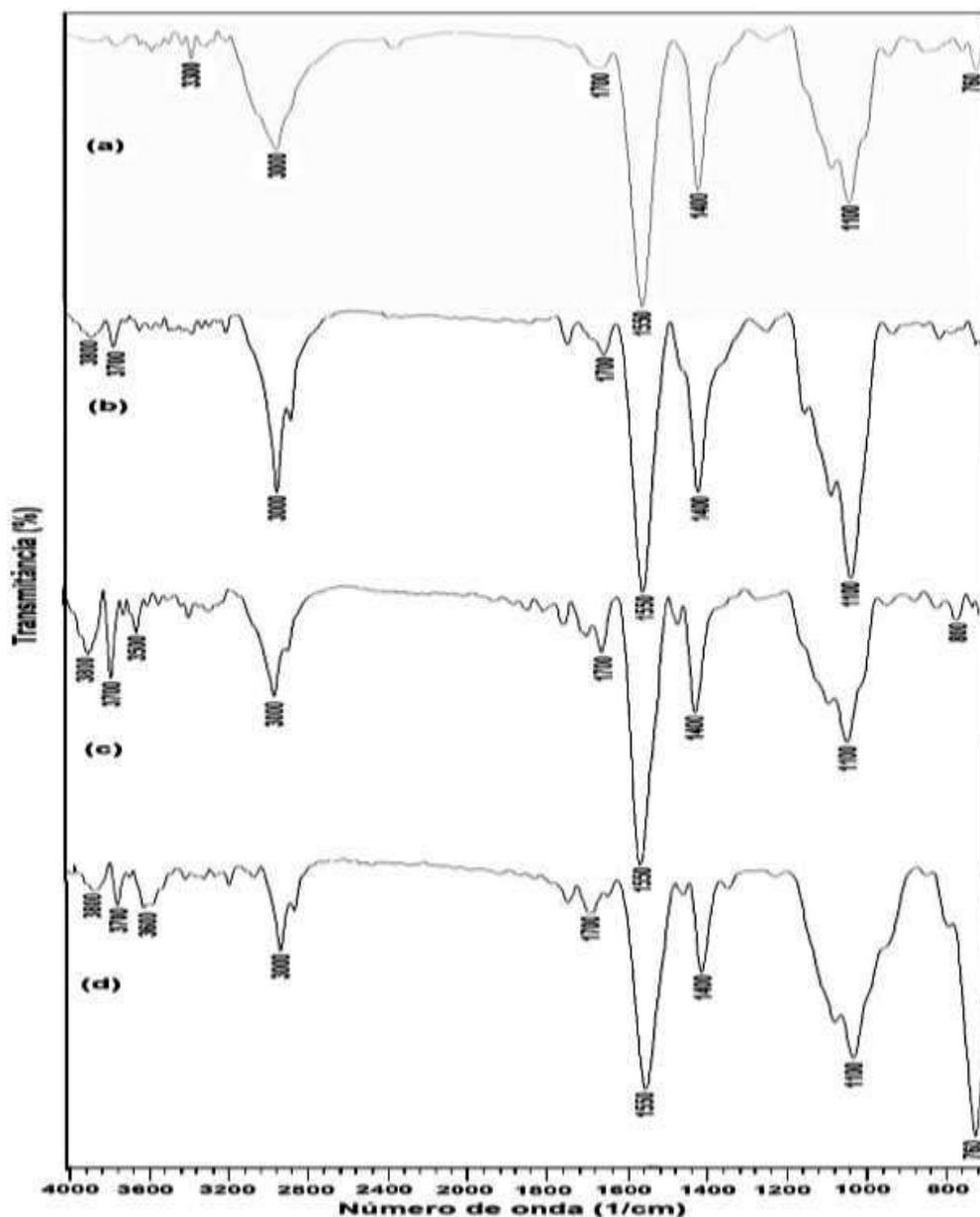


Figura 18. FTIR espirulina seca

Fuente: (Quites Larrosa , *et al*, 2015)

5.1.4. FTIR biochar de espirulina

El análisis FTIR realiza por (Peretti Minello, *et al*, 2024) analizaron la biomasa y biocarbón de *A. platensis* reveló diferencias significativas en sus perfiles espectrales. La biomasa presentó bandas características de hidroxilos (3460 cm^{-1}), estiramientos C-H (2925 cm^{-1}) y carbonilos amida (1680 cm^{-1}), indicando la presencia de proteínas, carbohidratos y otros compuestos orgánicos. Por su parte, el biocarbón mostró una disminución en la intensidad de estas bandas, sugiriendo la degradación de biomoléculas durante la pirólisis. La aparición de un pico a 880 cm^{-1} en el biocarbón sugiere la formación de compuestos aromáticos. Los resultados obtenidos

en la región de $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ en ambos casos tenemos la presencia del grupo Hidroxilo, la presencia de carbonilos y la amida se presentan en las bandas que comprenden $1600-1800\text{ cm}^{-1}$, en los en ambos casos tenemos la presencia de compuestos aromáticos bajos los 1500 cm^{-1} .

5.1.5. Caracterización del biochar

En la investigación realizada por (Piloni, *et al*, 2021) realizaron análisis FTIR del biochar reveló una disminución en la intensidad de la banda asociada a los grupos hidroxilo ($3000-3600\text{ cm}^{-1}$) a medida que aumentaba la temperatura de activación, lo que sugiere una reducción en la cantidad de grupos funcionales superficiales. Además, se identificaron bandas características de estiramientos C-O en la región de $1040-1250\text{ cm}^{-1}$, indicando la presencia de grupos oxigenados como alcoholes, ésteres y fenoles. En el biocarbón activado con KOH, se observó una banda adicional entre 1580 y 1740 cm^{-1} , atribuida a ácidos carboxílicos. Estos grupos funcionales presentes en el biochar podrían interactuar con los componentes del caldo, permitiendo su purificación y sugiriendo un potencial uso en procesos de adsorción. Los resultados obtenidos muestran que dentro de los $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ tenemos la presencia del grupo Hidroxilo, pero los enlaces C-O están presentes en las bandas $1200-1500\text{ cm}^{-1}$ en los cuales se encuentran los esterres lo cual en coinciden con los resultados del análisis FT-IR obtenidos.

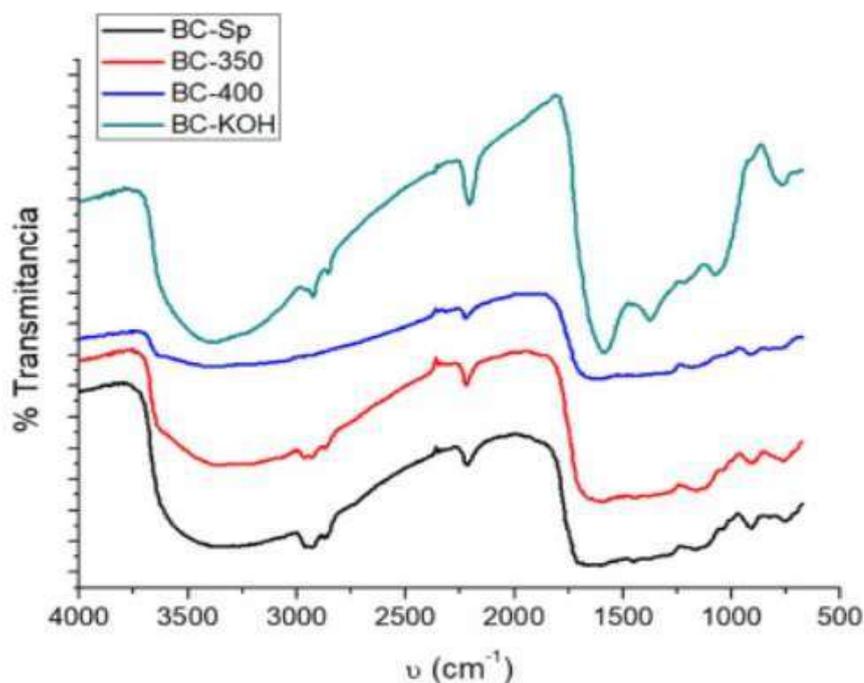


Figura 19. Los grupos funcionales presentes en la superficie de los biocarbones se analizaron mediante espectroscopia infrarroja

Fuente: (Piloni y otros, 2021)

5.2. Conclusiones

- Se identificaron temperaturas de 30 y 35 °C y un pH de 9 a 10, como condiciones favorables para el crecimiento de espirulina. Estos parámetros fueron importantes para el desarrollo exitoso del cultivo en el fotobiorreactor, lo que nos sugiere que el control de estas variables es importante para el óptimo desarrollo de la espirulina. Se observó que las temperaturas no influyen en la producción del biochar, lo que influye es el tiempo de calentamiento, porque a mayor tiempo de calentamiento se obtuvo un menor rendimiento del biochar, a menor tiempo de calentamiento del reactor se obtuvo un alto rendimiento del biochar.
- La implementación de un diseño central compuesto, permitió identificar de manera más efectiva las interacciones entre múltiples variables (temperatura, tiempo de reacción) que afectan el rendimiento del biochar, esto facilitó la optimización de las condiciones de producción para alcanzar los máximos rendimientos y predecir el porcentaje de rendimiento del biochar. A través del análisis multivariante, se pudo identificar cuáles fueron las variables que tienen un efecto significativo en el rendimiento del biochar. Esto ayudó a priorizar los factores que deben ser controlados.
- El análisis realizado mediante Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR), ha permitido caracterizar de manera efectiva tanto la espirulina (*Arthrospira platensis*) cosechada como el biochar obtenido. Los resultados evidencian la presencia de grupos funcionales significativos en la espirulina, tales como hidroxilos, aminas y carbonilos, que son indicativos de su riqueza en biomoléculas como proteínas y carbohidratos. Por otro lado, el biochar presenta una disminución en la intensidad de las bandas asociadas a estos grupos funcionales, lo que sugiere una degradación de biomoléculas durante el proceso de pirólisis. Esta transformación no solo resalta la capacidad del biochar para retener compuestos aromáticos, sino que también sugiere su potencial aplicación en procesos de adsorción y purificación de soluciones, lo que podría ser de gran utilidad en el tratamiento de aguas residuales y en la mejora de suelos.
- Con base en los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación, se acepta la hipótesis alternativa planteada, que postulaba que es apropiada la implementación de un fotobiorreactor semiabierto para la producción de espirulina y posterior obtención de biochar a partir de pirólisis térmica.

5.3. Recomendaciones

- Se sugieren futuras investigaciones que se centren en la caracterización de la espirulina y en la optimización de las condiciones de pirólisis para mejorar aún más el rendimiento del biochar, así como en la exploración de otros factores que puedan influir en estos procesos.
- Se propone que seguir con esta investigación, utilizando el diseño central compuesto para explorar otras variables que puedan influir en el rendimiento, así como validar los modelos predictivos en condiciones de producción a gran escala.
- Se plantea la necesidad de seguir con esta investigación, para evaluar la capacidad de adsorción del biochar de metales pesados en cuerpos de agua.
- Se recomienda llevar a cabo estudios adicionales que exploren la funcionalidad del biochar derivado de espirulina en aplicaciones prácticas, como su uso en la remoción de contaminantes en aguas residuales y su efectividad como enmienda en suelos agrícolas. Además, será beneficioso investigar la optimización de las condiciones de pirólisis para maximizar la retención de grupos funcionales en el biochar, lo que podría mejorar sus propiedades adsorbentes. La integración de estos enfoques podría contribuir significativamente al desarrollo de tecnologías sostenibles, que aprovechen los recursos biológicos de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente.
- Se recomienda a futuros investigadores ajustar y refinar los parámetros operativos de la pirólisis, tales como la temperatura, el tiempo de reacción y la velocidad de calentamiento, con el objetivo de maximizar la retención de grupos funcionales clave en el biochar. Utilizando un diseño central compuesto, se pueden realizar experimentos sistemáticos que, apoyados en herramientas estadísticas, permitan identificar configuraciones óptimas para mejorar tanto el rendimiento como las propiedades funcionales del biochar en comparación con los hallazgos previos.
- Se sugiere que las futuras investigaciones se enfoquen en un análisis avanzado de las propiedades fisicoquímicas del biochar, evaluando su capacidad para adsorber contaminantes orgánicos e inorgánicos. Mediante técnicas como FTIR, SEM y análisis BET, se pueden explorar aspectos como la estructura porosa y la composición de grupos funcionales, con el propósito de consolidar y expandir la caracterización inicial realizada, orientando el biochar hacia aplicaciones prácticas relacionadas con la mitigación de impactos ambientales.

- Se recomienda investigar la efectividad del biochar como adsorbente para la remoción de contaminantes metálicos, tales como plomo, cadmio y mercurio, en soluciones acuosas. Los futuros estudios podrían incluir diseños experimentales que utilicen tanto soluciones estándares como aguas residuales reales, evaluando el impacto de variables como el pH, la concentración inicial de los metales y el tiempo de contacto, para profundizar en su potencial uso en procesos de tratamiento de aguas.
- Se sugiere a los próximos investigadores evaluar el uso del biochar en la rehabilitación de suelos con baja fertilidad, a través de ensayos de campo que permitan medir su efecto en la retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y el rendimiento de cultivos agrícolas. Este enfoque práctico podría aportar evidencia adicional sobre el papel del biochar como una herramienta sostenible para mejorar la calidad de los suelos y la productividad agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aslam, M., Ahmed, S., Saleem, M., Sadar, R., Shah, A., Sidiqqi, M., & Shabbir, Z. (2023). Mitigation of chromium-induced phytotoxicity in 28-homobrassinolide treated *Trigonella corniculata* L. by modulation of oxidative biomarkers and antioxidant system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.
- Bacio Barrera, L. (2007). *Optimización multi-objetivo en el problema de metodología de superficie multi-respuesta. Tesis para obtener el grado de Maestría en ciencia con especialidad en probabilidad y estadística. CIMAT. Repositorio Institucional.* [https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/69/2/TE%20221.pdf](https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/69/2/TE%2020221.pdf)
- Barra Galárraga, R. (2010). *Diseño de un fotobiorreactor industrial para el cultivo de espirulina (Arthrospira platensis). Informe previo a la obtención del título de Acuicultor. Escuela Superior Politécnica del Litoral . Repositorio Institucional.* <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24663/1/D-61528%20Barra%20Galarraga.pdf>
- Bustamante García , V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz , J., Corral Rivas, J., & Hernández Díaz, J. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales*.
- Camacho Ayala , T. X. (2017). *Obtención de un hidrolizado de Spirulina (Arthrospira platensis) en polvo, mediante secado por aspersión, como ingrediente funcional. Trabajo de Titulación para la obtención del título de ingeniero Bioquímico. Universidad Técnica de Ambato. Repositorio Institucional.* <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/25303/1/BQ%20118.pdf>
- Castillo López, G., Salas Cisneros, P., Logroño Velez, M., & Vinuesa Veloz, M. (2021). Hexavalent Chromium in Waters for Human Consumption and Irrigation en the Guano. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*
- Chalermthai , B., Nootong, K., Olsen , B., Assabumrungrat, S., & Charoensuppanimit , P. (2024). Cradle-to-gate life cycle assessment of Spirulina bioplastic produced via plasticization with glycerol. *Environmental Research*.

- Chun-Yen, C., Pei-Chun, K., Chia-Jung, T., Duu-Jong, L., & Jo-Shu, C. (2013). Engineering strategies for simultaneous enhancement of C-phycoyanin production and CO₂ fixation with *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology*, 307-312.
- Colorado Gómez , M., & Moreno Tirado , D. (2017). Economics of Natural Resources from the Production of *Spirulina* (*Arthrospira maxima*) in Photobioreactors, La Guajira, Colombia. *Revista RETO*(50-59).
- Cruz Woo, G. (2022). *Manual para el cultivo artesanal de espirulina (Arthrospira spp.) en San Salvador Atenco, México. Grado de Licenciado en Biología. Universidad Autónoma Metropolitana.* Repositorio Institucional. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/26746/1/250170.pdf>
- Cuatle Hernández , V., Mendoza Patiño, L., Minto Rojas, M., Gil Mota , S., Anacleto Jiménez , N., Vázquez Contreras , M., . . . Pérez Osorio , G. (2021). Applications of Biorremediation. *Revista Latinoamericana el Ambiente y Las Ciencias* , 12(31), 62-75.
- Duarte Cuesta , J., & Játiva Carofalo, C. (2023). *Producción de espirulina (Arthrospira Platensis) y copirólisis de su biomasa con raquis de plátano para la obtención de biofuel. Estudio de caso previo a la obtención del título de ingeniero en biotecnología. Univerdad estta.*
- Elwakil, B., Eskandrani, A., El-Kady , H., Shahin, Y., & Awaad, A. (2024). *Spirulina platensis as a super prebiotic to enhance the antibacterial effect of Lactobacillus casei. South African Journal of Botany*, 417-429.
- Enriquez, V., & Layana, E. (2021). *Evaluación de la contaminación de actividades de curtiembre con énfasis en cromo hexavalente, en el Río Pichaví [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].* <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11495>
- García Montero , R., Pizarro Medina , P., Rodríguez Rastroero, M., Sierra Herraíz, J., Guirado Torres , M., & Gómez Millan, R. (2021). Biochar y sus aplicaciones potenciales en el suelo. *Técnica Industrial*(44-53). <https://doi.org/10.23800/10503>

- García Montero, R., Pizarro Medina, P., Rodríguez Rastrero, M., Sierra Heraíz, M. J., Guirado Torres, M., & Millán Gómez, R. (2021). Biochar y sus aplicaciones potenciales en el suelo. *Técnica Industrial*, 44-53.
- Gosgot Angeles, W., Rivera López, R., Rascón, J., Barrena Gurbillón, M., Ordinola Ramirez, C., Oliva, M., & Montenegro Santillan, Y. (2021). Energy valorization of organic waste through pyrolysis. *Revista de investigación agroproducción sustentable*, 26-36.
- Guevara Salinas, G., & Odar Ruiz, M. (2023). *Producción de biochar de residuos lignocelulósicos y su efecto en las propiedades y uso en suelos degradados. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Ambiental. Univerdidad César Vallejo. Repositorio Insitucional.*
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/128451/Guevara_SGM-Odar_RM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guillen, M. J., Calvillo Femat, A., Mosqueda Esparza, J., Rodríguez Hernández, A., & Jaramillo Gonzáles, F. (2020). Spirulina a nutritional supplement as a possible alternative in weight control. A study with Wistar rats. *Journal of the Selva Andina Research Society*.
- Gupta, A., Siwach, C., & Kumar Mishra, V. (2024). Revolutionizing remediation: Unveiling the power of *Lysinibacillus* sp. in tackling heavy metal stress. *Sustainable Chemistry for the Environment*.
- Hernandez-Perez, A., & Labbe, J. (2014). Microalgas, cultivos y beneficios. *Revista Biologica Marina Oceanografica*, 157-173.
- Jacome Pilco, C., Ballesteros, C., Rea, E., Rea Cayambe, L. M., & Poma Villafuerte, P. C. (2021). Microalgas in the treatment of wastewater from the curtiembres industry. *Ciencia y Tecnologia UTEQ*, 47-55.
- Jiang, X., Liu, Y., Yin, X., Deng, Z., Zhang, S., Ma, C., & Wang, L. (2023). Efficient removal of chromium by a novel biochar-microalga complex: Mechanism and performance. *Environmental Technology & Innovation*.
- Jiménez Careaga, M. (2015). Superficies de Respuesta mediante un Diseño Central Compuesto. *Revista Varianza*, 31-36.

- Klug, M. (2012). Pirolisis un proceso para derretir la biomasa . *Revista de Quimica PUCP*.
- Manzoni Moroneze, M., Montenegro Herrera, C., & Martínez Jiménez, A. (2021). Insights into microalgae culture systems: A critical review. *BioTecnologia*.
- Masqsood, T., Dai, J., Zhang, Y., Guang, M., & Li, B. (2021). Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.
- Mejía Madrigal, S., & Upegui Sosa, S. (2021). Pyrolysis and other methods of using tyre waste as an energy source for industry. A review. *Cuaderno Activa* , 40-60.
- Melnic, S., Prodius, D., Simmons , C., Zozim, L., Chiriac, T., Bulimaga, V., . . . Turta , C. (2011). Biotechnological application of homo- and heterotrivalent iron(III) furoates for cultivation of iron-enriched Spirulina. *Inorganica Chimica Acta*, 167-172.
- Meneses , Y., Patiño, P., & Betancur, J. (2019). Removal of chromium in industrial wastewater using biomass of Spirulina sp, primary sedimentation and chemical precipitation. *Revista de Investigacion Agraria y Ambiental*.
- Meneses Barroso, Y. M., Patiño Mantilla, P. A., & Betancur, J. F. (2018). Removal of chromium in industrial wastewater using biomass of Spirulina sp, primary sedimentation and chemical precipitation. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*.
- Minitab. (2024). *¿Qué son los diseños de superficie de respuesta, los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken?* Retrieved 18 de Octubre de 2024, from support.minitab: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/>
- Mohanty, S., Benya, A., Hota, S., Santhosh Kumar, M., & Singh, S. (2023). Eco-toxicity of hexavalent chromium and its adverse impact on environment and human health in Sukinda Valley of India: A review on pollution and prevention strategies. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 46-54.
- Muñoz Puetate, F., Pineda Insuasti, J., Barrigas Revelo, D., & Pineda Soto, C. (2021). Production of spirulina (*Arthrospira platensis*): a review . *Revista Biorrefinería*.

- Muñoz Ríos , S., Rey Hernández , L., Acuña Rodríguez , K., Acuña Llanes , Á., & Gómez Jaimes, F. (2024). Biochar production from palm kernel shell, coffee husk and bovine rumen content via pyrolysis and its use in the removal of methylene blue from aqueous solution. *Innovaciencia* , 12(1).
- Muñoz Vélez , M. (2021). Efecto del biochar y fertilizantes sobre las propiedades físicoquímicas del suelo, desarrollo radical y componentes de rendimiento en arroz. Informe de trabajo de Titulación. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. *Repositorio Institucional*.
- Myung, E., Kim, H., Choi , N., & Cho , K. (2024). The biochar derived from *Spirulina platensis* for the adsorption of Pb and Zn and enhancing the soil physicochemical properties. *Chemosphere*, 364.
- Papa , A., Bartolucci, L., Cornider, S., Di Carlo, A., Mele, P., Molune, V., & Vitale, A. (2024). The effect of pyrolysis temperature on the optimal conversion of residual biomass to clean syngas through fast-pyrolysis/steam gasification integration. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Peretti Minello, L., Goettems Kuntzler, S., Lamb, T., de Oliveira Neves , C., Berghahn, E., Pena da Pascho, J., . . . Sperotto, R. (2024). Rice plants treated with biochar derived from *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) optimize resource allocation towards seed production. *Frontiers in Plant Science*.
- Pérez Romero, C. I., & Arrendondo Vega, B. O. (2023). From the aztec tecuitlatl to *Spirulina*: a biotechnological resource. *Recursos Naturales y Sociedad*, 91-106.
- Piloni, R., Fontes Coelho, L., Sass, D., Lanteri, M., Zaghete Bertochi, M., Moyano , L., & Contiero, J. (2021). Biochars from *Spirulina* as an alternative material in the purification of lactic acid from a fermentation broth. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4.
- Quites Larrosa, A., Arcos Comitre, A., Pinto , L., & Barreto Vaz, L. (2015). EFEITO DA RUPTURA CELULAR EM DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM NO CONTEÚDO DE FICOCIANINA DA ARTHROSPIRA (SPIRULINA). XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados.

https://www.researchgate.net/publication/301419385_EFEITO_DA_RUPTURA_CELULAR_EM_DIFERENTES_METODOS_DE_SECAGEM_NO_CONTEUDO_DE_FICOCIANINA_DA_ARTHROSPIRA_SPIRULINA

Qureshi, F., Ashraf, M., Rasheed, R., Hussain, I., Rizwan, M., Iqbal, M., & Hong Yong, J. (2024). Microbial-assisted alleviation of chromium toxicity in plants: A critical review. *Plant Stress*.

Qureshi, F., Ashraf, M., Rasheed, R., Hussain, I., Rizwan, M., Iqbal, M., & Hong Yong, J. W. (2024). Microbial-assisted alleviation of chromium toxicity in plants: A critical review. *Plant Stress*.

Rezaei, H. (2016). Biosorption of chromium by using Spirulina sp. *Arabian Journal of Chemistry*, 846-853.

Rhenals Hoyos, J. (2024). *EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR POR MEDIO DE PIRÓLISIS. Trabajo titulación para la obtención del título de Magister Ingeniería Mecánica. Universidad de Córdoba. Repositorio Institucional.* <https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/14cd02e2-219d-49b3-a459-c5d576fdee4f/content>

Riera, L., Rumiguano, C., Sisa, J., Jacome, C., & Garcia, I. (2022). Biorremediación de aguas residuales agroindustriales mediante el cultivo de Spirulina SP y biomasa utilizada como suplemento alimenticio para animales. *Studies in Environmental and Animal Sciences*, 596-615.

Saha, N., Klinger, J., Bhattacharjee, T., Xia, Y., Thompson, V., Oyedeji, O., . . . Xu, Y. (2024). The effect of air separations on fast pyrolysis products for forest residue feedstocks. *Fuel*.

Sánchez, J., Loaña, J., Agualongo, M., & Espinoza, K. (2020). Cultivation techniques and methods of extraction of fatty acids based on microalgae for the benefit of humanity. *Agroindustrial Science*, 319-328.

Sandoval Simbaña, D. C. (2017). *EVALUACION DEL CRECIMIENTO DE ESPIRULINA (Arthrospira platenis) MEDIANTE ALTERNATIVAS DE FERTILIZACIÓN ORGÁNICA E INORGÁNICA Y SU MASIFICACIÓN EN CONDICIONES DE CAMPO*

DE LA HDA. EL PRADO. TESIS DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS. Repositorio institucional.
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14508/1/T-IASA%20I-005379.pdf>

Santiesteban Torres, Y. (2021). Fotobioreactors for microalgae *Chlorella vulgaris* culture. *Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura*.

Shamosh Halabe , S. (2009). *HISTORIA, NUTRICIÓN, SALUD Y ECOLOGÍA PARA GENERAR ESTRATEGIAS SOBRE LA ESPIRULINA. TRABAJO FIANL DE TITULACIÓN. UIVERSIDAD AUTONOMA NACIONAL DE MEXICO*. Repositorio Institucional.
https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000646229/3/0646229_A1.pdf

Shruthi, s., & Hemavathy, R. (2024). Myco-remediation of Chromium heavy metal from industrial wastewater: a review. *Toxicology Reports*.

Silva, M., & Salinas Morales , D. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*.

Silvia, M. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *UIsrael*.

Sisalema , D. A., & Zambrano, K. S. (2023). *Implementación de un sistema de cultivos automático de microalgas. Trabajo de titulación previo a la obtención el título de Ingeniero Mecatrónica. Universidad Politécnica Salesiana*. Repositorio Institucional.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/25772/1/UPS-GT004502.pdf>

Soto Muñoz , G., Chin Pampillo, J., Chinchilla Soto, C., & Pérez Villanueva , M. (2023). Manual de biocarbón para una agricultura sostenible. Experiencias en Costa Rica. *Centro de Investigación en Contaminación Ambiental*.

Soudani, A., Gholami, A., Mohammadi Roozbahani, M., Sabzalipour, S., & Mojiri, A. (2024). *Cyperus longus* to bioremediate heavy metals in aqueous solutions. *Green Analytical Chemistry*.

Suarez, S., & Molina, E. (2014). El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*.

Tan, H., Lee, C., Ong, P., Wong, K., Bong, C., Li, C., & Gao, Y. (2021). A Review On The Comparison Between Slow Pyrolysis And Fast Pyrolysis On The Quality Of Lignocellulosic And LigninBased Biochar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

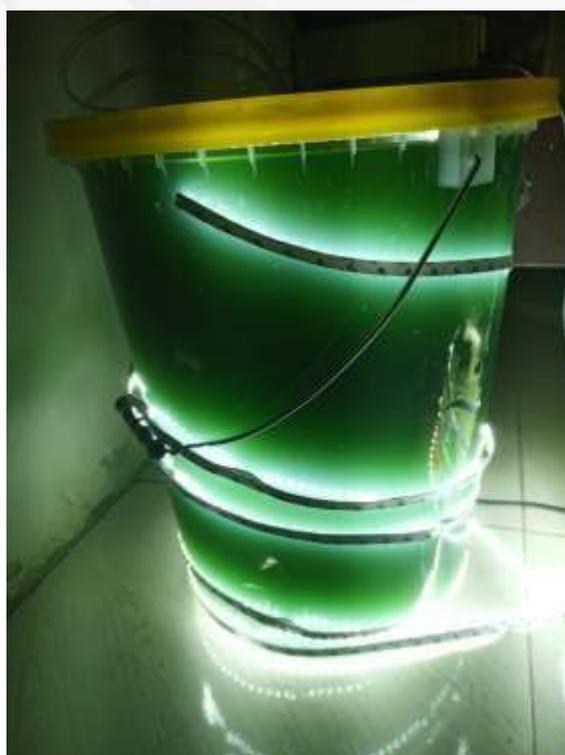
Yuhua , D., & Fan, S. (2014). Bioreactor design for algal growth as a sustainable energy source. *Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology*.

Zhang, M., Song, G., Gelardi, D., Huang, L., Khan, E., Masek, O., . . . Sik Ok, Y. (2020). Evaluating biocharand its modifications for the removal of ammonium, nitrate, and phosphate in water. *Water Research*.

ANEXOS

ANEXO A: ELABORACIÓN DE FOTOBIORREACTOR





ANEXO B: COSECHA DE ESPIRULINA





ANEXO C: SECADO DE ESPIRULINA





ANEXO D: OBTENCIÓN DE PIRÓLISIS



