

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

FACULTAD DE POSGRADO

INFORME DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGIA

TEMA:

Producción de biochar a partir de *Chlorella Vulgaris*
mediante pirolisis: Un enfoque bibliométrico.

AUTOR:

Soraya Pérez Barreto

Director:

Ing. Diego Barzallo PhD.

Milagro, 2024

Derechos de Autor

Sr. Dr.

Fabricio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, **Angela Soraya Pérez Barreto**, 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 **Promoción del desarrollo económico**, 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, 31 de octubre del 2024



Escaneado y certificado digitalmente por:
ANGELA SORAYA PEREZ
BARRETO

Angela Soraya Pérez Barreto
C.I.: 0704180652

Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación

Yo, **Barzallo Granizo Diego Geovanny**, en mi calidad de tutor del trabajo de titulación, elaborado por **Angela Soraya Pérez Barreto**, cuyo tema es **Producción y utilización de biochar a partir de *chlorella vulgaris* mediante Pirolisis: Un enfoque bibliométrico**, que aporta a la Línea de Investigación: Promoción del Desarrollo económico, previo a la obtención del Grado **Magíster 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, 31 de octubre del 2024



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

Diego Geovanny Barzallo Granizo
C.I.:0603923095

Certificación de defensa



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 **BQF. PEREZ BARRETO ANGELA SORAYA**, otorga al presente proyecto de investigación denominado "PRODUCCIÓN DE BIOCHAR A PARTIR DE CHLORELLA VULGARIS MEDIANTE PIROLISIS: UN ENFOQUE BIBLIOMÉTRICO ", las siguientes calificaciones:

TRABAJO ESCRITO	57.30
SUSTENTACIÓN	36.71
PROMEDIO	94.01
EQUIVALENTE	Muy Bueno



Presente al tribunal calificador por:
JOSE HUMBERTO VERA
RODRIGUEZ

Msc. VERA RODRIGUEZ JOSE HUMBERTO
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Presente al tribunal calificador por:
MARIA FERNANDA
GARCÉS MONCAYO

Msc GARCÉS MONCAYO MARÍA FERNANDA
VOCAL



Presente al tribunal calificador por:
YESSENIA BEATRIZ
SARANGO ORTEGA

Msc SARANGO ORTEGA YESSENIA BEATRIZ
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

A Dios por brindarme salud, sabiduría y fuerza para poder sobresalir y superarme día a día en este mundo adverso.

A mis Hijos Carla Melina y Omar Andrés, sol de mis días, la alegría en mi alma y quienes han sido mi roca en momentos difíciles.

A mis padres y hermano, mi refugio, junto a ustedes la vida es más liviana.

SORAYA PÉREZ BARRETO

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por haberme acompañado y guiado para culminar este proyecto, por no dejarme claudicar y mantenerme firme.

A la bendición más grande de mi vida mis HIJOS, mis PADRES y HERMANO.

De la misma manera agradezco a la Universidad Estatal de Milagro, por abrirme las puertas y permitirme seguir mis estudios de posgrado, a cada uno de mis profesores por sus conocimientos brindados. A mi tutor Dr. Diego Barzallo, por su guía y paciencia.

SORAYA PÉREZ BARRETO

Resumen

El biocarbón es uno de los materiales más ecológicos y rentables que ha demostrado potencial y propiedades para aplicaciones en diversas áreas. Por lo tanto, en los últimos años se han realizado varios estudios, cubriendo varios aspectos de la producción, propiedades y aplicaciones del biocarbón, la eficiencia del biocarbón depende de las condiciones de pirólisis y de la naturaleza de la biomasa, también se espera que el desarrollo se centre en perfeccionar sus propiedades tanto el medio ambiente como el agronómico.

Este estudio se centra en el análisis bibliométrico para realizar una revisión exhaustiva del campo de investigación en la última década (2014-2024), destacando su relevancia y evolución en la literatura científica. El objetivo principal es examinar el desarrollo y la tendencia de la investigación sobre la producción y utilización del biocarbón. Se utilizarán bases de datos académicos como *web science* y *scopus* y herramientas bibliométricas como *VOSviewer* y *Bibliometrix* para analizar las publicaciones relevantes, identificando patrones de colaboración, fuentes de financiamiento y áreas geográficas de mayor producción científica. Se evaluarán indicadores bibliométricos clave, como el número de publicaciones, citas recibidas y el índice de los autores más influyentes en este campo. Adicionalmente se realizará un análisis de contenido de las publicaciones seleccionadas para determinar que los estudios sobre la producción de Biochar han demostrado un aumento significativo en las publicaciones en los últimos años; esto refleja el creciente interés en el uso de la biomasa renovable y soluciones sostenibles para la remediación ambiental. Los resultados de este análisis bibliométrico proporcionarán una visión integral de la viabilidad y eficacia de la producción y utilización de biochar a partir de *chlorella vulgaris*. Asimismo, se espera que este estudio identifique vacíos en la literatura y áreas emergentes de investigación, ofreciendo una base sólida para futuras investigaciones en la mejora de la remediación ambiental.

Palabras Clave: *Biochar*, *Chlorella vulgaris*, *Pirólisis*, *Biorremediación*, Estudio Bibliométrico.

Abstract

Biochar is one of the most environmentally friendly and cost-effective materials that has shown potential and properties for applications in various areas. Therefore, several studies have been conducted in recent years, covering various aspects of biochar production, properties and applications, the efficiency of biochar depends on the pyrolysis conditions and the nature of the biomass, development is also expected to focus on refining its properties both environmental and agronomic.

This study focuses on bibliometric analysis to conduct a comprehensive review of the research field in the last decade (2014-2024), highlighting its relevance and evolution in scientific literature. The main objective is to examine the development and trend of research on biochar production and utilization. Academic databases such as web science and scopus and bibliometric tools such as VOSviewer and Bibliometrix will be used to analyze relevant publications, identifying collaboration patterns, funding sources, and geographic areas of greatest scientific production. Key bibliometric indicators will be evaluated, such as the number of publications, citations received and the index of the most influential authors in this field. Additionally, a content analysis of the selected publications will be performed to determine that studies on biochar production have shown a significant increase in publications in recent years; this reflects the growing interest in the use of renewable biomass and sustainable solutions for environmental remediation. The results of this bibliometric analysis will provide a comprehensive view of the feasibility and effectiveness of biochar production and utilization from *Chlorella vulgaris*. Furthermore, this study is expected to identify gaps in the literature and emerging areas of research, offering a solid foundation for future research in improving environmental remediation.

Keywords: Biochar, *Chlorella vulgaris*, Pyrolysis, Bioremediation, Bibliometric Study

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. Composición química de <i>Chlorella Vulgaris</i>	40
TABLA 2. Características de la población en estudio.....	64
TABLA 3. Descripción de la población y la implementación del estudio para una revisión bibliométrica relacionadas con la producción y utilización de biochar a partir de <i>Chlorella vulgaris</i> por pirolisis.....	65
TABLA 4. Aspectos esenciales que se deben considerar para delimitar la población.....	66
TABLA 5. Criterios de inclusión y exclusión utilizados para seleccionar las poblaciones científicas en la revisión bibliométrica	67

LISTA DE GRAFICOS

GRAFICO 1. Montaje experimentales de los medios para el cultivo de microalgas.....	31
GRAFICO 2. Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar... ..	35
GRAFICO 3. Ilustración de obtención de biochar por pirolisis... ..	38
GRAFICO 4. Morfología de <i>Chlorella vulgaris</i>	39
GRAFICO 5. Varios usos del Biocarbón.....	53
GRAFICO 6. (a) Los efectos de varias adiciones de biocarbón sobre la tasa máxima de producción de hidrógeno y el tiempo de retraso se presentan en; Figura 6 (b) los resultados del Análisis de Componentes Principales (PCA)....	56
GRAFICO 7. Evaluación de la capacitancia especifica de la membrana de la cáscara de huevo, obtenida a partir de carbonos.....	57
GRAFICO 8. Usos del biocarbón para la mejora del suelo... ..	59
GRAFICO 9. Resumen principal de los documentos revisados... ..	71
GRAFICO 10. Relación entre artículos científicos mediante frecuencia de palabras claves. (2019-2022)....	72
GRAFICO 11. Autores y Colaboraciones temporales de sus artículos durante el periodo 2016-2024.....	73
GRAFICO 12. Mapa de palabras claves sobre las interacciones entre bacterias y otros microorganismos.....	74
GRAFICO 13. Estudios realizados en diferentes países... ..	76
GRAFICO 14. Enfoque temático en la producción y aplicaciones de biocarbón	77
GRAFICO 15. Producción científica de cada país... ..	80
GRAFICO 16. Mapa de colaboración entre países.....	82

Índice / Sumario

Aprobación del director del trabajo de titulación	3
Aprobación del Tribunal Calificador.....	4
Dedicatoria.....	5
Agradecimiento	6
Resumen.....	7
Abstrac... ..	8
Índice de Tablas... ..	9
Lista de Gráficos.....	10
Tabla de Contenido.....	11
Introducción	15
CAPITULO 1. El problema de la Investigación.....	19
1.1 Planteamiento del Problema.....	19
1.2 Delimitación del Problema.....	20
1.3 Formulación del Problema.....	20
1.4 Preguntas de Investigación	20
1.5 Objetivos... ..	21
1.5.1. Objetivo General.....	21

1.5.2. Objetivos Específicos.....	22
1.6. Hipótesis.....	22
1.7. Justificación.....	22
1.8. Declaración de las Variables.....	23
CAPITULO 2. Marco Teórico Referencial.....	25
2.1. Antecedentes Referenciales.....	25
2.2. Biochar – Características físicas-químicas.....	29
2.3. Procesos de Fabricación de Biochar.....	31
2.4. Propiedades del Biochar.....	32
2.5. Aplicaciones del Biochar.....	33
2.5.1. Mejora del Suelo.....	33
2.5.2. Remediación Ambiental.....	33
2.6. Procesos para obtener Biocarbón.....	34
2.6.1. Pirolisis.....	34
2.7. Chlorella Vulgaris.....	38
2.7.1. Composición Química.....	40

2.7.2. Factores que influyen en el crecimiento.....	43
2.7.3. Ciclo de Vida y Crecimiento	47
2.7.4. Condiciones de Crecimiento	47
2.7.5. Composición Química.....	48
2.7.6. Aplicaciones Biotecnológicas.....	48
2.7.7. Producción de Biomasa.....	49
2.8. Biocarbón derivado de Algas y Microalgas Chlorella Vulgaris. Un enfoque sostenible para el tratamiento de Aguas.....	49
2.9. Algunas Aplicaciones del Biocarbón.....	53
2.9.1. Uso en la producción y almacenamiento de Hidrogeno	53
2.9.2. Uso en supercondensadores.....	56
2.9.3. Adsorción de metales pesados mediante biocarbón	58
2.9.4. Biocarbón para la enmienda del suelo.....	58
2.9.5. Adsorción de Fosforo y H ₂ S	59
2.9.6. Eliminación por adsorción de compuestos orgánicos volátiles del aire	59
2.9.7. Catalizador – producción energía	60
2.10. Economía de la producción de biocarbón y potencial de los bonos verdes como fuente de financiación.....	61

CAPITULO 3. Diseño Metodológico.....	63
3.1. Tipo y diseño de Investigación.....	63
3.1.1. Tipo de Investigación.....	63
3.1.2. Diseño de Investigación.....	63
3.2. Identificación de la Población y la Muestra.....	64
3.2.1. Población.....	64
3.2.2. Muestra.....	64
3.2.3. Tipo de Muestra	66
3.2.4. Tamaño de la Muestra	67
3.2.5. Proceso de selección de la Muestra	68
3.2.5.1. Criterios de Inclusión.....	68
3.2.5.2. Criterios de Exclusión	68
3.3. Métodos y Técnicas.....	69
3.4. Procesamiento Estadístico de la Información.....	69
CAPITULO 4. Análisis e Interpretación de Resultados.....	71
4.1 Análisis de Resultados.....	71

CAPITULO 5. Conclusiones y Recomendaciones.....	86
5.1. Conclusiones.....	86
5.2. Recomendaciones.....	87
 BIBLIOGRAFIA.....	 89

Introducción

La producción y utilización del biochar ha generado significativa atención en los últimos años debido a su potencial como enmienda del suelo, mitigador de gases de efecto invernadero y agente adsorbente para la remediación de contaminantes. El biochar es un material carbonoso obtenido a través de la pirolisis de biomasa, un proceso termoquímico en el que la materia orgánica es calentada en ausencia o con mínima presencia de oxígeno. Dependiendo de las condiciones de temperatura, tiempo de residencia y tiempo de biomasa utilizada, el biocarbón resultante puede variar en sus propiedades fisicoquímicas, lo que a su vez determina su funcionalidad en diferentes áreas.

El biocarbón se produce principalmente a partir de materiales vegetales como residuos agrícolas, algas, madera o estiércol, que se someten a pirolisis a temperaturas generalmente entre 300°C y 700°C. Durante el proceso, la biomasa se descompone en biochar, gases y líquidos (bioaceite). Los parámetros del proceso de pirolisis, como la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia, juegan un papel crucial en las características del biocarbón resultante. A bajas temperaturas, el biocarbón tiende a tener una mayor porosidad y una estructura interna más compleja, lo que le otorga una mayor capacidad de adsorción. A temperaturas más altas, el biochar se vuelve más rico en carbono y más estable químicamente, lo que mejora su capacidad para actuar como un sumidero de carbono a largo plazo. Este equilibrio entre las propiedades fisicoquímicas del biochar puede ser optimizado según la aplicación deseada, ya sea para la mejora del suelo, la adsorción de contaminantes o su uso como material industrial.

La *Chlorella vulgaris* es una microalga verde unicelular conocida por su alta capacidad de crecimiento y su riqueza en proteínas, lípidos, y otros nutrientes. En las últimas

décadas, el interés en las microalgas ha crecido debido a su potencial en diversas aplicaciones, incluyendo la producción de biochar.

El uso de *Chlorella vulgaris* para producir biochar ofrece varias ventajas. En primer lugar, *Chlorella vulgaris* tiene una alta tasa de crecimiento y un bajo costo de cultivo en comparación con otras fuentes de biomasa. Además, esta microalga puede ser cultivada en sistemas de recirculación de agua, lo que reduce el impacto ambiental asociado con su cultivo.

Este proceso se alinea con las tendencias actuales hacia la sostenibilidad y la economía circular, donde los residuos se valoran como recursos y se buscan soluciones innovadoras para problemas ambientales. La investigación en la producción de biochar a partir de *Chlorella vulgaris* podría contribuir significativamente a estas áreas, proporcionando una forma eficiente de manejar residuos algales y ofrecer soluciones para la contaminación ambiental.

En este contexto, ***chlorella vulgaris*** una microalga ampliamente estudiada por su capacidad para capturar nutrientes y contaminantes del agua se presenta como una materia prima prometedora para la producción de biochar.

Es por esto que surge la necesidad de realizar un estudio bibliométrico que analice las tendencias en los estudios sobre la producción de biochar a partir de *Chlorella vulgaris*, el cual no solo permitirá revisar el estado actual de la investigación, sino además identificar algunas oportunidades para futuras investigaciones que logren contribuir a mejorar las estrategias de producción de biochar a partir de *Chlorella Vulgaris*; para profundizar en este se realizó un análisis bibliométrico de la literatura científica relevante. Este análisis se centró en la identificación de tendencias de investigación, se utilizaron bases de datos como Web of Science y Scopus para recopilar publicaciones científicas sobre el tema. Se emplearon términos de búsqueda

específicos como "obtención de biochar por pirolisis", "generación de biomasa a partir de *Chlorella vulgaris*". La información recopilada se analizó utilizando herramientas bibliométricas, como VOSviewer y Bibliometrix, para visualizar redes de coautoría, concitación y palabras clave.

Este estudio bibliométrico consta de los capítulos que se describen a continuación.

Capítulo I: Se empieza con el planteamiento del problema que es parte fundamental de la determinación y establecimiento de la temática central, formulación de este de forma clara y breve, además de preguntas directrices que facilitan la guía para el planteamiento de objetivos y justificación donde se destaca la importancia del tema.

Capítulo II: Donde se incluyen los antecedentes, investigaciones referentes con el tema planteado seguido de un marco teórico fundamentado en la clasificación de variables, con hipótesis que instauran la formulación del problema y sistema de variables.

Capítulo III: Es el marco metodológico en el que se muestra los métodos de la investigación, y matriz de operacionalización de variables, declarado de manera argumentativa.

Capítulo IV: Se señalan los resultados conseguidos en la investigación, presentados en gráficos y tablas, para su ulterior análisis y discusión.

Capítulo V: Que incluyen las conclusiones y recomendaciones, formadas en base de los resultados obtenidos, objetivos planteados y realidad del tema investigado, además se exponen las recomendaciones.

CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación

1.1. Planteamiento del problema

La creciente preocupación por la contaminación ambiental y el cambio climático ha llevado a la búsqueda de soluciones sostenibles en la gestión de residuos y la mejora de la calidad del suelo. En este contexto, el biochar es un material carbonoso obtenido a partir de la pirólisis de biomasa, se han destacado sus múltiples beneficios, incluyendo la mejora de la fertilidad del suelo, la retención de agua y la capacidad de adsorción de contaminantes.

Actualmente, las tecnologías convencionales para la remoción de metales pesados en soluciones acuosas, como la precipitación química, la adsorción con carbón activado y la reducción química, presentan limitaciones en términos de costo, eficiencia y sostenibilidad. Además, estas tecnologías a menudo no son efectivas a bajas concentraciones de ciertos metales o generan residuos secundarios que requieren una gestión adicional.

En ese marco, surge la necesidad de explorar métodos alternativos que sean más sostenibles y eficaces. La producción de biochar a partir de *Chlorella vulgaris* mediante pirólisis se presenta como una alternativa viable, dado que no solo aprovecha una fuente renovable de biomasa, sino que también produce un material adsorbente capaz de remover metales pesados de soluciones acuosas.

1.2. Delimitación del problema

La investigación en el ámbito de la producción y utilización del biochar derivado de *Chlorella Vulgaris*, una microalga reconocida por su rápido crecimiento y capacidad para absorber nutrientes y contaminantes del medio ambiente; tiene como objetivo

analizar características del biochar y su potencial en la remediación ambiental, como la mejora de la calidad del suelo y la mitigación de la contaminación.

Este análisis bibliométrico abordara las investigaciones y avances previos en este campo, proporcionando una visión integral de las estrategias y enfoques utilizados para abordar este importante tema en los desafíos ambientales.

1.3. Formulación del problema

Los problemas ambientales en la actualidad plantean desafíos importantes, especialmente en lo que respecta a la contaminación. Esta problemática ha impulsado la investigación hacia alternativas innovadoras para mejorar la problemática ambiental. Un análisis bibliométrico es esencial para obtener una visión clara del estado del arte en la investigación sobre el biochar de *Chlorella vulgaris*, identificando patrones y puntos críticos que podrían ser fundamentales para avanzar en la investigación aplicada. Este análisis proporcionara información sobre el impacto científico y las direcciones futuras para mejorar la eficiencia del biochar en la eliminación de contaminantes, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

1.4. Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son las primeras tendencias de investigación en la producción de biochar a partir de *Chlorella vulgaris*?
- ¿Cómo ha evolucionado el interés en esta área en términos de producción científica, colaboración entre investigadores y el impacto de las investigaciones?

- ¿Qué evidencia bibliográfica existe acerca de la producción y utilización del biochar a partir de *Chlorella vulgaris*?

Las interrogantes guiarán la búsqueda sistemática de información en bases de datos especializadas, permitiendo identificar y analizar la producción académica relacionada con este tema específico. El análisis bibliométrico resultante proporcionará una visión detallada de la evolución, los enfoques y las áreas de interés predominantes en la investigación sobre la producción y utilización de biochar.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva de la producción y utilización del biochar obtenido a partir de *Chlorella vulgaris* mediante pirólisis.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar la frecuencia y la distribución temporal de publicaciones científicas relacionadas con producción y utilización de biochar a partir de *Chlorella vulgaris* mediante pirolisis.
- Analizar la evolución de la investigación sobre biochar y *Chlorella vulgaris* y las tendencias de publicación a lo largo del tiempo.
- Identificar los temas principales relacionados con la producción de biochar y su utilización en la remediación ambiental, tratamiento de aguas y su impacto en la sostenibilidad a través de un análisis de palabras claves.

1.6. Hipótesis

El número de publicaciones relacionadas con la producción y utilización de biochar a partir de *Chlorella vulgaris* mediante hipótesis, ha aumentado considerablemente debido al creciente interés por soluciones sostenibles y la remediación ambiental.

1.7. Justificación

En la actualidad, existe una preocupación global por encontrar tecnologías sostenibles que mitiguen los efectos del cambio climático y la contaminación ambiental. La producción de biochar mediante pirolisis de microalgas, como *Chlorella vulgaris* ofrece una solución viable para la remediación de suelos y aguas contaminadas, al tiempo que contribuye a la economía circular.

A medida que la investigación sobre el biochar de microalgas ha crecido, es esencial realizar un análisis bibliométrico que sistematice el conocimiento actual. Este enfoque permite identificar tendencias clave, principales actores, áreas de mayor desarrollo y vacíos en la investigación. Esto facilita la planificación estratégica para futuras investigaciones y aplicaciones industriales.

El análisis bibliométrico de la producción y utilización de biochar a partir de *Chlorella vulgaris* no solo es justificado por la creciente relevancia de este tema para la sostenibilidad ambiental, sino también por su potencial para avanzar en el conocimiento científico y fomentar innovaciones tecnológicas en biotecnología y remediación ambiental.

Declaración de las variables (Operacionalización)

Hipótesis	Variable Independiente	Variable dependiente
<p>Un estudio bibliométrico permitirá analizar la producción científica relacionada con la producción y utilización de biochar a partir de <i>Chlorella vulgaris</i> mediante pirolisis a lo largo del tiempo.</p>	<p>Técnicas bibliométricas; metodología VOSviewer</p>	<p>Producción científica relacionada con la producción y utilización de biochar a partir de <i>Chlorella vulgaris</i> mediante pirolisis.</p>
<p>Un estudio bibliométrico permitirá identificar el uso prácticos del biochar producido a partir de <i>Chlorella vulgaris</i> (ej. remediación de suelos, tratamiento de aguas) y analizar su frecuencia de aparición en la literatura científica.</p>	<p>Técnicas bibliométricas; metodología VOSviewer</p>	<p>Estudio del uso de biochar producido a partir de <i>Chlorella vulgaris</i>.</p>
<p>Un estudio bibliométrico permitirá analizar las palabras claves y los temas abordados en las publicaciones para identificar las áreas de investigación más estudiadas y emergentes en el campo de producción y utilización del biochar a partir de <i>Chlorella vulgaris</i> mediante pirolisis.</p>	<p>Técnicas bibliométricas; metodología VOSviewer</p>	<p>Estudios sobre palabras clave asociados con la producción y utilización del biochar a partir de <i>Chlorella vulgaris</i> mediante pirolisis.</p>

CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial

2.1 Antecedentes Referenciales

Los problemas asociados con la disponibilidad de energía para satisfacer la creciente demanda, así como las preocupaciones por la contaminación ambiental, han aumentado la necesidad de desarrollar fuentes de energía más sostenibles, eficientes y ecológicas. Los materiales orgánicos que se obtienen de seres vivos o complejos de materiales inorgánicos u orgánicos se conocen colectivamente como biomasa. Además de estar compuesta por seres vivos como animales y plantas, la biomasa también incluye desechos de madera, lodos y excrementos de animales. **El biochar**, el biocombustible y el gas de síntesis se obtienen a través del proceso de descomposición termoquímica de materiales de biomasa. El producto líquido, que es el biocombustible, y el producto gaseoso, es decir, el gas de síntesis, se consideran combustibles alternativos a los combustibles fósiles tradicionales.

La biomasa se considera neutra en carbono ya que el CO₂ emitido por la biomasa se compensa a través de la fotosíntesis de la biomasa. También tiene un menor impacto adverso en la atmósfera debido a que tiene menos S y N, lo que resulta en menores emisiones de SO_x y NO_x en comparación con los combustibles fósiles. La biomasa se considera un recurso renovable, el más abundante en la Tierra, y su producción estimada a nivel mundial en 2016 fue de aproximadamente 2×10^{11} toneladas (bases de carbono seco). En vista de los numerosos beneficios potenciales y la disponibilidad de biomasa residual a nivel mundial, varios inversores y empresas emergentes han expresado interés en explorar el mercado del biocarbón en los últimos años. El biocarbón posee un gran potencial de uso y se puede utilizar en lugar del carbón

activado. Está atrayendo un uso cada vez mayor como resultado de su amplia disponibilidad, costo de producción relativamente menor y papel en la remediación del suelo. Debido a sus propiedades exclusivas, el biocarbón no solo remedia la contaminación específica del suelo; también mejora las propiedades del suelo. Mejora las propiedades físicas del suelo al mejorar su capacidad para retener agua, contenido de oxígeno y nivel de humedad. El biocarbón es rico en carbono y está formado por trazas de iones metálicos, diferentes grupos funcionales, es fácil de modificar, biocompatible y tiene una gran área superficial con una estructura porosa, la cual tiene aplicaciones en las áreas farmacéutica, agrícola, biorremediación, etc. En el estudio (Y. Lee. et al., 2020) los autores propusieron el uso de biocarbón de paja de arroz para la generación de sustancias químicas a partir del furano. Los catalizadores, que están respaldados por el biocarbón, mostraron la naturaleza de la reducibilidad y la dispersión del metal, lo que mejoró significativamente la conversión de biomasa. Investigadores como han indicado en sus estudios que el biocarbón diseñado puede utilizarse para eliminar productos como tintes, pesticidas, sustancias químicas que alteran el sistema endocrino y materiales orgánicos volátiles. Además, las aplicaciones del biocarbón pueden ayudar a mitigar el cambio climático a través del secuestro de carbono, también puede producir y almacenar bioenergía a través de la cogeneración de biocombustible y biogás durante la generación de biocarbón y sirve como catalizador para la generación de biodiésel. Otros estudios han revisado la producción y utilización del biocarbón. Por ejemplo, los siguientes estudios revisaron los métodos de adsorción de contaminantes por biocarbón, así como las características ambientales del biocarbón.

O'Connor et al. (2017), también revisaron el uso del biocarbón para remediar una tierra que está contaminada con metales pesados.

Además, Mishra y Mohanty (2023) revisaron los usos del biocarbón y los materiales basados en biocarbón, incluidos diferentes tipos de tecnologías de conversión y mecanismos de formación de biocarbón, en los sectores de almacenamiento y conversión de energía. Según su estudio, es necesaria una investigación exhaustiva para el análisis estructural y la separación, teniendo en cuenta tanto la evidencia microscópica como macroscópica del diseño estructural formado del biocarbón para aplicaciones particulares. En otros estudios examinaron la aplicación del biocarbón como catalizador para la reforma del alquitrán, haciendo hincapié en los últimos desarrollos experimentales en la evaluación del impacto de las condiciones de gasificación, la composición de la biomasa y las posibilidades de pretratamiento y postratamiento para mejorar la actividad catalítica. Zhu et al (2023), analizaron los nuevos usos del biocarbón en el área de factores técnicos, ambientales y financieros. Lu et al (2023), examinaron las propiedades mecánicas, hidrológicas y físicas de los suelos modificados con biocarbón, así como los procesos subyacentes. Su revisión concluye con un resumen sucinto de los requisitos y perspectivas para el desarrollo futuro, así como de los posibles efectos de las características de ingeniería en otros procesos del suelo. Además, realizó una revisión de los diferentes parámetros de proceso involucrados en la preparación de biocarbón relacionado con la pirólisis, su efecto en la producción de biocarbón y sus propiedades fisicoquímicas, y la optimización de estos parámetros de proceso.

Por último, Safarian (2023) revisó en su estudio una serie de métodos ambientales amigables para producir biocarbón, con énfasis en el análisis de desempeño. Estos métodos incluían gasificación, microondas, torrefacción, pirólisis rápida, lenta e intermedia, así como carbonización instantánea, gasificación y carbonización hidrotermal.

De manera similar, revisó en detalle los avances más recientes en la eliminación por adsorción de metales pesados de aguas residuales y agua utilizando biocarbón. Varios metales peligrosos, incluidos Cr, As y Mn, pueden eliminarse efectivamente del agua potable y las aguas subterráneas utilizando biocarbón. revisaron el impacto del CO₂ en la producción de biocarbón para aplicaciones industriales a través de la pirólisis lenta. Esto se debe a que el gas de combustión del CO₂ puede utilizarse como entorno de gas de pirólisis, lo que en última instancia puede mejorar la producción de biocarbón en términos de sus propiedades modificadas, sostenibilidad financiera e impacto en el medio ambiente.

Venkatachalam et al. (2023) revisaron los métodos de conversión termoquímica, activación y formas de mejorar la funcionalidad del biocarbón producido. Además, en la revisión se trataron las variaciones morfológicas del biocarbón activado y su importancia en las aplicaciones de energía electroquímica. En otro estudio, J Clean Prod, 408 (2023), realizó una revisión sistemática de acuerdo con las pautas de la Colaboración para la evidencia Ambiental para investigar la economía del biocarbón. Descubrieron que la viabilidad y la conveniencia de producir y utilizar biocarbón son muy erráticas y específicas de cada caso, y dependen de una serie de variables, entre ellas el cultivo, la materia prima, la ubicación, la escala de las condiciones de pirólisis, el costo del biocarbón y la posibilidad de internalizar externalidades, lo que impide la inversión privada.

Seow et al. (2022) revisaron cómo las tecnologías de carbonización modernas producen biocarbón a partir de diversos desechos de biomasa y sus posibles usos en la sostenibilidad. Se explicaron en detalle las diferentes fuentes de biomasa, los métodos de síntesis y los efectos de varias variables en el proceso de carbonización para producir biocarbón con propiedades fisicoquímicas diferenciadas.

Jeyasubramanian et al. (2021) realizaron un análisis del biocarbón, que abarca su creación, características, rango de usos, mecanismo de interacción y metodología computacional. Además, determinaron cómo las propiedades y los potenciales de aplicación del biocarbón se vieron afectados por la materia prima y las condiciones de preparación, incluido el tiempo de retención, la temperatura de pirólisis, los aditivos y el caudal de gas.

2.2 Biochar – Características físicas-químicas

El biocarbón es un sólido carbonoso, de color negro, con una superficie intrincada y desordenada, cuyas características estructurales varían por el tipo y tiempo de la pirólisis. En general es amorfo según estudios de microscopía electrónica de barrido realizados. El biocarbón está constituido por partículas de diferentes tamaños, lo que depende de la fuente y tamaño de la materia prima. Posee una alta porosidad con micro, meso y macro poros, cuyos tamaños van de <2 nm, 2-50 nm y >50 nm, respectivamente por lo cual lo han comparado con un “arrecife subterráneo” que puede ser hábitat para microorganismos. Los macro poros provienen de los espacios propios de la materia prima original y permiten el transporte rápido de sorbatos, para su posterior difusión en el volumen de microporos, ayudando al transporte de moléculas concentradas. Los microporos son generados en el proceso de pirólisis, por lo que al aumentar la temperatura aumenta la microporosidad, además generan más área de carga reactiva. Los microporos están asociados a la adsorción de compuestos líquidos, sólidos y de gases. Presenta muy baja densidad aparente, entre 0.30 a 0.43 g cm⁻³ como es el caso de biocarbones de diferentes tipos de madera producidos en diferentes tipos de hornos. En general presenta una alta área superficial, entre 200 y 400 m² g⁻¹ aunque también se han encontrado valores tan

bajos como 3.64 y 14.14 m² g⁻¹ para biocarbones producidos de pasta de semilla de cártamo prensado, bajo una atmósfera estática de nitrógeno. En otro estudio, dos biocarbones derivados de residuos de fábrica de papel generados bajo una pirólisis lenta, presentaron valores de 2.9 a 114.9 m² g⁻¹ (van Swieten *et al.*, 2010a). Ocasionalmente, han excedido los 1000 m² g⁻¹, lo cual es importante por el efecto que ello tiene sobre la capacidad de retener nutrientes y agua. Sin embargo, debe considerarse que el biocarbón experimenta cambios químicos y estructurales durante los procesos de “envejecimiento”, es decir, con el tiempo, lo que modifica sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

La composición química de los biocarbones es muy variable. Por ejemplo, un biocarbón producido a partir de roble blanco y rojo presentó 90.8% de carbono, 7.2% de oxígeno y 1.7% de hidrógeno. Mientras que un biocarbón de arroz y otro de trigo presentaron 80.7 y 80.4% de carbono, 9.11 y 9.03% de oxígeno y 2.79 y 2.75% de hidrógeno, respectivamente, lo que pone de manifiesto su amplia variabilidad. El nitrógeno de la biomasa original puede no estar realmente disponible. El fósforo generalmente es conservado durante la volatilización de moléculas orgánicas asociadas y está presente como cenizas dentro del biocarbón, y al solubilizarse queda disponible para las plantas. Estudios de caracterización de biocarbones han consignado reacciones donde el pH varía de ácido a alcalino, con una media de pH 8.1 y un intervalo de pH entre 6.2 y 13.

2.3 Procesos de Fabricación de Biochar

El biochar es el producto sólido resultante de la pirólisis de biomasa, caracterizado por su alto contenido de carbono y estructura porosa, lo que le otorga propiedades

únicas como material absorbente. La materia prima para la producción de biochar puede variar desde residuos agrícolas hasta algas y otros materiales orgánicos.



GRAFICO 1. Montajes experimentales de los medios para el cultivo de microalgas

MATERIAS PRIMAS

- Los materiales usados para elaborar biocarbón son muy numerosos. Sin embargo, no todos los residuos o subproductos son materias primas apropiadas para producirlo. Una de las características que deben ser prioritarias para su selección es que los materiales no deben competir con otros usos, principalmente si éstos generan productos de mayor valor económico que el biocarbón, o bien que compitan con la producción de alimentos y de bienes y servicios ambientales. Entre los materiales más citados en la literatura se tienen a los residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, desechos de papel, de arroz; los residuos de aceituna, desperdicios orgánicos de la vida urbana, madera, estiércol, hojas, residuos de cultivos, camas de aves, algas, cáscaras de naranja, de nueces, lodos residuales Microalgas: como *Chlorella vulgaris*. La transformación de estos últimos a biocarbón al menos asegura, la exclusión de gérmenes que pudiesen resultar nocivos para

los cultivos de consumo humano o animal. Esta transformación representa una alternativa al depósito de lodos residuales que se incrementará en el futuro cercano, en la medida en que en el país se construyan más plantas de tratamiento de aguas grises. La materia prima usada para elaborar los biocarbones y las reacciones químicas que ocurren en el proceso de pirólisis definen las características estructurales y químicas específicas para los biocarbones dando origen a materiales muy heterogéneos. Esto se debe a que los componentes orgánicos que conforman la biomasa original influyen directamente en las propiedades químicas y físicas del biocarbón formado, lo que define a su vez los efectos benéficos del biocarbón y su tiempo de residencia en el suelo.

2.4 Propiedades del biochar

Las propiedades del biochar dependen del tipo de biomasa y las condiciones de pirólisis. Las características principales son:

- Superficie específica: Una mayor temperatura de pirólisis generalmente aumenta la superficie específica del biochar, lo que favorece su capacidad de absorción.
- Porosidad: El biochar es altamente poroso, lo que le permite retener agua y nutrientes en aplicaciones de suelo.
- Estabilidad química: es resistente a la descomposición y puede durar en el suelo por cientos de años.
- Grupos funcionales: En su superficie puede tener grupos como carboxilos e hidroxilos, que favorecen la adsorción de contaminantes.

2.5 Aplicaciones del Biochar

El biochar tiene una amplia gama de aplicaciones que se pueden clasificar en áreas agrícolas, medioambientales y energéticas.

2.5.1 Mejora del suelo

- Aumenta la **retención de agua** y mejora la **estructura del suelo**.
- Facilita la **retención de nutrientes**, reduciendo la lixiviación de elementos como nitrógeno y fósforo.
- Actúa como **hábitat para microorganismos** benéficos, promoviendo la actividad microbiana del suelo.

2.5.2 Remediación ambiental

El biochar es altamente efectivo en la remoción de contaminantes del agua y el suelo, debido a su capacidad de adsorción. Puede eliminar: **Metales pesados**: Como plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd). **Contaminantes orgánicos**: Incluyendo pesticidas, compuestos aromáticos y colorantes industriales.

2.6 Procesos para obtener biocarbón

Éstos son diversos, principalmente se consideran las tecnologías termoquímicas para transformar la biomasa en fuentes de energía renovable. Éstas pueden ser clasificadas en cuatro categorías generales: pirólisis lenta, pirólisis rápida, pirólisis ultrarrápida y gasificación. La pirólisis ocurre en ausencia completa de oxígeno mientras que la gasificación se da con reducida cantidad de él, Brick en el año 2010 propone un quinto proceso que es la carbonización hidrotérmica.

2.6.1 Pirolisis

La pirólisis, es el proceso termoquímico usado para transformar biomasa y otros materiales orgánicos de baja densidad energética ($\sim 1.5 \text{ GJ m}^{-3}$) a: líquidos de alta densidad energética, conocidos como bio-aceites ($\sim 22 \text{ GJ m}^{-3}$ o $\sim 17 \text{ MJ kg}^{-1}$), a sólidos de alta densidad energética conocidos como biocarbón ($\sim 18 \text{ GJ kg}^{-1}$) y a un gas de relativamente baja densidad energética, conocido como gas de síntesis (syngas) ($\sim 6 \text{ MJ kg}^{-1}$). Fundamentalmente la pirólisis involucra el calentamiento de materiales orgánicos a temperaturas superiores a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ en ausencia de oxígeno. A estas temperaturas, los materiales se descomponen térmicamente, liberando una fase de vapor y generando una fase sólida residual (biocarbón). Si los vapores de la pirólisis son enfriados ocurre una condensación en compuestos líquidos polares y de alto peso molecular (bio-aceite), mientras que los compuestos volátiles de bajo peso molecular permanecen en la fase gaseosa (gas de síntesis o syngas). Las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la pirólisis son muy complejas y dependen tanto de la naturaleza de la biomasa como de las condiciones del reactor. Cuando se usa una tecnología de alta eficiencia es posible alcanzar rendimientos de masa alrededor del 30-40% (base húmeda), con producciones de energía de cerca del 30% (contenida en el carbón) y contenidos de carbono fijado arriba del 90% de la biomasa original. Las condiciones de pirólisis y las características de la materia prima (composición, distribución de tamaño de partícula y de tamaño de poro, entre otras), determinan en gran medida las propiedades físicas y químicas del carbón producido lo que apoya la conveniencia de hacer su aplicación en un suelo, registrar su comportamiento, transporte y destino en el ambiente

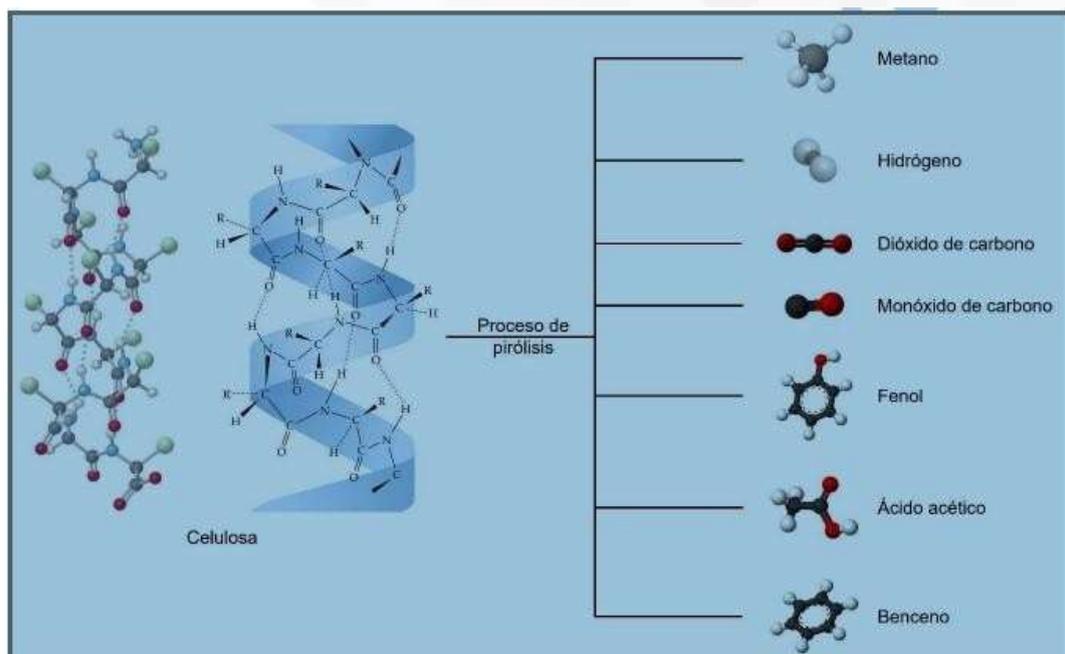


GRAFICO 2. Rompimiento de celulosa por pirólisis (Bridgwater,2012)

Pirólisis lenta. La pirólisis convencional o lenta se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa pausados, temperaturas bajas y largos tiempos de residencia de los sólidos y el gas. De acuerdo con el sistema, los lapsos de calentamientos son cerca de 0.1 a 2 °C por segundo y prevalecen las temperaturas alrededor de los 500 °C. El tiempo de residencia del gas puede ser mayor de 5 s, mientras que para la biomasa puede ser de minutos a días.

Pirólisis rápida. El calentamiento es mayor a 200 °C s⁻¹ y las temperaturas que prevalecen son usualmente mayores a los 550 °C. Debido al corto tiempo de residencia del vapor, los productos son de alta calidad, principalmente son líquidos, como los bioaceite y gases ricos en etileno que podrían ser usados para producir alcoholes o gasolina. La producción de carbón y alquitrán es mucho menor en este proceso. El tratamiento provoca la ruptura de los polímeros de los componentes de la biomasa en vapores condensables que forman bioaceite. Además, potencialmente

podría ser un método seguro de eliminación de materias primas contaminadas por toxinas.

Pirólisis ultrarrápida. La pirólisis ultrarrápida se caracteriza porque las temperaturas a las que se lleva a cabo el proceso son moderadas (400-600 °C) y las tasas de calentamiento son rápidas ($>2 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$). Los tiempos de residencia del vapor son usualmente menores a 2 s. En este sistema se produce considerablemente menos alquitrán y gas. Sin embargo, los productos aceitosos obtienen su máximo rendimiento (75 y 80%).

Variables que afectan la pirólisis

Diversas variables afectan el mecanismo y la cinética de las reacciones de pirólisis. Estas variables, incluyen la composición del sustrato, el intervalo de calentamiento, la temperatura y presión de la cama, atmósfera ambiental presente y uso de catalizadores, por lo que deben ser completamente comprendidas y apreciadas. Entre otras cosas, estas variables tienen un efecto profundo en la secuencia y cinética de las reacciones y, por tanto, en el rendimiento de los productos formados. Al entender la influencia de estas variables en el proceso, las condiciones de pirólisis pueden ser anticipadas y controladas para reducir las reacciones secundarias no deseadas y promover la formación de productos deseables, ya que las cantidades de fracciones sólida, líquida y gaseosa dependen marcadamente de tales variables.

Composición del sustrato. La biomasa que se puede emplear para producir biocarbón está formada de materiales complejos y heterogéneos derivados de

diferentes orígenes. Su estructura y composición varía de acuerdo con las especies de las cuales proviene y dichos componentes son responsables de la variedad y complejidad de los productos formados durante la pirólisis. La heterogeneidad de la biomasa resulta ser un obstáculo para su uso químico, esto debido a que se obtiene un rendimiento más bajo al considerarse los productos individuales derivados de cada uno de sus elementos. Esto también afecta el rendimiento del biocarbón y de combustibles que pueden ser productos de la pirólisis. Además, es necesario considerar que en la actualidad, para producir biocarbón, no sólo se usan los materiales que originalmente contribuyeron a la formación de la Terra Preta, que eran principalmente restos de árboles, malezas, huesos, sino que también se utilizan restos de plantas cultivadas cuyo manejo agronómico ha aportado agroquímicos, como es el caso de los lodos residuales o camas avícolas que probablemente contienen concentraciones importantes de herbicidas, pesticidas, fungicidas, metales pesados y antibióticos, que pueden afectar al suelo, a los cultivos y, finalmente, a la salud humana.

Intervalo de calentamiento. Este parámetro representa el aumento de temperatura por segundo, que, aunado a la duración del calentamiento y a su intensidad, afectan la velocidad, grado, secuencia de las reacciones de pirólisis, y la composición de los productos resultantes. Las reacciones ocurren en una amplia gama de temperaturas; por lo tanto, los productos formados al principio tienden a experimentar una transformación adicional y su descomposición en una serie de reacciones consecutivas. Al ser más bajo el intervalo de temperatura se aumenta la producción de biocarbón y al ser mayor, disminuye. Este parámetro es importante porque modifica su posible valor para la agricultura, aun cuando no existe un consenso sobre

cuál sería la mejor materia prima en términos de su uso en el suelo y de la producción de energía.

El nivel de calentamiento es función de las dimensiones de la materia prima y el tipo de equipo de pirólisis empleado. La velocidad de difusión térmica dentro de una partícula disminuye con el incremento de su tamaño, lo que resulta en un intervalo de calentamiento más bajo. Los productos líquidos son favorecidos por la pirólisis de partículas pequeñas y temperatura elevada, mientras que el rendimiento de productos volátiles (gases y líquidos) se incrementa con el aumento de la temperatura de calentamiento y en ese caso los residuos sólidos disminuyen. El carbón es maximizado por la pirólisis de partículas grandes con bajas tasas de calentamiento y baja temperatura.

Temperatura. El tiempo requerido para obtener un cierto nivel de conversión disminuye con el incremento de temperatura. A baja temperatura, el carbón es el producto dominante seguido por el agua. Las maderas duras producen menos carbón, pero más ácidos que las maderas blandas.

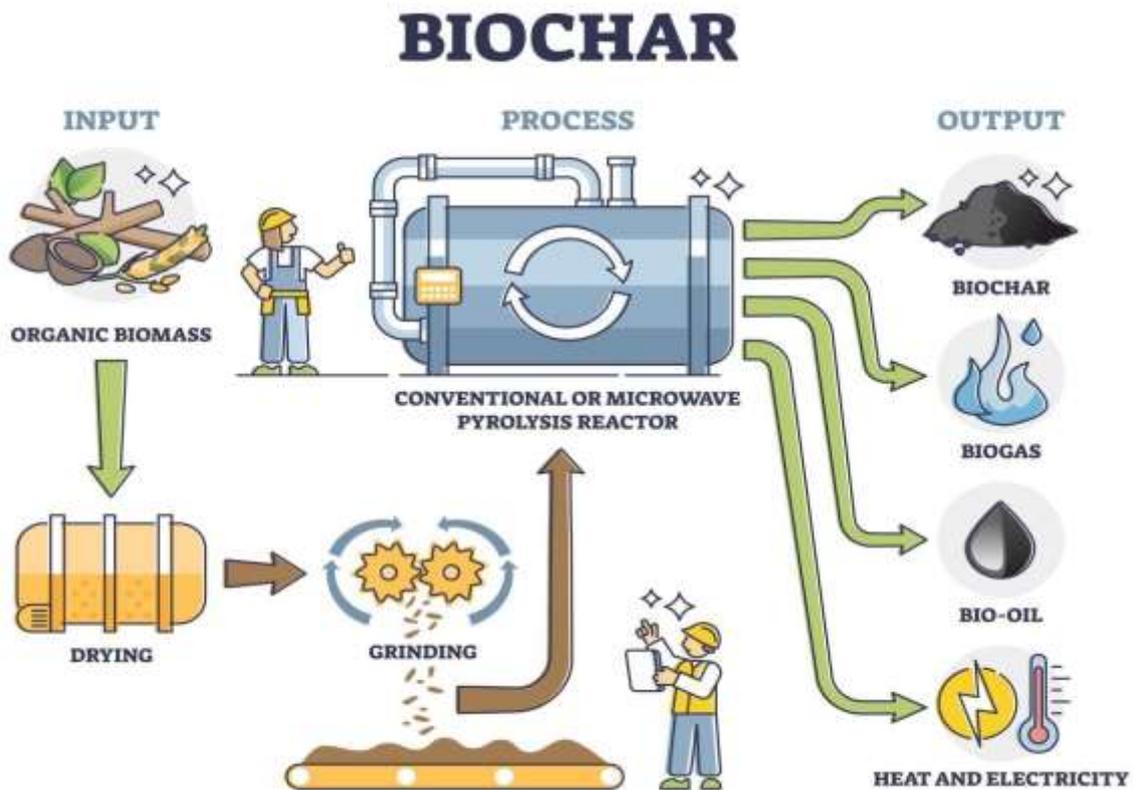


GRAFICO 3. Ilustración de obtención de biochar por pirólisis (Serymanca, 2024)

27. Chlorella Vulgaris

Chlorella vulgaris es un organismo microscópico con un tamaño de 2 a 10 μm y con una estructura similar a la de las plantas superiores, debido a que contiene; una pared celular, mitocondrias y cloroplastos, siendo estos últimos necesarios para realizar la fotosíntesis.

En cuanto a la pared celular, es la principal defensa contra factores bióticos y abióticos de la microalga. Al inicio de la formación de la pared celular, su espesor es de aproximadamente 2 nm y conforme la microalga madura, el espesor va aumentando hasta alcanzar un espesor de 21 nm. En cuanto a las mitocondrias, se puede mencionar que son las encargadas de realizar los procesos metabólicos con los que la microalga obtendrá su energía, necesaria para realizar todos los procesos de

crecimiento y mantenimiento. Las mitocondrias de *C. vulgaris* están formadas por membranas dobles, proteínas y fosfolípidos. Por último, *C. vulgaris* sólo contiene un único cloroplasto el cual está compuesto por fosfolípidos y consta de dos membranas donde la primera es permeable a ciertos metabolitos y algunos iones, pero la segunda membrana es altamente selectiva y su función es el transporte de proteínas.

Además de esta función, dentro del cloroplasto es posible la síntesis de gránulos de almidón. Dentro de los cloroplastos se encuentran los tilacoides donde se encuentra la clorofila, con la cual es posible captar energía a través de la radiación y que sea utilizada por el organismo para crear su propio alimento. En la siguiente figura se muestra la morfología de *C. vulgaris*.

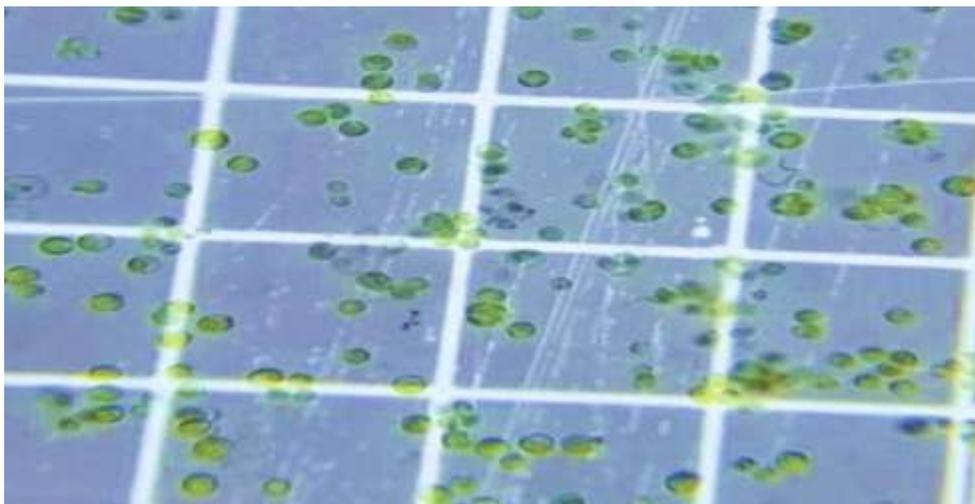


GRAFICO 4. Morfología de *Chlorella vulgaris* (J. Coronado et al., 2020)

2.7.1. Composición química

La composición de la microalga *C. vulgaris* en la biomasa generada durante la cinética de crecimiento ha permitido identificar algunos de los metabolitos primarios sintetizados como: proteínas, lípidos y carbohidratos, así como algunos pigmentos resultantes del metabolismo secundario. En general, *C. vulgaris* está constituida de la siguiente manera, como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 1. Composición química de *Chlorella vulgaris*

Component	(%)
Moisture	5.83
Dry matter	94.17
Crude protein	51.45
Carbohydrates	11.86
Crude lipid	12.18
Crude fiber	9.18
Ash	9.50

PROTEINAS:

La composición proteica total en *C. vulgaris* representa entre 42-58% del peso seco en la biomasa generada. De las cuales cerca del 20% se encuentran adheridas a la pared celular cumpliendo un papel estructural y de transporte para la célula, el 50% son proteínas intracelulares con su función como enzimas en su mayoría y el 30% restante son secretadas al medio extracelular donde se desarrollan las microalgas.

El peso total de las proteínas oscila entre 12 y 120 kDa (Kilo daltons) donde la gran mayoría se encuentra en el rango de 39 a 75 kDa. *C. vulgaris* es importante a nivel nutricional ya que en medios autótrofos o heterótrofos tienen la capacidad de sintetizar aminoácidos esenciales y no esenciales para el ser humano. Tanto las proteínas como los aminoácidos presentes en el medio de crecimiento pueden ser extraídos mediante soluciones alcalinas, ultrafiltración o por precipitación de estos con ácido tricloroacético o ácido clorhídrico 0,1N (Safi et al., 2014). Entre los aminoácidos que han sido caracterizados en la cinética de crecimiento de *C. vulgaris* se encuentran: ácido aspártico, treonina, serina, ácido glutámico, glicina, alanina,

cisteína, valina, metionina, isoleucina, leucina, tirosina, fenilalanina, histidina, lisina, arginina, triptófano, ornitina y prolina, donde el ácido glutámico es el que se sintetiza con mayor abundancia seguido del ácido aspártico con una concentración de 13,7 g/100 g de proteína y 10,94 g/100 g de proteína respectivamente (Ursu et al., 2014). Dentro de la composición de los aminoácidos identificados en la biomasa de esta microalga se encuentran algunos esenciales como: histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina y valina, a excepción del triptófano (Mohamed et al., 2013).

LÍPIDOS

Constituyen del 5 al 40% del peso seco en la biomasa, siendo principalmente glicolípidos, ceras, hidrocarburos, fosfolípidos y ácidos grasos, los cuales son sintetizados en los cloroplastos y una vez sintetizados se dirigen a las paredes celulares y membranas de los diferentes orgánulos como los propios cloroplastos y las mitocondrias. Cuando *C. vulgaris* crece en un ambiente desfavorable, se favorece la producción de lípidos, reportándose hasta un 58% de la composición total de la microalga, ubicados entre el espacio de los tilacoides en los cloroplastos (Montero-Sánchez et al., 2012).

Dentro del perfil lipídico que se ha realizado en *C. vulgaris*, se ha encontrado una mayor concentración de ácidos grasos de 18 y 16 átomos de carbono.

CARBOHIDRATOS

Se encuentran presentes en forma de almidón y celulosa, así como algunos azúcares reductores. El almidón se encuentra en los cloroplastos constituido principalmente por amilosa y amilopectina. La celulosa forma parte de la pared celular de *C. vulgaris* cuyo

enlace glucosídico es β 1-3, por lo que puede ser utilizada como insumo para la elaboración de productos funcionales que contribuyan a la salud humana. Para la identificación y caracterización de los azúcares presentes en *C. vulgaris* se recomienda el uso de HPLC y con el cual se ha identificado que la composición de las paredes celulares de la microalga resulta de una mezcla de ramnosa, galactosa, glucosa, xilosa, arabinosa y manosa donde la más abundante es la ramnosa (Ho et al., 2011).

PIGMENTOS

Entre los pigmentos más abundantes en *C. vulgaris* se encuentra la clorofila, la cual constituye entre el 1 y el 2% del peso seco de la biomasa. Adicional a estos pigmentos, también se encuentra la presencia de carotenoides que pertenecen al grupo de metabolitos secundarios llamados terpenos. Los carotenoides identificados en la microalga son esencialmente β -carotenos que se encuentran asociados a los lípidos presentes en los cloroplastos, así como a las clorofilas y tilacoides en los propios cloroplastos. Los pigmentos identificados han sido evaluados por su actividad antioxidante, los cuales se han reportado que son extraídos utilizando solventes como; dimetilformamida, diclorometano, acetona, hexano y etanol a través de métodos como Soxhlet, extracción asistida por ultrasonido y con fluidos supercríticos. Entre los principales pigmentos que se han identificado en *C. vulgaris* se encuentran: β -carotenos, astaxantina, cantaxantina, luteína, clorofila a y b, feofitina a y b y violoxantina. Como se puede observar, hay presencia de algunos polifenoles como la luteolina, por lo que sería posible utilizar otros solventes con los cuales sea posible evaluar y caracterizar si existen otros (Ohse et al.,2008).

2.7.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CRECIMIENTO

Se ha demostrado que *C. vulgaris* es una especie de microalga con la que se pueden tener altos rendimientos de metabolitos primarios y secundarios; sin embargo, se ha observado que, debido a su adaptabilidad, puede responder de manera diferente al ser expuesta a diferentes factores durante su crecimiento, por lo que se destacan los evaluados hasta el momento y la influencia que tiene en el crecimiento de la microalga.

LUZ

Al tratarse de un organismo fotosintético, la producción y eficiencia del fenómeno está fuertemente relacionada con la luz de la cual lo importante es su intensidad. Cuando los organismos fotosintéticos no cuentan con fuentes de carbono orgánico, su principal forma de obtener energía es a través de la luz, la cual conforme aumenta la intensidad también aumentan los productos generados a partir de la fotosíntesis; sin embargo, existe un punto máximo en el cual los organismos absorben energía y si se sobrepasa este punto se sufre un fenómeno conocido como fotoinhibición que se define como la inhibición de la fotosíntesis debido a un exceso de radiación que afecta directamente a la producción, indicando que el organismo fotosintético se encuentra bajo estrés. La fotoinhibición puede ser reversible (Casierra-Posada, 2007).

Además del efecto negativo que puede causar la exposición a altas intensidades de luz sobre las microalgas, los productos fotosintéticos pueden verse afectados por otro fenómeno respecto a la luz a lo largo del crecimiento, el cual se denomina “auto sombreado” donde las células que están cercanas a la fuente de luz, realizan la fotosíntesis sin ningún problema, pero irán sombreando paulatinamente a las células que están posteriores a ellas, por lo que el crecimiento se inhibe, es por ellas que se

recomienda que el medio de crecimiento esté instrumentado de tal manera que permita la circulación celular para que las células puedan estar en un contacto lo más uniforme posible con la fuente de luz. Lo recomendable para esta circulación es el movimiento inducido por burbujeo en el tanque y no se recomienda el uso de aspas ya que pueden dañar las células (Contreras et al., 2003). También se debe considerar el camino de la luz durante el crecimiento de las microalgas, este camino se define como la distancia transversal que debe recorrer un fotón para pasar a través de un sistema como un fotobiorreactor de tal manera que el camino de la luz estará determinado por la profundidad del líquido en un reactor (Contreras et al., 2003).

TEMPERATURA

Para que un organismo crezca es necesario que el ambiente en el que se desarrolle sea favorable y la temperatura es sin duda uno de los principales factores, cada organismo es diferente por lo que tienen diferentes rangos de temperatura en los que pueden crecer y otros con los que mueren. La temperatura ideal de crecimiento celular de un organismo se conoce como temperatura óptima de crecimiento. Para la microalga especie *Chlorella* la temperatura óptima oscila de 28 a 35 °C. En el caso de que la temperatura esté por debajo de las indicadas la microalga no es capaz de crecer ya que su sistema metabólico está parado, pero al sobrepasar la temperatura se inicia la respiración vegetal, es decir, en lugar de fijar CO₂ se empieza a fijar O₂ y por tanto se reduce la producción de metabolitos primarios y secundarios (Chinnasamy et al., 2009).

pH

Las microalgas pueden crecer normalmente a un pH alrededor de 8, y es importante mantenerse cerca ya que una variación afecta significativamente la producción de biomasa. Entre los factores que pueden alterar el ambiente están; la respiración celular, la alcalinidad de los nutrientes al momento de preparar el medio de cultivo, la actividad microbiana autótrofa y heterotrófica, así como las concentraciones de CO₂ Disuelto en el medio ya que, si este se acumula y no es fijado por las microalgas, el medio se vuelve alcalino (Bartley et al., 2013).

O₂ y CO₂

Durante la fotosíntesis, parte de los productos formados es oxígeno, por lo que se ha observado que la concentración de oxígeno en el medio puede aumentar desde un 200% hasta un 300%, sin embargo, este aumento hace que la producción de biomasa y metabolitos se vea afectada significativamente ya que el organismo puede entrar en un proceso de respiración, como se indicó anteriormente, y dejar de producir las moléculas de interés. Dentro de la disminución en la producción de metabolitos y biomasa va desde un 17% hasta un 25%, por lo que este parámetro debe ser controlado durante la cinética de crecimiento (Acién Fernández et al., 2012). En cuanto al suministro de CO₂ y su fijación, es necesario que a temperaturas óptimas de crecimiento se realice el mismo suministro de gas ya que este se disociará mejor en el medio y podrá ser absorbido por los organismos en un medio acuoso y así realizar la fotosíntesis.

NUTRIENTES

El principal nutriente que requiere la microalga para su crecimiento es el nitrógeno ya que de él obtendrá material genético y proteínas e incluso síntesis lipídica. Las

microalgas fijan el nitrógeno a partir de dos moléculas; nitratos o amoniaco. El medio de cultivo puede contar con carbohidratos al trabajar con medio foto heterotrófico donde estas moléculas serán las fuentes de carbono y no principalmente CO₂, y por último se recomienda que el medio de cultivo esté enriquecido con fósforo ya que a partir de este las microalgas dispondrán de átomos necesarios para la síntesis de ácidos nucleicos y moléculas energéticas como el ADTP. Las fuentes de fósforo pueden ser incorporadas al medio en forma de fosfatos y donde se recomienda una concentración superior al 1% por litro de medio preparado (Grobbelaar, 2004).

La *Chlorella vulgaris* es una microalga verde unicelular que pertenece al filo Chlorophyta. Es ampliamente estudiada por su rápido crecimiento, capacidad fotosintética y su alta tasa de conversión de dióxido de carbono en biomasa. Es una microalga esférica de aproximadamente 2 a 10 micrómetros de diámetro, carece de flagelos y tiene una pared celular compuesta de celulosa. Su reproducción es asexual mediante la división celular, lo que le permite un crecimiento rápido bajo condiciones óptimas de nutrientes, luz y temperatura.

Como organismo fotosintético, utiliza luz solar para convertir dióxido de carbono (CO₂) y agua en biomasa a través del proceso de fotosíntesis. Contiene clorofila a y b, que le permiten captar luz en el rango visible para generar energía química.

2.7.3 Ciclo de vida y crecimiento

Tiene un ciclo de vida corto y eficiente, pasa por 2 fases de crecimiento exponencial, fase estacionaria y eventualmente muerte celular si las condiciones se vuelven limitantes (nutrientes, luz, CO₂).

2.7.4 Condiciones de crecimiento:

Las condiciones de óptimas para su crecimiento son las siguientes:

- **Luz:** Crece mejor bajo luz continua en el rango de 600 a 700 nm.
- **Nutrientes:** Requiere nitrógeno, fosforo, potasio y micronutrientes como hierro y magnesio. Puede crecer en medios heterotróficos si se proporciona una fuente de carbono externa (ej. Glucosa).
- **Temperatura:** Las temperaturas óptimas para su crecimiento oscilan entre los 25 y 30°C.
- **CO₂:** Es capaz de fijar dióxido de carbono, lo que le permite actuar como una herramienta para la captura de gases de efecto invernadero.

2.7.5 Composición Química:

Proteínas: Constituyen entre el 40-60% de su biomasa, lo que convierte a *Chlorella vulgaris* en una excelente fuente de proteína vegetal. Es rica en aminoácidos esenciales.

Lípidos: Contiene entre el 10-30% de lípidos, dependiendo de las condiciones de cultivo. Estos lípidos pueden ser utilizados para la producción de biocombustibles como biodiésel.

Carbohidratos: Almacena carbohidratos en forma de almidón, lo que puede ser aprovechado para la producción de bioetanol y otros productos bioquímicos.

Pigmentos: Además de clorofila, contiene carotenoides (betacarotenos, luteína) que tienen aplicaciones nutracéuticas y cosméticas.

2.7.6 Aplicaciones Biotecnológicas

1. **Biocombustibles:** *Chlorella vulgaris* se ha investigado ampliamente para la producción de biodiésel debido a su capacidad de acumular lípidos bajo condiciones de estrés. También se ha propuesto como fuente de biohidrógeno.

2. **Nutrición y Suplementos:** Debido a su alto contenido de proteínas, vitaminas (especialmente la B12), minerales y ácidos grasos esenciales, *Chlorella vulgaris* es utilizada en suplementos alimenticios y productos funcionales.
3. **Remediación ambiental:** Es capaz de remover contaminantes del agua, como metales pesados (por ejemplo, Cr VI), mediante procesos de adsorción y bioacumulación. También se usa en tratamientos de aguas residuales para reducir la carga de nutrientes.
4. **Captura de CO₂:** Su capacidad para fijar CO₂ la hace una opción viable para reducir las emisiones industriales, ayudando a mitigar el cambio climático.
5. **Producción de biochar:** *Chlorella vulgaris* puede ser utilizada en la producción de biochar a través de pirólisis, que puede luego aplicarse en la remoción de contaminantes como el cromo VI de aguas residuales.

2.7.7 Producción de Biomasa

- **Sistemas de cultivo:** Se cultiva en fotobiorreactores cerrados o en estanques abiertos. Los sistemas cerrados ofrecen mayor control sobre las condiciones, mientras que los abiertos son más económicos, pero están expuestos a contaminación y variabilidad climática.
- **Optimización del cultivo:** Se investigan estrategias para aumentar la productividad de biomasa, como la modificación de las condiciones de luz, nutrientes y dióxido de carbono, así como la ingeniería genética para mejorar su eficiencia fotosintética y resistencia a factores de estrés.

2.8 Biocarbón Derivado de Algas y Microalgas *Chlorella vulgaris*: Un Enfoque Sostenible para el Tratamiento de Aguas

Los sectores industriales, incluidos los de productos farmacéuticos, impresión de papel, fotografía en color, alimentación, teñido de textiles y cosméticos, utilizan una enorme cantidad de agua dulce y productos químicos sintéticos durante sus procesos industriales. Entre ellos, la industria textil consume agua dulce todos los días y libera un gran volumen de aguas residuales textiles. Estas aguas residuales, que contienen niveles excesivos de sustancias químicas auxiliares (colorantes sintéticos, nitratos, fosfatos y metales pesados), plantean una gran amenaza para los ecosistemas receptores, ya que son responsables de crear problemas estéticos, eutrofizantes, cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos para la vida acuática y la salud humana debido a su disposición directa en cuerpos de agua. Por lo tanto, es una necesidad urgente controlar el cambio climático y eliminar los contaminantes de las corrientes de aguas residuales para la sostenibilidad de nuestro ecosistema.

La tecnología de microalgas se considera como un enfoque prometedor debido a su naturaleza verde, efectiva y respetuosa con el medio ambiente para la eliminación de CO₂ y contaminantes de las aguas residuales durante el proceso de fotosíntesis. La tecnología de microalgas consiste en dos procesos que incluyen el cultivo/bioconversión de microalgas (algas vivas) y la biosorción (algas muertas) (Onen et al. 2023). El cultivo de microalgas vivas ha demostrado ser un proceso eficiente para la captura de carbono y la biorremediación de aguas residuales (Debeni Devi et al.2023). Las microalgas, como plantas criptosporas de bajo nivel de esporas con clorofila, tienen la capacidad de realizar el proceso de fotosíntesis bajo una fuente de luz, agua dulce y nutrientes (carbono, nitratos, fosfatos y minerales) para su cultivo (Ahmad y Ashraf 2023). Sin embargo, los costos del suministro de

agua dulce y nutrientes hacen que este proceso sea caro y crean un desafío para su aplicación comercial. Para superarlos, se cultivó *Chlorella vulgaris* (1,7 g L⁻¹) para tratar las aguas residuales textiles industriales eliminando la DQO (91,12 %), el nitrato (98,03 %) y el fosfato (95,83 %), donde se utilizó TWW como fuente de nutrientes para el crecimiento de microalgas junto con el suministro de CO₂ a través del burbujeo de aire (Javed et al. 2023a). Además, las aguas residuales textiles reales se diluyeron con otras aguas residuales industriales (jugos) para minimizar el requerimiento de agua dulce para el proceso de biorremediación mediado por microalgas y esto resultó en un aumento en el rendimiento de biomasa de hasta 2,83 g L⁻¹ en TWW diluido al 75 % con aguas residuales jugosas (25 %) (Javed et al. 2023b). Mientras tanto, el proceso de biosorción derivado de algas muertas también se ha utilizado para eliminar tintes orgánicos y contaminantes de metales pesados de las aguas residuales (Georgin et al. 2019). Sin embargo, la capacidad de biosorción limitada de la biomasa de algas, la cinética lenta y la alta restricción energética para la regeneración del biosorbente hacen que este proceso sea menos eficiente para el tratamiento de aguas residuales (Ord et al. 2023).

La síntesis de biocarbón derivado de algas puede proporcionar una alta eficiencia de eliminación y una rápida tasa de biosorción para eliminar colorantes de las aguas residuales. Por ejemplo, el biocarbón derivado de macroalgas se sintetizó para eliminar el tinte MB. Más del 90% de eliminación de MB (48 mg g⁻¹) se logró en solo 10 minutos en comparación con la biomasa de algas simple (74% y 37 mg g⁻¹) debido a la gran área de superficie y las atracciones electrostáticas para unir/adsorber moléculas de tinte en la superficie del BC (Fazal et al. 2019). Por lo tanto, una tecnología mediada por microalgas puede ser útil para el desarrollo de un enfoque sostenible para la captura de CO₂ y la biorremediación de aguas residuales.

La integración del cultivo de microalgas y los procesos de biosorción de algas muertas junto con las aguas residuales brindan una solución viable para eliminar el carbono atmosférico (CO₂) y todos los contaminantes tóxicos de las aguas residuales. El uso de aguas residuales cargadas de contaminantes puede hacer que el proceso de cultivo de microalgas sea más eficiente, rentable y sostenible debido al suministro de carbono orgánico (colorantes), nitratos, fosfatos y metales pesados (Jiang et al. 2023). Por el contrario, el biocarbón derivado de biomasa de algas, como biosorbente, puede utilizarse debido a su alta capacidad de adsorción, gran área superficial con sitios de unión (grupos funcionales) más altos y rápida tasa de adsorción para eliminar colorantes de los residuos de tratamiento de aguas residuales (Nguyen et al. 2023). El biocarbón (BC) también se puede utilizar como fuente de nutrientes para el cultivo de microalgas debido a la presencia de micronutrientes (es decir, metales Na, K, Ca, Mg, Cu, Zn y Mn) en formas estables y disponibles (Law et al. 2022). Dependiendo de estas propiedades (como biosorbente y fuente de nutrientes), el BC se puede integrar junto con las microalgas para la eliminación de colorantes orgánicos, nitratos y fosfatos de los residuos de tratamiento de aguas residuales y el crecimiento de microalgas durante el proceso de biorremediación (Khan et al. 2022). La biomasa de microalgas obtenida (que contiene lípidos, carbohidratos y proteínas) se puede utilizar como materia prima para la producción de biodiesel, biofertilizantes y alimentos para animales, lo que hace que esta tecnología sea más económica y sostenible para su implementación a escala industrial para la captura de CO₂ y el tratamiento de aguas residuales (Chettri et al. 2023). Por lo tanto, la técnica de tratamiento de aguas residuales mediada por microalgas (cultivo de microalgas y biosorción) se puede integrar para aprovechar las ventajas de ambas tecnologías para la captura de CO₂, la recuperación de nutrientes y la producción de biodiesel, y

la adición de biocarbón derivado de algas mejoró la tasa de adsorción y actuó como fuente de nutrientes para el crecimiento de microalgas al proporcionar minerales.

2.9. Algunas aplicaciones del biocarbón

El biocarbón se utiliza en diferentes áreas de la vida; en el Grafico 5 se presenta un diagrama esquemático que representa algunas posibles aplicaciones del biocarbón

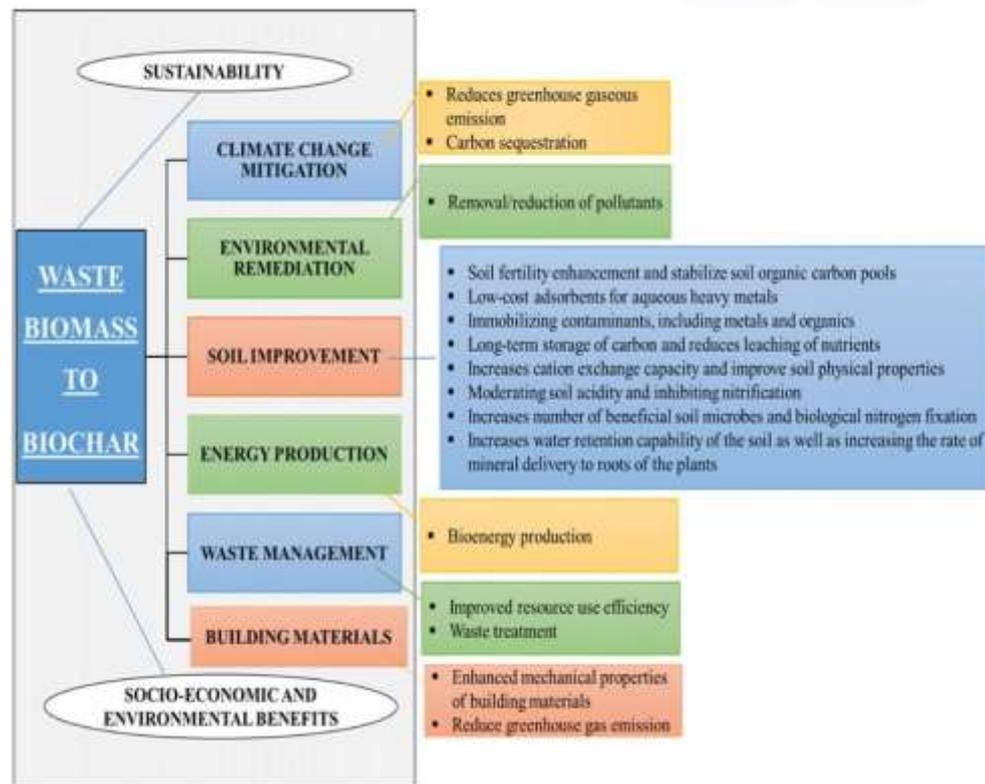


GRAFICO 5. Varios usos del Biocarbón (Sri Shalini et al., 2021)

2.9.1 Uso en la producción y almacenamiento de hidrógeno.

La gran superficie, la buena estabilidad química, el gran volumen de poros y la porosidad fácilmente adaptable de los materiales porosos a base de carbono han llevado a una amplia investigación sobre ellos como posibles materiales para la adsorción física de H₂. La porosidad y el aumento de la superficie del carbono pueden proporcionar más sitios de unión en la superficie y en los poros, mejorando su rendimiento de almacenamiento de H₂. En general, el uso de materiales porosos a base de carbono puede reducir las densidades de almacenamiento volumétricas y

gravimétricas. Según un estudio realizado por Ref., se descubrió que el biocarbón es activo catalíticamente. Hay un avance considerable en el biocarbón para los fines de la evolución del hidrógeno. Ref. elaboró un biocarbón de lodos de depuradora que indicó la fabricación de hidrógeno a partir de agua impulsada por la irradiación artificial de luz solar (luz visible). Es un fotocatalizador libre de metales, mostró una fotoactividad significativa de 3845 $\mu\text{mol/g}$ de rendimiento de hidrógeno. Se descubrió que este rendimiento era más significativo que el de los nanoalótopos de carbono convencionales como el grafeno, los CNT y los nitruros de carbono. Yeboah et al., investigaron un enfoque rentable y sencillo para la síntesis de biocarbón en aire ambiente. El biocarbón generado se utilizó como ayuda de molienda para crear compuestos de magnesio y biocarbón para el almacenamiento de hidrógeno. Un resultado de difracción de rayos X mostró que un aumento en el contenido de biocarbón de cáscara de palmiste del 5 % en peso al 20 % en peso mejora el rendimiento de absorción del hidrógeno por parte de las astillas de madera de álamo de desecho industrial como materia prima en el área de almacenamiento de hidrógeno. Según el resultado de su estudio, la materia prima utilizada a presión normal registró una capacidad de almacenamiento de hidrógeno de 3,03 % en peso, lo que indica una reversibilidad digna. Los resultados sugieren que el biocarbón de astillas de madera de álamo tiene una gran perspectiva como material de almacenamiento de hidrógeno. El hidrógeno se puede producir a través de la descomposición catalítica de metano en el biocarbón.

Activado por vapor, ZnCl_2 o KOH , el biocarbón tiene una gran superficie y una multitud de características de microporos. Dado que las fuerzas de capilaridad en la estructura de microporos tienen el potencial de reducir en gran medida el potencial de adsorción de H_2 , se cree que es un factor importante en la adsorción de H_2 .

Por lo tanto, para una adsorción de H₂ altamente efectiva, los materiales de biocarbón pueden ser un sustituto viable para el carbón activado tradicional. Mientras tanto, debido a la contribución de la quimiosorción, las numerosas especies inorgánicas o grupos funcionales de superficie (como metales alcalinos o alcalinotérreos) del biocarbón también pueden ser una adición significativa a sus excepcionales capacidades de almacenamiento de H₂ en relación con los materiales de carbón activado hechos de petróleo o carbón tradicional. Dado que la estructura de carbono sp² en el biocarbón tiene una alta afinidad electrónica, puede separar la carga de los iones de metales alcalinos y proporcionar una fuerte estabilización al H₂ molecular adsorbido. Por ejemplo, las especies de Na⁺ o K⁺, que están comúnmente presentes en los materiales de biocarbón y pueden servir como núcleos alcalinos para extraer H₂. Se compararon doce tipos diferentes de biocarbón. El biocarbón se produjo a tres temperaturas diferentes (300, 500 y 700 °C) y se derivó de cuatro fuentes diferentes: salvado de trigo, aserrín, lodos de depuradora y cáscaras de maní. Se ha descubierto que el biocarbón producido a temperaturas más altas produce más hidrógeno en experimentos que el biocarbón formado a temperaturas más bajas, como se muestra en el Grafico 6 a.

Se aplicó el método PCA para evaluar más a fondo las causas subyacentes que motivan la adición de biocarbón para aumentar la producción de H₂; los resultados se muestran en el Grafico 6 b. Se determinó que tres factores principales podrían explicar más del 75 % de la variación en el proceso de producción de H₂. Las temperaturas de tratamiento más altas proporcionaron una explicación del primer componente principal. Además, el R_{max} de producción de H₂ y el pH del biocarbón exhibieron una correlación positiva significativa. Sin embargo, para todas las materias primas analizadas, el tiempo de retraso de la producción de H₂ mostró una correlación

negativa con el R_{max} , lo que sugiere que el pH es un indicador importante del biocarbón para promover la producción fermentativa de H_2 . Por lo tanto, el funcionamiento constante de los sistemas de digestión anaeróbica dependió en gran medida del mantenimiento de la capacidad de amortiguación del pH. La fase de producción de H_2 en su estudio experimentó acidificación. Las fuertes capacidades de amortiguación del pH de los biocarbones se demuestran por el pH significativamente más alto retenido en todos los grupos que fueron modificados con biocarbón en comparación con el grupo de control.

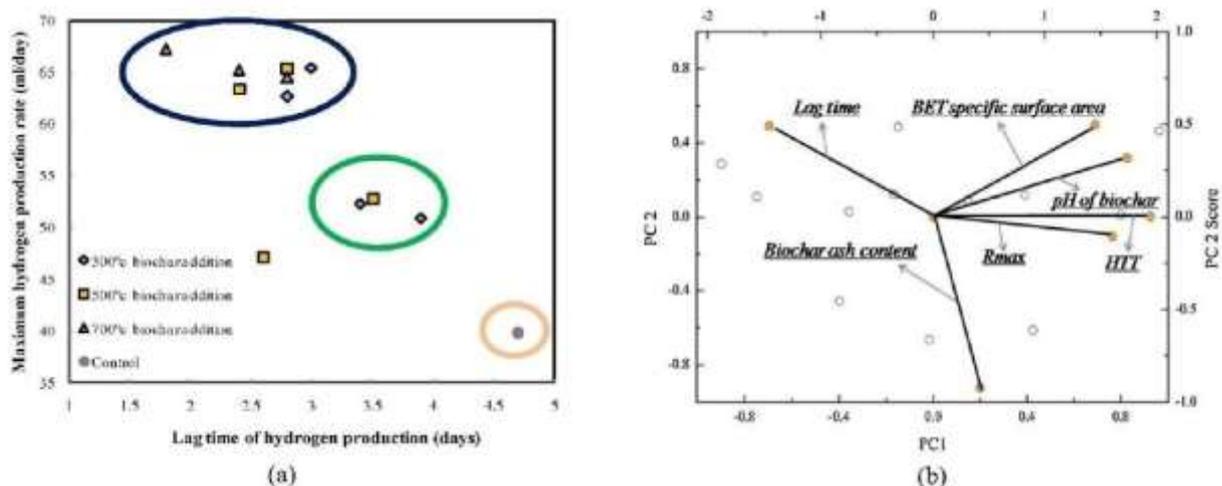


GRAFICO 6. (a) Los efectos de varias adiciones de biocarbón sobre la tasa máxima de producción de hidrógeno y el tiempo de retraso se presentan en; Figura 6 (b) los resultados del Análisis de Componentes Principales (PCA). (Wang G et al., 2018)

2.9.2 Uso en supercondensadores

Los supercondensadores modernos son altamente confiables; también tienen características de carga y descarga rápidas y alta densidad de potencia. Por lo tanto, los supercondensadores se usan ampliamente en varias aplicaciones, especialmente en el área de vehículos eléctricos. La fabricación de electrodos para aplicación en supercondensadores se realiza principalmente utilizando carbón activado, que tiene

una gran área de superficie específica que es mayor a 2000 m² por gramo. Dichos condensadores han exhibido una capacitancia específica que oscila entre 250 y 350 Fg⁻¹. Sin embargo, es deseable utilizar carbones funcionales relativamente más baratos que tengan una excelente capacitancia específica. La investigación ha demostrado que los electrodos de biocarbón de supercondensadores tienen una capacitancia gravimétrica de aproximadamente 14 F g⁻¹ con una ventana de potencial de aproximadamente 1,3 V. En un estudio experimental realizado por Ref., un supercondensador que depende de biocarbón dopado con nitrógeno en un electrolito básico registró una capacitancia específica de 297 Fg⁻¹, mientras que en un electrolito ácido alcanzó 284 F g⁻¹. En efecto, los supercondensadores que dependen de biocarbón tienen una mayor superioridad en términos de rendimiento en comparación con los supercondensadores basados en carbón activado (ver Gráfico. 7).

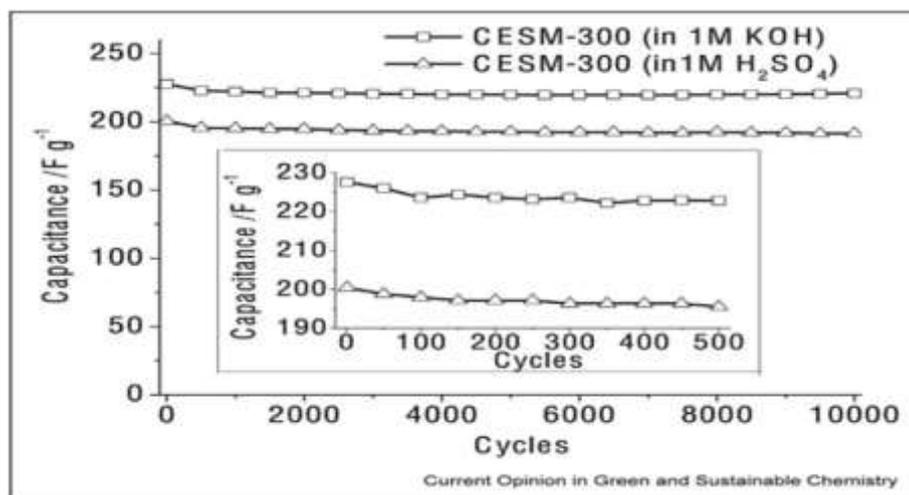


Gráfico 7. Evaluación de la capacitancia específica de la membrana de la cáscara de huevo, obtenida a partir de carbonos (Rahman MZ et al., 2020)

2.9.3 Adsorción de metales pesados mediante biocarbón

Un muy buen absorbente de metales pesados en el suelo es el biocarbón. Utiliza la gran superficie que posee, así como su microporosidad para el secuestro de metales pesados. Hay un cambio en el impacto de la ecotoxicología y la biodisponibilidad

cuando entra en contacto con el biocarbón. La superficie tiene grupos funcionales oxigenados; por lo tanto, ayuda en la adsorción de metales pesados.

2.9.4 Biocarbón para la enmienda del suelo

La fertilidad del suelo se puede mejorar mediante la aplicación de biocarbón como aditivo. Su adición al suelo también reduce la frecuencia de riego de agua, ya que ayuda a mejorar su capacidad de retención de agua. La adición de biocarbón al suelo puede conducir a la absorción de contaminantes orgánicos que puedan estar en el suelo. Esto se debe a que el biocarbón es un buen adsorbente de compuestos orgánicos, lo que da lugar a variaciones en su susceptibilidad a la biodegradación. Por ejemplo, el hexaclorobenceno, el fenantreno y el sulfametoxazol son fuertemente absorbidos por el biocarbón.

La adición de biocarbón al suelo también mejora su porosidad, textura, área superficial, densidad aparente, distribución del tamaño de los poros, etc. La fertilidad del suelo también se puede mejorar aumentando el contenido de fósforo y potasio en él. La acidez del suelo también se puede aliviar añadiendo biocarbón, ya que aumenta el valor de pH del suelo. Las capacidades de intercambio de aniones y cationes también se mejoran cuando se añade biocarbón al suelo. En la figura 7 se muestra una ilustración gráfica de la aplicación de biocarbón como mejorador del suelo.

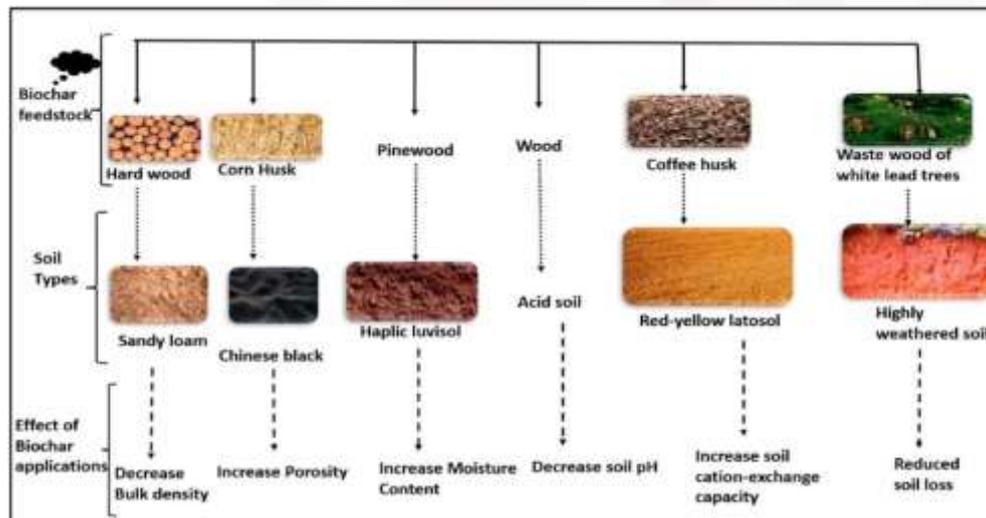


GRAFICO 8. Usos del biocarbón para la mejora del suelo (Puga AP et al., 2020)

2.9.5 Adsorción de fósforo y H₂S

El fósforo puede eliminarse mediante biocarbón; es eficaz en la adsorción de fósforo cuando el biocarbón es rico en aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Un estudio de Ref., indicó que la capacidad de adsorción de fósforo utilizando biocarbón es de aproximadamente 15 mg/g de biocarbón. Por ejemplo, se ha identificado que un biocarbón de hidrato de óxido férrico exhibió una alta capacidad para la eliminación de fósforo dentro del rango de 51,71–56,15 mg/g.

El biocarbón también posee la capacidad de eliminar ácido sulfhídrico (H₂S), se obtuvo una capacidad de eliminación de 60 mg/g de H₂S, bajo las siguientes condiciones óptimas: velocidad espacial (7300 L min⁻¹ kg⁻¹), duración (5,7 min), temperatura de carbonización (500 °C).

2.9.6 Eliminación por adsorción de compuestos orgánicos volátiles del aire

Una de las medidas utilizadas para la eliminación de compuestos orgánicos volátiles es la adsorción. Generalmente, los biocarbones de naturaleza hidrófila se emplean preferentemente para la adsorción de aldehídos y cetonas, que son todos ejemplos

de compuestos orgánicos volátiles (VOC) polares, mientras que los biocarbones de baja hidrofiliidad se emplean en la captura de hidrocarburos aromáticos, también conocidos como VOC no polares. La captura de moléculas de VOC a través de la mayoría de los biocarbones progresa a través de una amalgama sinérgica de dos métodos básicos, que son: fisisorción, que incluye enlaces de hidrógeno, interacciones de van der Waals, interacciones de donador-aceptor de electrones π - π y procesos de llenado de poros, fuerzas covalentes/electrostáticas y partición como resultado del carácter efectivo del contenido de materia volátil disponible en el biocarbón. El biocarbón también ha demostrado ser reutilizable y regenerativo.

2.9.7 Catalizador - producción de energía

El biocarbón como catalizador tiene un enorme uso en las áreas de celdas de combustible microbianas, producción de biodiesel y fabricación de productos químicos. La formación de alquitrán durante el proceso de gasificación de biomasa es perjudicial ya que la condensación del alquitrán termina en la obstrucción y contaminación de las operaciones de flujo descendente. También afecta la eficiencia de la energía. La transformación catalítica del alquitrán tiene el potencial de convertir el alquitrán en monóxido de carbono e hidrógeno, que se consideran componentes clave del gas de síntesis. El carbón generado a partir del carbón de paja de arroz y el carbón de paja de maíz afecta la eliminación del alquitrán; por lo tanto, la eficiencia de la eliminación del alquitrán está influenciada por el tipo de carbón. La eficiencia de la eliminación del alquitrán se reduce con el aumento del tamaño de partícula del carbón. La producción de hidrógeno se puede mejorar mediante la adición de biocarbón durante el proceso de pirólisis o gasificación.

2.10. Economía de la producción de biocarbón y potencial de los bonos verdes como fuente de financiación.

Un factor significativo en la comercialización y el uso de biocarbón es el costo de producción. De acuerdo con el estado actual del mercado, las aplicaciones de biocarbón son inviables en términos de costo y viabilidad, incluso con sus considerables beneficios ambientales. Esto está relacionado con los bajos incentivos gubernamentales para alcanzar la negatividad de carbono y los altos costos de capital de las plantas de pirólisis. Los sistemas para producir biocarbón se han evaluado económicamente en términos de las materias primas o materias primas utilizadas, los subsidios para el secuestro de carbono, la tecnología de conversión utilizada y los créditos de carbono que representan el valor social de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La adopción de técnicas agrícolas inteligentes tiene el potencial de mitigar los impactos negativos del cambio climático, impulsar el rendimiento de los cultivos y mejorar las circunstancias financieras de los agricultores. Por ejemplo, utilizando un análisis tecno económico, compararon la producción de biocarbón a partir de pirólisis convencional (CP) y pirólisis por microondas (MWP). Con base en un tipo de cambio de 1,04 EUR/USD, los precios mínimos para el biocarbón CP-biocarbón oscilaron entre 454 USD por tonelada y 871 USD por tonelada y para el biocarbón MWP entre 588 USD por tonelada y 1020 USD por tonelada. Otro ejemplo un costo entre \$448,78-\$1846,96 Mg⁻¹, con un 90 % de posibilidades de que los precios varíen entre \$571- \$1455 Mg⁻¹. El costo de producción utilizando pirólisis rápida, gasificación o pirólisis lenta podría ser de US\$560 ton⁻¹, US\$380 ton⁻¹, y US\$272 ton⁻¹, respectivamente. Con su desarrollo y simplificación, la tecnología CP reduce los costos. Se observó que el biocarbón MWP superó al biocarbón basado en CP en términos de calidad y viabilidad técnica.

Además, un criterio crucial para evaluar las instalaciones de producción de biocarbón fue el costo del biocarbón por tonelada, que estuvo fuertemente influenciado por el impuesto al carbono del gobierno.

Se cree que un enfoque creativo para financiar el crecimiento verde es a través de las finanzas verdes. Asignar fondos a proyectos verdes que inician diferentes actores económicos, incluidos el público, el privado y otros participantes del mercado, es uno de los desafíos que enfrenta la financiación verde. Los bonos verdes se han utilizado ampliamente para financiar iniciativas destinadas a mitigar el cambio climático, desarrollar fuentes de energía renovables y salvaguardar el medio ambiente. La disponibilidad de esta asistencia financiera puede eventualmente reducir la carga que recae sobre los productores e innovadores, aunque estas implementaciones son costosas e inicialmente parecen ser menos competitivas. Se encuentra un consenso mixto, pero generalmente positivo en los estudios que se centran en una prima verde en el mercado primario de bonos verdes. Dicho de otra manera, se puede decir que los inversores están dispuestos a aceptar un rendimiento menor a cambio de bonos verdes a un precio más alto. Esto tiene que ver con los emisores y el crecimiento del mercado de bonos verdes. En particular, en el caso de los bonos verificados por terceros, las organizaciones gubernamentales pueden beneficiarse de la participación en el mercado de bonos verdes para financiar proyectos con bajas emisiones de carbono a un costo menor; dicho financiamiento con tasas de interés relativamente más bajas se puede obtener para la producción de biocarbón para ayudar a reducir el costo de su producción y hacer viable su uso.

CAPÍTULO III: Diseño Metodológico

3.1 Tipo y diseño de investigación

3.1.1 Tipo de Investigación

Este estudio se enmarca en la investigación descriptiva y cuantitativa, con un enfoque en la revisión bibliométrica. Se centra en la recopilación, análisis y presentación de datos sobre la literatura existente en el campo de la producción y utilización de biochar a partir de la *Chlorella vulgaris* mediante pirolisis.

3.1.2 Diseño de Investigación

El diseño de la investigación es no experimental, transversal y descriptivo:

- 1. No experimental:** No se manipulan variables independientes ni se realiza investigación alguna en el entorno de los sujetos de estudio. En lugar de ello, se analiza información secundaria disponible en publicaciones científicas.
- 2. Transversal:** La recolección de datos se realiza en un momento específico del tiempo, recopilando información de diversas fuentes contemporáneas.
- 3. Descriptivo:** El objeto es describir y analizar patrones, tendencias y relaciones en la literatura científica sin buscar establecer relaciones causales directas. La investigación se centra en la caracterización de la producción científica y el análisis de datos bibliométricos como la frecuencia de publicaciones, distribución temporal y eficiencia de los métodos empleados.

3.2 Identificación de la Población y la Muestra

3.2.1 Población

La población para este estudio bibliométrico está constituida por todas las poblaciones científicas disponibles en bases de datos académica que abordan la producción y utilización de biochar a partir de *chlorella vulgaris* mediante pirolisis. Esto incluye artículos de revistas, conferencias, tesis y otros documentos científicos relevantes publicados desde el año 2004 hasta la fecha actual.

3.2.2 Muestra

La muestra se seleccionará mediante un proceso sistemático de búsqueda y filtrado en base de datos científicos como PubMed, Scopus, Web of Science, entre otras. Se emplearán criterios de inclusión y exclusión específicos para garantizar la relevancia y calidad de los estudios considerados:

Tabla 1. Características de la Población de estudio

CRITERIOS DE INCLUSIÓN	CRITERIOS DE EXCLUSIÓN
Estudios sobre la producción y utilización de biochar a partir de <i>chlorella vulgaris</i> por pirolisis.	Publicaciones no relacionados con la producción de biochar.
Investigaciones sobre sobre biochar y <i>chlorella vulgaris</i> .	Estudios no vinculados con biochar y <i>chlorella vulgaris</i> .
Artículos en revistas revisadas por pares.	Artículos sin revisión por pares.
Documentos en inglés y español.	Duplicados o estudios irrelevantes después de revisión de títulos y resúmenes.

Tabla 2. Descripción de la población y la implementación del estudio para una revisión bibliométrica relacionadas con la producción y utilización de biochar a partir de *chlorella vulgaris* por pirolisis.

ASPECTO	DESCRIPCIÓN
Tipo de Documentos	Artículos científicos, revisiones e informes de conferencias relacionados con la producción y utilización de biochar a partir de <i>chlorella vulgaris</i> por pirolisis.
Ámbito temporal	Preferiblemente de al menos 20 años para identificar tendencias y evolución en la investigación.
Bases de datos	Scopus, Wb of science, PubMed y Google Scholar.
Idioma	Inglés y Español
ETAPA	DESCRIPCIÓN
Proceso de búsqueda y recolección de datos	Utilización de palabras claves y combinaciones como <i>biochar</i> , <i>pirolisis</i> , <i>chlorella vulgaris</i> ; en la base de datos seleccionadas.
Filtrado y selección de estudios	Aplicación de criterios de inclusión y exclusión basados en los objetivos específicos y las características de la población definida.
Análisis bibliométrico	Empleo de herramientas y software de análisis bibliométrico (como VOSviewer) para mapear y visualizar las relaciones entre estudios, autores, instituciones y palabras claves.
Interpretación de resultados	Análisis de los datos recopilados para identificar tendencias, brechas en la investigación y áreas emergentes, proporcionando una visión comprensiva del estado actual del crecimiento de este campo.

Delimitación de la Población

Tabla 3. Aspectos esenciales que se deben considerar para delimitar la población.

ASPECTO	DESCRIPCIÓN
Ámbito temporal	Poblaciones desde el año 2004 hasta la fecha actual

Tipos de publicaciones	Artículos científicos, revisiones, tesis y actas de conferencias. Excluye editoriales, cartas al editor y resúmenes de congresos sin texto completo disponible.
Fuentes de datos	Bases de datos: Scopus, Web of science, PubMed, Google Scholar, SciELO.
Ámbito geográfico	Estudios de todas las regiones geográficas.
Idioma	Publicaciones en inglés y español.

3.2.3 Tipo de Muestra

Se utilizará una muestra compuesta por publicaciones científicas obtenidas a base de datos académicos reconocidos. Los criterios de inclusión y exclusión para seleccionar la muestra serán las siguientes fuentes de datos:

- Web of Science
- Scopus
- PubMed
- Google Scholar
- Scielo

Tabla 4. Criterios de inclusión y exclusión utilizados para seleccionar las publicaciones científicas en la revisión bibliométrica.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN	CRITERIOS DE EXCLUSIÓN
Tipo de documento: Artículos de revistas, capítulos de libros y actas de conferencias.	Tipo de documentos: Editoriales, resúmenes de congresos sin texto completo disponible, cartas al editor.
Idioma: Publicaciones en inglés y español.	

Relevancia Temática: Estudios que aborden específicamente Producción y utilización de Biochar mediante pirolisis a partir de <i>Chlorella Vulgaris</i> .	Relevancia temática: Estudios que no aborden directamente la producción y utilización de Biochar a partir de <i>Chlorella vulgaris</i> mediante pirolisis.
Periodo de Publicación: Publicaciones comprendidas entre el 2004-2024 para asegurar la actualidad y relevancia de la información.	Periodo de publicación: Publicaciones anteriores al año 2004.

3.2.4 Tamaño de la Muestra

Para llevar a cabo la revisión bibliométrica, se establecerá una muestra compuesta por artículos científicos, tesis, conferencias y otros documentos académicos relevantes que aborden el tema de la Relevancia temática: Estudios que nos aborden directamente la producción y utilización de Biochar a partir de *Chlorella vulgaris* mediante pirolisis. Se espera que el tamaño de la muestra sea de al menos 100 publicaciones, obtenidas a base de datos científicos como Scopus, Web of Science, PubMed y Google Scholar.

3.2.5 Proceso de Selección de la Muestra

Búsqueda de Literatura: Realizar búsquedas sistemáticas en bases de datos científicas utilizando palabras claves como: "*Biochar*", "*Pyrolysis*", "*Chlorella vulgaris*".

3.2.5.1 Criterios de Inclusión

- Artículos de revistas, capítulos de libros y actas de conferencias.
- Publicaciones en inglés y español.

- Estudios que aborden específicamente producción y utilización de biochar a partir de *chlorella vulgaris* mediante pirolisis.
- Publicaciones comprendidas entre el 2004-2024 para asegurar la actualidad y relevancia de la información.

3.2.5.2 Criterios de Exclusión

- Editoriales, resúmenes de congresos sin texto completo disponible, cartas al editor.
- Estudios que no aborden directamente la producción y utilización de biochar a partir de *chlorella vulgaris* mediante pirolisis.
- Publicaciones anteriores al año 2004.

3.3 Métodos y Técnicas

Análisis Bibliométrico:

Se llevará a cabo en análisis bibliométrico detallado utilizando herramientas y software especializados como VOSviewer. Este análisis incluye:

Análisis de Autoría y Colaboración: Identificación de los autores más prolíficos, instituciones líderes y colaboradores internacionales en el campo.

Frecuencia y Distribución Temporal: Análisis de la frecuencia de publicaciones por año para identificar tendencias y evolución temporal del interés en el tema.

Análisis de Contenido: Clasificación y análisis contenidos en la producción y utilización de biochar a partir de *chlorella vulgaris* mediante pirolisis.

Análisis de Redes: Mapeo de coautoría y redes de colaboración entre instituciones para visualizar las relaciones entre estudios, autores e instituciones.

3.4 Procesamiento Estadístico de la Información

Se realizarán un procesamiento estadístico detallado de los datos recopilados, incluyendo:

Análisis Descriptivo: Estadísticas básicas como la frecuencia de publicaciones por año, distribución geográfica de los estudios y análisis de palabras claves y temas recurrentes.

Análisis de Redes: Utilización de análisis de co-citación para identificar las publicaciones y autores más influyentes en el campo.

Análisis de Impacto: Evaluación de métricas de impacto como el índice H, número de citas por publicación y factores de impacto de las revistas donde se publican los estudios.

Estadísticas Inferenciales: Aplicación de pruebas estadísticas como correlaciones y regresiones para evaluar la relación significativa entre las condiciones de producción y utilización del biochar.

Este enfoque metodológico garantizará una revisión bibliométrica exhaustiva y rigurosa sobre la producción y utilización de biochar a partir de la *chlorella vulgaris*; proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en el área de remediación ambiental.

CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados

4.1 Análisis de Resultados



GRAFICO 9: Resumen principal de los documentos revisados

Se recuperaron un total de 642 documentos de la base de datos Scopus que abarcan la última década. Sin embargo, se eliminaron un total de 6 documentos de los datos recuperados debido a que no califican para ser utilizados en el análisis, ya sea porque están incompletos o no caen dentro del alcance del estudio. Se eligió el método de recuento fraccional para el análisis de coocurrencia en el VOSviewer utilizado para el estudio. En el grafico 9 se presenta un resumen de la información principal de los datos recuperados.

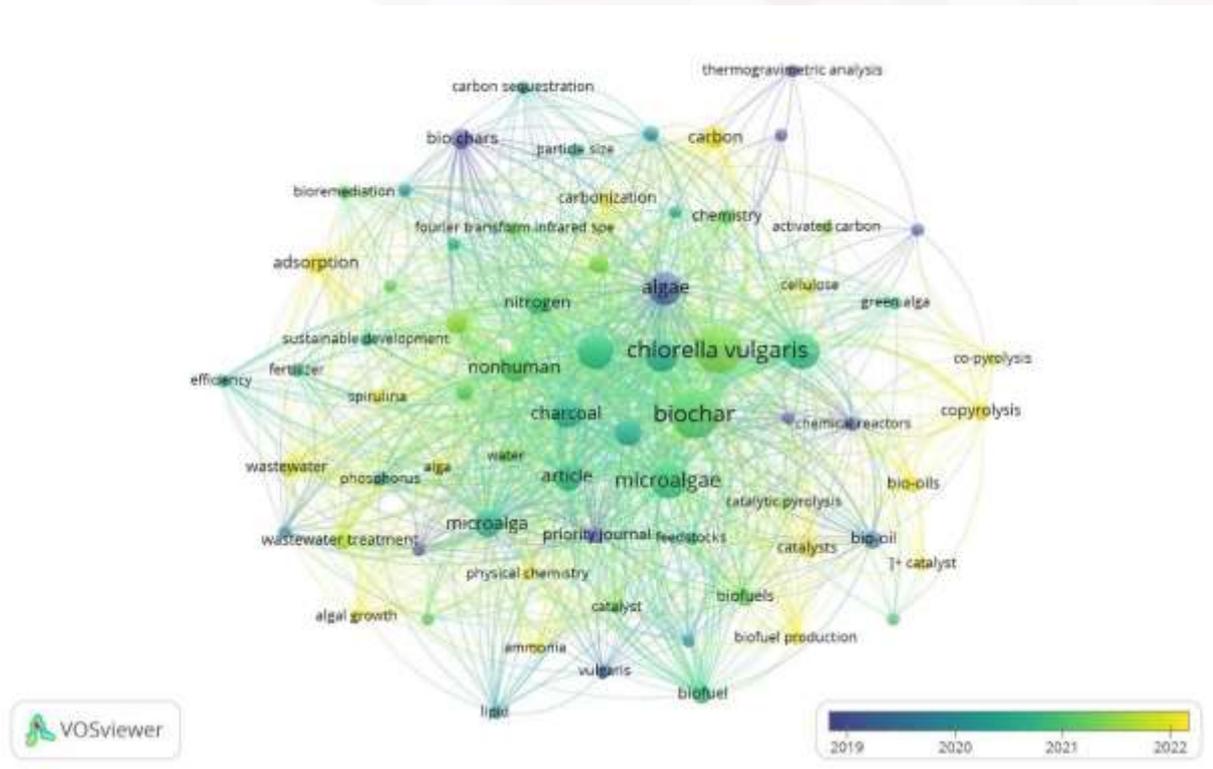


GRAFICO 10: Relación entre artículos científicos mediante frecuencia de palabras claves. (2019-2022)

En el grafico 10, la red presenta una alta densidad de conexiones, lo que indica una fuerte interconexión entre las publicaciones y un área de investigación bien establecida. Esta densidad sugiere que existe un cuerpo sustancial de conocimiento sobre la producción y utilización de biochar.

Nos muestra una tendencia clara hacia un aumento en la cantidad de publicaciones relacionadas con la producción de biochar mediante pirolisis a lo largo del tiempo. Este aumento refleja el creciente interés en esta área de investigación, durante el 2016 a 2024. Se pueden identificar períodos específicos dentro de la distribución temporal que coinciden con eventos o avances importantes en el campo. Por ejemplo, un aumento repentino en las publicaciones podría estar asociado a la publicación de un estudio innovador o al desarrollo de una nueva tecnología de producción a tendencia hacia la investigación de biochar más sostenibles y su efecto en la remediación ambiental y en la agricultura.

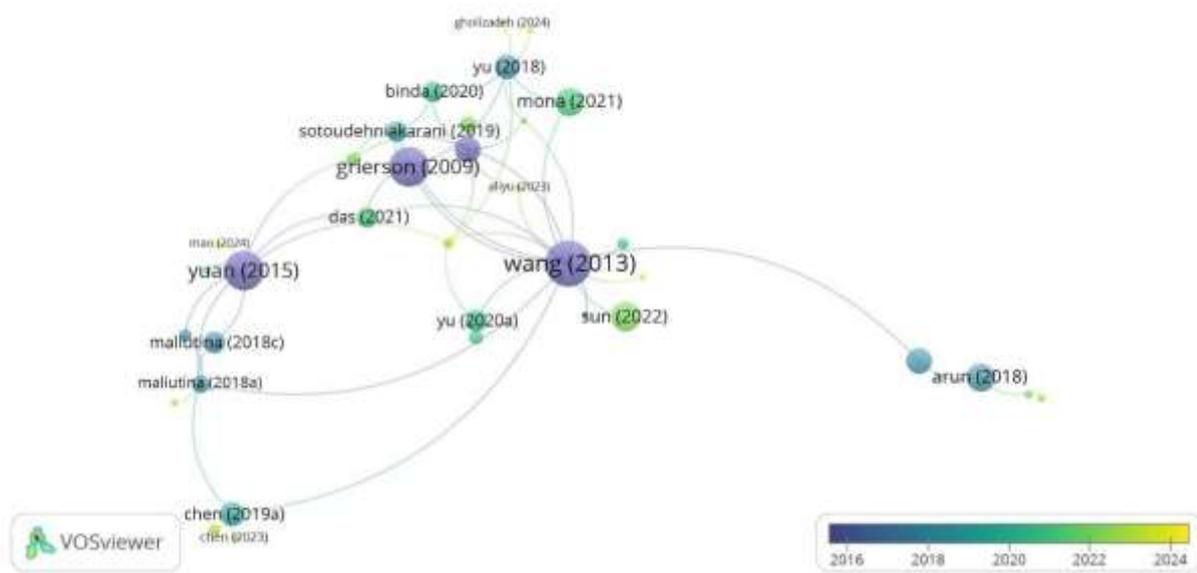


GRAFICO 11: Autores y colaboraciones temporales de sus artículos durante el periodo 2016 – 2024.

En el grafico 11, se muestra una red de coautoría donde cada nodo representa a un autor y los enlaces indican colaboraciones entre ellos; Wang (2013) es el trabajo más influyente en esta red. Su tamaño y las numerosas conexiones indican que ha sido citado por muchas otras publicaciones posteriores, sugiriendo que este trabajo es una base importante en el campo.

Los trabajos más recientes, como Mao (2024) y Aliyu (2023), están conectados a trabajos anteriores, lo que indica que estas investigaciones están construyendo sobre la base establecida por autores como Wang (2013) o Yuan (2015).

Las publicaciones más alejadas, como Arun (2018), están menos conectadas al grupo central, lo que podría significar que se enfocan en un área más especializada o menos central dentro del campo de investigación principal.

Grierson (2009) y Yuan (2015) también son puntos importantes en la red, sugiriendo que estos trabajos han tenido un impacto considerable en la evolución de las investigaciones posteriores.

En resumen, este gráfico muestra la evolución de un campo de investigación, donde ciertos trabajos clave como Wang (2013) actúan como pilares que han influido en una gran cantidad de estudios recientes, y el color de los nodos indica la temporalidad de estas influencias.

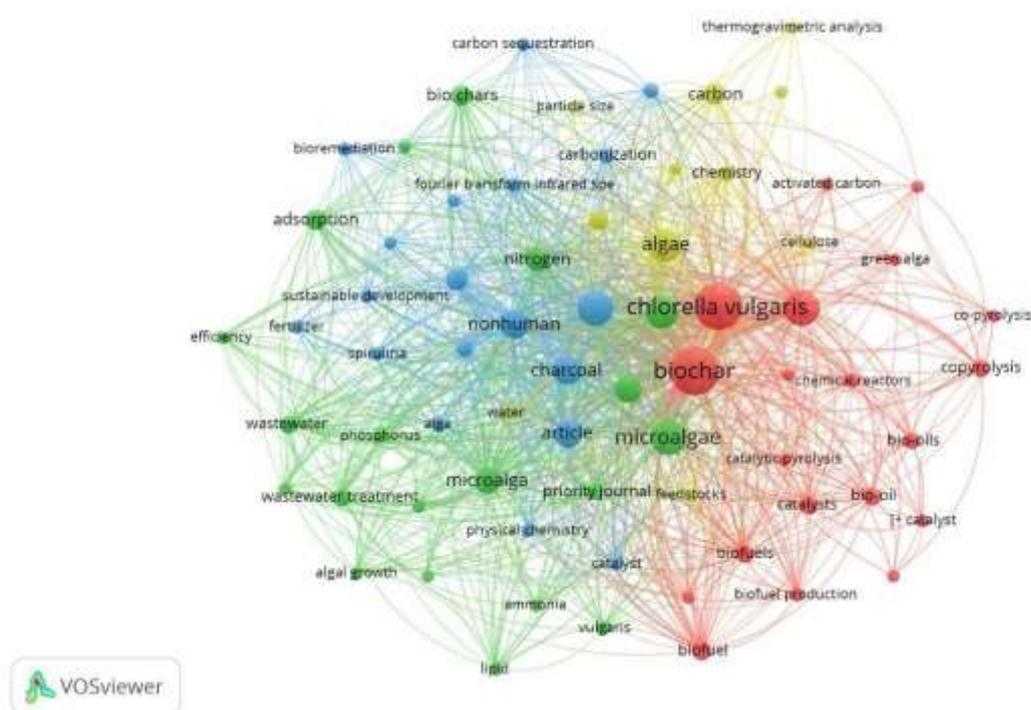


GRAFICO 12: Mapa de palabras clave sobre las interacciones entre bacterias y otros microorganismos (Vosviewer 2024)

El gráfico 12 permite identificar los términos clave más utilizados en la literatura científica sobre la producción y utilización de biochar usando como alga *Chlorella vulgaris*. El análisis de estas palabras clave puede proporcionar información valiosa sobre los tipos de interacciones más estudiadas, los mecanismos subyacentes y las implicaciones en el campo de estudio. Se muestra las palabras clave como nodos de diferentes tamaños y colores. El tamaño de un nodo indica la frecuencia con la que aparece la palabra clave en los estudios analizados. Los colores de los nodos

representan la agrupación temática de las palabras clave. Las líneas que conectan los nodos indican la frecuencia con la que aparecen juntas en los mismos estudios. El análisis del mapa de palabras clave revela que los temas más relevantes en la investigación sobre las interacciones entre biochar y *Chlorella vulgaris* se relacionan con: microalga, biorremediación, alga, biodiesel. También muestra que existen relaciones entre los diferentes temas. Por ejemplo, microalga y biorremediación están estrechamente relacionadas, lo que indica que estos temas son a menudo estudiados juntos.

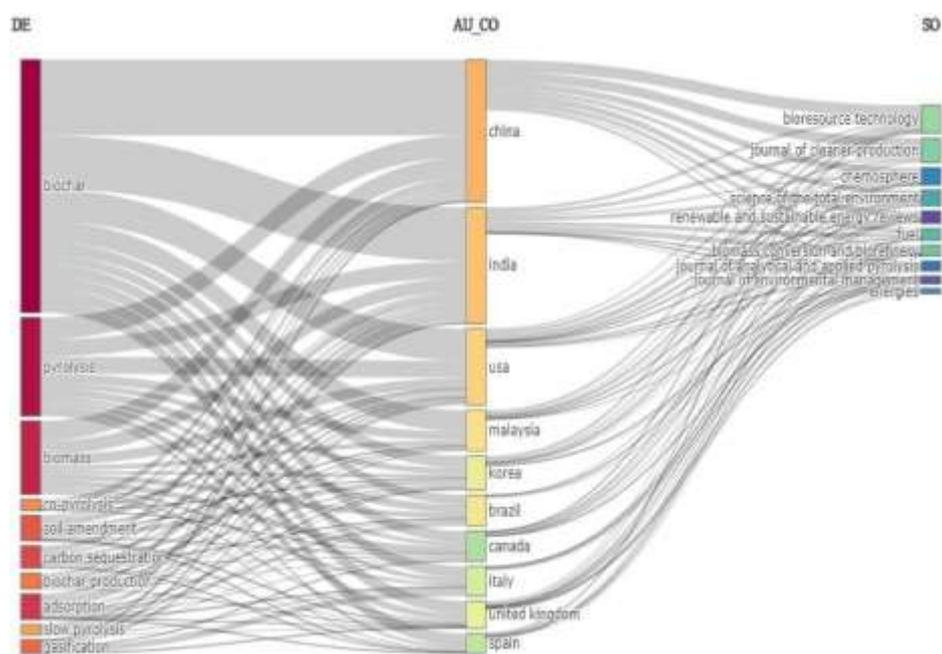


GRAFICO 13: Estudios realizados en diferentes países.

El gráfico 13 de campo de árbol nos presenta la relación entre las distintas palabras claves de los autores, los países y las revistas en las que se publican. La altura del nodo rectangular es proporcional a la frecuencia de una palabra clave, país y revista en particular en la red de colaboraciones dentro del período de estudio. China, India y Estados Unidos son los principales países en los que se realizaron estos estudios.

Revistas como Bioresource Technology, Journal of Cleaner Production, Chemosphere y Science of the Total Environment son las principales fuentes de las que los científicos publicaron estos estudios.

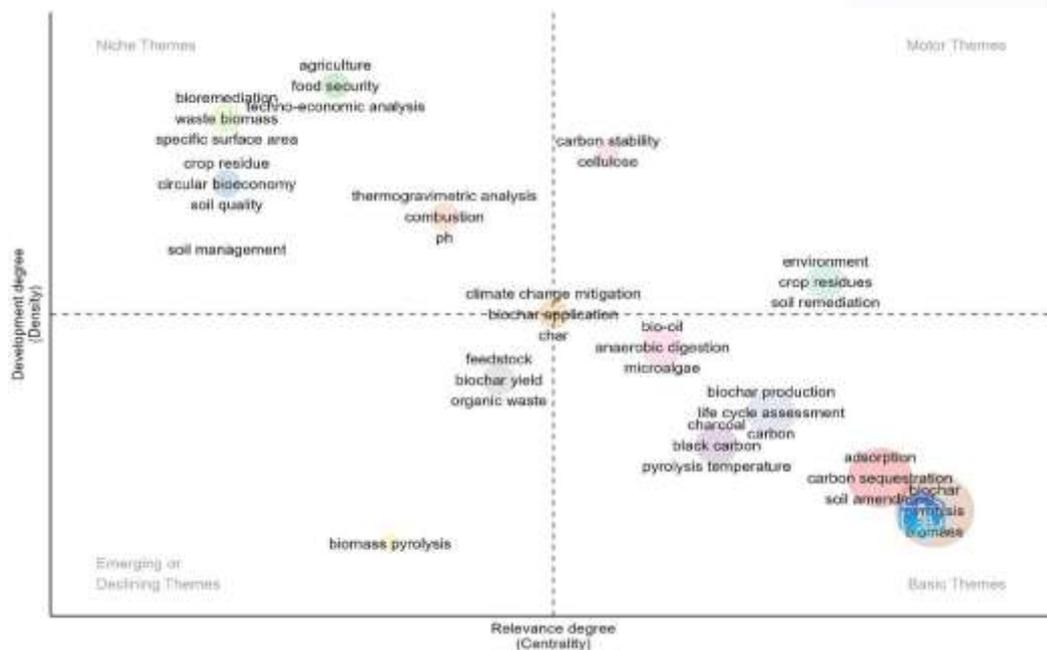


GRAFICO 14: Enfoque temático en la producción y aplicaciones de biocarbón

Este segmento (grafico 14) evalúa los temas que lideran el espacio de investigación, así como las áreas en las que se concentran los investigadores dentro del período de estudio. Presenta un análisis detallado de la evolución de los diversos temas dentro del período de estudio, dividiéndolo en cuatro categorías diferentes a saber, temas motores, temas de nicho, temas emergentes o en declive y temas básicos. La evaluación temática emplea las palabras clave de los autores y sus vínculos para obtener los temas. Los temas tienen las siguientes propiedades: centralidad y densidad. El eje vertical indica la densidad, mientras que el eje horizontal representa la centralidad.

El nivel de correlación entre los diversos temas es la centralidad, mientras que la cohesión de los nodos mide la densidad. Ambos evalúan si alguno de los temas es importante o no, o bien desarrollado o no. El número de relaciones que posee un nodo con otros dentro de la red determina su nivel de importancia y centralidad. Según el diagrama temático, temas como el cambio climático, la aplicación del biocarbón y el carbón son fundamentales para los investigadores que han llevado a cabo sus estudios sobre el biocarbón durante el período de estudio. Esto no es extraño, ya que los investigadores, científicos y gobiernos están encontrando fuentes de energía ecológicas, sostenibles, baratas y accesibles para satisfacer la creciente demanda. El cuadrante de temas motores presenta temas que tienen alta densidad y centralidad; dichos temas están bien desarrollados y son importantes para la estructuración de la investigación. El algoritmo formó un total de dos grupos en el cuadrante de temas motores. Temas como la estabilidad del carbono, el entorno de celulosa, los residuos de cultivos y la remediación del suelo aparecen en los temas motores. Los siguientes factores determinan la estabilidad del carbono en el biocarbón: el estrés del medio ambiente que se impone al carbono en el suelo o en otras aplicaciones; y las propiedades del biocarbón, lo que implica la resistencia de los compuestos del carbono presente en el biocarbón a la degradación abiótica y biótica.

El cuadrante de temas de nicho, que es un tema periférico y muy especializado, es específico del área de estudio. Se formaron cuatro grupos en este cuadrante, con temas como la agricultura y la seguridad alimentaria en un grupo. Aumentar la producción y el uso de bioenergía podría competir directa o indirectamente con el sector alimentario. La seguridad alimentaria y los precios pueden verse afectados por cualquiera de los dos efectos (es decir, directa o indirectamente) si la demanda de

cultivos o tierras aumenta significativamente. Esto ha sido un desafío y una preocupación importantes para el desarrollo de biocombustibles, que dependen de cultivos alimentarios como materias primas [129–132]. Temas como la biorremediación, el análisis tecno económico, la biomasa de desechos y las áreas de superficie específicas también caen dentro de otra categoría. El desempeño técnico y la viabilidad económica de las plantas de energía son clave para el desarrollo de dichas instalaciones. El biocarbón ha sido identificado como un producto rentable y rico en carbono que puede usarse en la biorremediación de metales pesados en el suelo. Los residuos de cultivos, la bioeconomía circular, la calidad del suelo y la gestión del suelo aparecieron en el segundo grupo. Estos son temas periféricos que se relacionan con la producción y aplicación del biocarbón.

Los temas en declive y emergentes se presentan en el cuadrante inferior izquierdo. Los temas que aparecieron en ese cuadrante se agruparon en grupos; estos son materia prima, rendimiento de biocarbón y desechos orgánicos, que están todos agrupados en un grupo y están más centralizados. La pirólisis de biomasa también apareció en el segundo grupo. Estos temas probablemente podrían denominarse temas emergentes en el campo, ya que ahora se está proponiendo el uso de biocarbón para aplicaciones a gran escala en varias áreas. Por lo tanto, los investigadores están intensificando sus estudios sobre la mejora del rendimiento del biocarbón y la identificación de diversas materias primas para la producción de biocarbón. En el cuadrante de temas básicos aparecieron cinco grupos diferentes. Estos temas son temas transversales, generales y básicos en el área de investigación. El bio-oil, la digestión anaeróbica (DA) y las microalgas se encuentran dentro del mismo grupo. El bio-oil y el biocarbón son productos del proceso de pirólisis. El biocarbón se utiliza como aditivo en la DA para mejorar la producción de

biogás. La DA es un método bioquímico conocido que transforma la biomasa biodegradable en biocombustible en condiciones limitantes de oxígeno. En la biorrefinería de microalgas, el cultivo de microalgas y biomasa para la conversión en biocarbón es uno de los posibles mecanismos para el secuestro de carbono. En la producción de biocarbón, se utiliza más CO₂ en el cultivo de biomasa de microalgas. El biocarbón de microalgas se produce cuando la biomasa de microalgas se descompone térmicamente bajo el suministro de oxígeno limitado a una temperatura relativamente baja. El siguiente grupo en los temas básicos con la densidad más alta de este estudio.

El análisis de ciclo de vida se compone de temas como la producción de biocarbón, la evaluación del ciclo de vida (ACV) y el carbono. Las preocupaciones ambientales negativas ocasionadas por el suministro de servicios y productos en la sociedad han hecho necesario el desarrollo de nuevos métodos y herramientas para evaluar y comprender su impacto. El ACV es una evaluación y recopilación de insumos y resultados, así como el impacto ambiental de los sistemas o productos durante su ciclo de vida.

Country Scientific Production

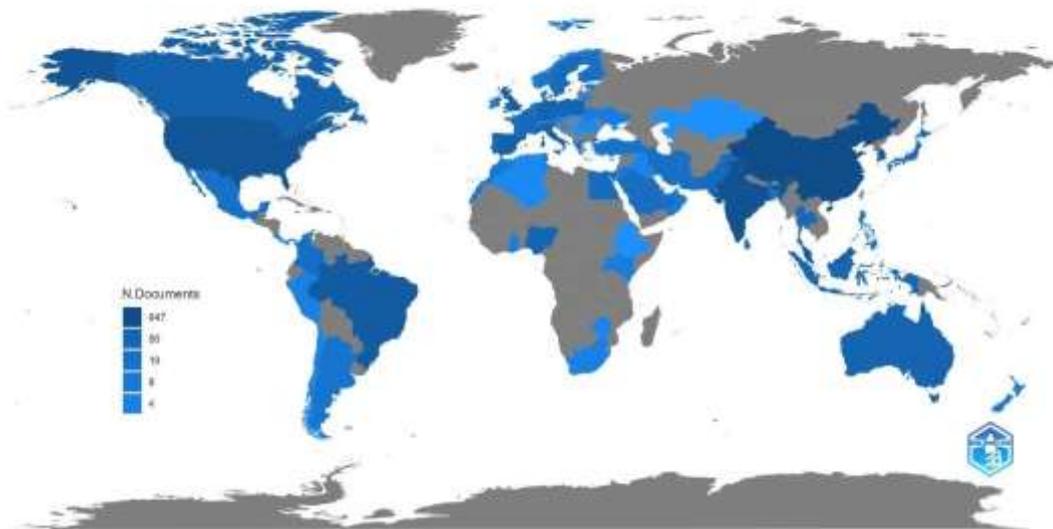


GRAFICO 15: Producción científica de cada país.

Según los resultados, la palabra clave “biocarbón” se asocia principalmente con autores con instituciones en China; esto se confirma por el número de producciones científicas como se presenta en el grafico 15. A China le sigue India; ambos registraron frecuencias de 647 y 382, respectivamente. Esta tendencia puede asociarse con la naturaleza de rápido desarrollo de Asia y el Pacífico. China e India están expandiendo actualmente sus sectores agrícolas.

Se espera que las iniciativas gubernamentales y los proyectos de investigación y desarrollo desempeñen un papel clave en la creación de la conciencia deseada sobre el biocarbón entre los agricultores. Se estima que el tamaño del mercado del biocarbón en Asia Pacífico aumentará a una tasa de crecimiento anual compuesta del 13,2 % entre 2022 y 2031, que se espera que sea el crecimiento más alto. Este crecimiento en la región de Asia y el Pacífico se debe al crecimiento de la región en los sectores industrial, agrícola y ganadero. Estos desarrollos podrían ser parte de las razones por las que la investigación en los países de esa región es líder. Estados Unidos (293), Malasia (161), Brasil (147), Corea del Sur (123), Reino Unido (112),

Italia (106), España (100) y Canadá (85) le siguieron en ese orden, representando los 10 países principales en el uso de palabras clave específicas relacionadas con la producción y el uso de biocarbón.

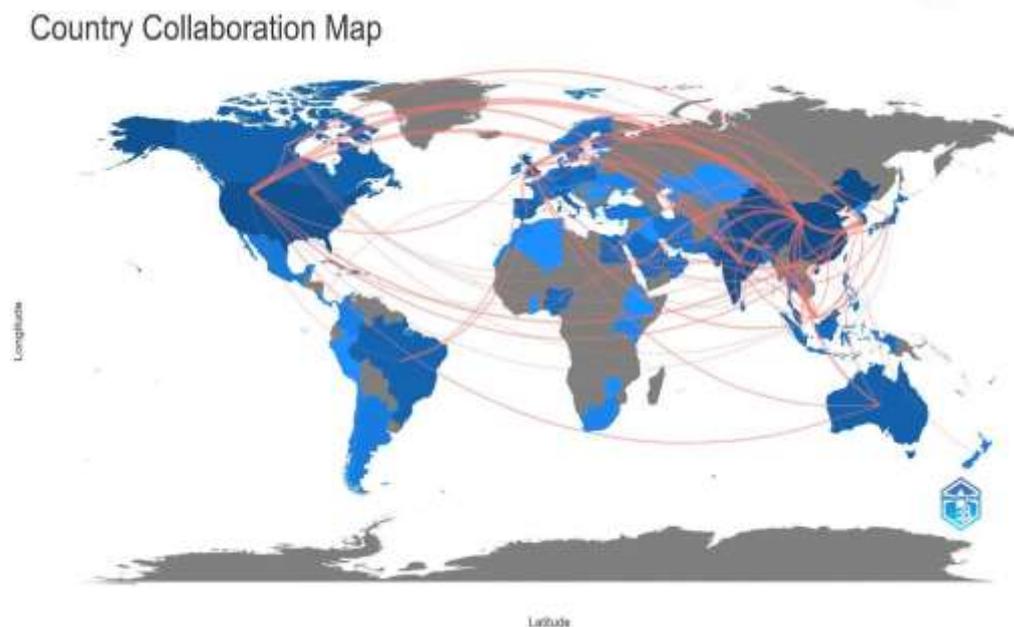


Gráfico 16: Mapa de colaboración entre países

El mapa de colaboración de los países se presenta en el gráfico 16. La intensidad de los trabajos publicados de un país se demuestra a través de la intensidad del color azul. El grosor de la línea roja muestra la fuerza de la frecuencia de colaboración. China y Estados Unidos registraron la mayor frecuencia de colaboración (26), seguidos de China e India; China y Malasia le siguieron con una frecuencia de 15 cada uno. China y Corea registraron una frecuencia de 11, y China y el Reino Unido le siguieron con una frecuencia de colaboración de 10. Los países restantes en este espacio de investigación cayeron por debajo de una frecuencia de 10.

CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones

5.1. CONCLUSIONES

Un enfoque bibliométrico sobre la producción y utilización de Biochar a partir de *Chlorella Vulgaris* mediante pirolisis, revela diversas tendencias y conclusiones clave en cuanto a la investigación y desarrollo de este campo. Los estudios sobre la producción de Biochar han demostrado un aumento significativo en las publicaciones en los últimos años; esto refleja el creciente interés en el uso de la biomasa renovable y soluciones sostenibles para la remediación ambiental.

Los resultados del estudio indican que China e India fueron los países líderes en el campo de investigación durante el período de estudio. Esta concentración de publicaciones en estos países, indica un fuerte interés y capacidad de investigación en estas regiones. La aportación general sugiere el uso del biocarbón en la remediación ambiental es una área de interés universal. Se espera que las iniciativas gubernamentales y los proyectos de investigación y desarrollo desempeñen un papel clave en la creación de la conciencia deseada sobre el biocarbón entre los agricultores.

BIOCARBON es la palabra clave principal que surge tanto en la nube de palabras como en la visualización de la red. Se ha registrado una tasa de crecimiento anual considerable en la investigación durante el periodo de estudio, lo que indica un interés significativo en el campo de investigación por parte de los investigadores. Los resultados indican que la investigación sobre el biocarbón se ha diversificado en los últimos años, con estudios que analizan diferentes aspectos de la producción, utilización y economía del biocarbón. Algunos temas que se han analizado en los

últimos años son: biocarbón, secuestro de carbono, adsorción, copirólisis, ACV, conversión térmica, tratamiento de aguas residuales, microalgas, impacto ambiental y análisis tecno económico, entre otros. Los beneficios ambientales y agronómicos del biocarbón se han investigado en profundidad durante el periodo de estudio.

La distribución de publicaciones por autores nos muestra que un grupo selecto de investigadores han contribuido significativamente a este campo. Autor como Wang (2013) es el trabajo más influyente en esta red, su tamaño y las numerosas conexiones indican que ha sido citado por muchas otras publicaciones posteriores, sugiriendo que este trabajo es una base importante en el campo.

Los trabajos más recientes, como Mao (2024) y Aliyu (2023), están conectados a trabajos anteriores, lo que indica que estas investigaciones están construyendo sobre la base establecida por autores como Wang (2013) o Yuan (2015).

Los autores más prolíferos pueden ser considerados líderes en este campo y son potenciales colaboradores para futuras investigaciones.

5.2. RECOMENDACIONES

Se requieren más estudios orientados hacia la optimización rentable de las diversas propiedades del biocarbón, considerando factores clave como las condiciones operativas del proceso, el tipo de materia prima utilizada y la funcionalización necesaria para mejorar su desempeño. Es crucial comprender que parámetros como la temperatura, el tiempo de residencia y la atmosfera durante la pirolisis afectan las propiedades físicas y químicas del biocarbón. Además, el tipo de biomasa empleada tiene un impacto significativo en su estructura porosa y su capacidad de adsorción, por lo que la selección de materia primas adecuadas es de vital importancia.

Asimismo, la funcionalización del biocarbón mediante la incorporación de grupos funcionales específicos o el tratamiento post – pirolisis puede aumentar su capacidad para absorber contaminantes. Sin embargo, para que estos procesos sean económicamente viables, es esencial evaluar cuidadosamente los costos asociados a la producción y modificación del biocarbón, optimizando el proceso de tal manera que se maximicen sus beneficios sin comprometer la sostenibilidad.

Es necesario ampliar los estudios sobre el impacto del biocarbón en el medio ambiente y trasladarlos más allá de las condiciones controladas de laboratorio. Evaluar su efecto en entornos reales es fundamental para proporcionar a las partes interesadas una comprensión más precisa de su impacto sobre los microorganismos presentes en los ecosistemas naturales. Estos estudios en condiciones reales permitirán detectar posibles cambios en la biodiversidad microbiana, la calidad del suelo y el ciclo de nutrientes, que podrían pasar desapercibidos en ensayos de laboratorio.

Además, esta investigación ayudara a los científicos, reguladores y usuarios finales a identificar las posibles consecuencias para la salud humana y ambiental asociadas con el uso masivo de biocarbón. Comprender como el biocarbón interactúa con los ecosistemas a gran escala es clave para anticipar cualquier riesgo potencial y garantizar su aplicación de manera segura y sostenible en la remediación de suelos y otros ámbitos.

Existe una notable escasez de información sobre los posibles riesgos asociados con la producción y el uso de biocarbón, lo que plantea la necesidad de llevar a cabo estudios exhaustivos que evalúen tanto los riesgos como los costos en el sector. Estos estudios deberían abordar aspectos como la emisión de compuestos volátiles

durante la pirolisis, la toxicidad potencial del biocarbón modificado y sus efectos a largo plazo sobre el suelo, el agua y los organismos vivos. Además, es fundamental analizar los costos relacionados con su producción, incluyendo la adquisición de materias primas, la energía necesaria para el proceso y las tecnologías de funcionalización, en relación con los beneficios ambientales.

Evaluar estos factores permitirá a los actores del sector tomar decisiones informadas, promoviendo una adopción segura y eficiente del biocarbón en diversas aplicaciones industriales y ambientales. A su vez, un análisis exhaustivo de los riesgos contribuirá a establecer regulaciones adecuadas y a garantizar que la implementación del biocarbón se lleve a cabo de manera sostenible y rentable.

BIBLIOGRAFIA

- O'Connor D, Peng T, Zhang J, Tsang DCW, Alessi DS, Shen Z, et al. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: a review of in situ field trials. *Sci Total Environ* 2018;619–620:815–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.132>.
- Meyer S, Glaser B, Quicker P. Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: a literature review. *Environ Sci Technol* 2011;45:9473–83. <https://doi.org/10.1021/es201792c>.
- Lehmann J, Cowie A, Masiello CA, Kammann C, Woolf D, Amonette JE, et al. Biochar in climate change mitigation. *Nat Geosci* 2021; 14:883–92. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>.
- Mishra RK, Mohanty K. A review of the next-generation biochar production from waste biomass for material applications. *Sci Total Environ* 2023;904:167171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167171>.
- Biochar International. Biochar production and by-products – Biochar for Sustainable. Biochar International. Biochar production and by-products – Biochar for Sustainable Soils n.d. <https://biochar.international/the-biochar-opportunity/biochar-production-and-by-products/>(accessed July 2, 2023).
- Wang X, Lu J, Song Z, Zhou Y, Liu T, Zhang D. From past to future: bibliometric analysis of global research productivity on nomogram (2000–2021). *Front Public Health* 2022:10.
- The Brainy Insights. Biochar market size by technology (pyrolysis, gasification systems, and others), by application (agriculture, animal farming, industrial uses, and other applications), global industry analysis, share, growth, trends, and forecast 2022 to 2030. <https://www.thebrainyinsights.com/report/biochar-market-13099>. [Accessed 26 July 2023].

- Rabia Rehman, Javed Iqbal, Muhammad Saif Ur Rehman¹, Shanawar Hamid², Yuze Wang, Kashmir Rasool and Tahir Fazal, Algal-biochar and *Chlorella vulgaris* microalgae: a sustainable approach for textile wastewater treatment and biodiesel production. Received: 16 November 2023 Revised: 30 May 2024 Accepted: 12 June 2024. Published online: 02 July 2024.
- González-Delgado, A. D., Barajas-Solano, A. F., & Ardila-Álvarez, A. M. (2017). Producción de biomasa y proteínas de *Chlorella vulgaris* Beyerinck (Chlorellales: Chlorellaceae) a través del diseño de medios de cultivo selectivos. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 451-461
- Shandira Araceli Delgado Álvarez, Jeferson Antonio Flores Zúñiga, Italo Treviño-Zevallos. The pyrolysis methods in the transformation of wasteplastics for obtaining fuels, a literature review. COSTA RICA, July 17 - 19, 2024.
- Bhavani P, Hussain M, Park Y-K. Recent advancements on the sustainable biochar based semiconducting materials for photocatalytic applications: a state of the art review. *J Clean Prod* 2022; 330:129899. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129899>.
- Wojciech Moroń, Wiesław Ferens. Analysis of fire and explosion hazards caused by industrial dusts with a high content of volatile matter. Received 1 March 2023; Received in revised form 28 July 2023; Accepted 31 July 2023 (<http://creativecommons.org/licenses/bync/4.0/>).
- Yadav G, Sen R. Microalgal green refinery concept for biosequestration of carbon-dioxide vis-à-vis wastewater remediation and bioenergy production: recent technological advances in climate research. *J CO2 Util* 2017; 17:188–206. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.12.006>.
- Osman AI, Fawzy S, Farghali M, El-Azazy M, Elgarahy AM, Fahim RA, et al. Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water

treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review. *Environ Chem Lett* 2022; 20:2385–485. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x>.

- Zhang C, Liu L, Zhao M, Rong H, Xu Y. The environmental characteristics and applications of biochar. *Environ Sci Pollut Res* 2018; 25:21525–34. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2521-1>.
- Nan H, Wang L, Luo D, Zhang Y, Liu G, Wang C. A bibliometric analysis of biochar application in wastewater treatment from 2000 to 2021. *Int J Environ Sci Technol* 2023. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05030-4>.
- Nkomo N, Odindo AO, Musazura W, Missengue R. Optimising pyrolysis conditions for high-quality biochar production using black soldier fly larvae faecal-derived residue as feedstock. *Heliyon* 2021;7: e07025. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07025>.
- Patrik Soltic, Thomas Hilfiker, Yuri Wright, Gilles Hardy, Benjamin Fröhlich, Daniel Klein. The potential of dimethyl ether (DME) to meet current and future emissions standards in heavy-duty compression-ignition engines. Received 16 May 2023; Received in revised form 13 July 2023; Accepted 30 July 2023 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
- Ephraim Bonah Agyekum, Christabel Nutakor. Recent advancement in biochar production and utilization – A combination of traditional and bibliometric review. Received 4 August 2023; Received in revised form 24 November 2023; Accepted 28 November 2023, Available online 3 December 2023 (<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.335>).

- Roberts KG, Gloy BA, Joseph S, Scott NR, Lehmann J. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environ Sci Technol* 2010; 44:827–33. <https://doi.org/10.1021/es902266r>.