

Viabilidad de la producción energética sostenible a partir de microalgas en Colombia.

Luz Alejandra Angarita Rico

Director (a):

Luis Alejandro Duarte Rodríguez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

2025

Resumen

La creciente crisis ambiental y la alta dependencia de combustibles fósiles han intensificado los impactos del cambio climático, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para la producción energética. El propósito de este estudio es evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la producción de energía a partir de microalgas en el contexto colombiano. Para ello, se realizó una revisión documental sistemática apoyada en matrices de análisis comparativo, integrando información científica, datos institucionales y estudios de caso nacionales e internacionales.

Los resultados evidencian que especies como *Nannochloropsis oculata* y *Chlorella vulgaris* presentan un alto potencial técnico debido a sus elevados contenidos lipídicos y adaptabilidad a condiciones tropicales. Sin embargo, la viabilidad económica continúa siendo limitada, principalmente por los costos asociados al cultivo, la cosecha y la extracción de biomasa, los cuales solo resultan competitivos en escenarios de biorefinería con aprovechamiento de coproductos. En cuanto a la viabilidad ambiental, los análisis muestran reducciones significativas en la huella de carbono y oportunidades para el uso de aguas residuales, lo que mejora la sostenibilidad del proceso.

En conclusión, la producción de este biocombustible en Colombia es técnicamente factible y ambientalmente favorable, mientras que su viabilidad económica depende de la optimización tecnológica, la integración de energías renovables y el fortalecimiento de políticas e incentivos estatales. Estos resultados aportan una base sólida para orientar futuras investigaciones y proyectos piloto relacionados con bioenergías de tercera generación en el país.

Palabras clave: microalgas, biocombustibles, viabilidad técnica, sostenibilidad ambiental, Colombia.

Abstract

The growing environmental crisis and the strong dependence on fossil fuels have intensified the impacts of climate change, driving the search for sustainable alternatives for energy production. The purpose of this study is to evaluate the technical, economic, and environmental viability of energy generation from microalgae within the Colombian context. To achieve this, a systematic documentary review was conducted, supported by comparative analysis matrices that integrated scientific literature, institutional reports, and national and international case studies.

The results indicate that species such as *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* exhibit high technical potential due to their elevated lipid content and adaptability to tropical conditions. However, economic viability remains limited, mainly because of the high costs associated with cultivation, harvesting, and biomass extraction, which only become competitive under biorefinery schemes that incorporate coproduct valorization. Regarding environmental viability, the analyses show significant reductions in carbon footprint and opportunities for the use of wastewater, improving the overall sustainability of the process.

In conclusion, the production of biofuels from microalgae in Colombia is technically feasible and environmentally advantageous, while its economic viability depends on technological optimization, the integration of renewable energy sources, and the strengthening of public policies and incentives. These findings provide a solid foundation for guiding future research and pilot projects related to third-generation bioenergy in the country.

Keywords: microalgae, biofuels, technical viability, environmental sustainability, Colombia.

Tabla de Contenido

Justificación	12
Planteamiento del problema	14
Objetivos	16
Objetivo General	16
Objetivos Especificos	16
Introducción	17
Marco Teórico	19
Biología de las Algas	19
<i>Tipos de Algas y sus Características</i>	<i>19</i>
<i>Ciclo de Vida de las Algas</i>	<i>21</i>
Historia y Evolución de la Bioenergía	22
<i>Definición</i>	<i>22</i>
<i>Conversión de Biomasa Algal en Energía</i>	<i>22</i>
Marco Conceptual de las Variables de Investigación	23
<i>Condiciones Técnicas</i>	<i>24</i>
<i>Condiciones Económicas</i>	<i>24</i>
<i>Condiciones Ambientales</i>	<i>25</i>
Tecnologías y Procesos de Producción	26
Cultivo de Microalgas	26
<i>Métodos de Cultivo (autótrofo, heterótrofo, mixótrofo)</i>	<i>26</i>
<i>Sistemas de Cultivo</i>	<i>27</i>
Cosecha y Extracción	28
<i>Técnicas de Cosecha</i>	<i>28</i>
<i>Métodos de Extracción de Lípidos y Otros Componentes</i>	<i>29</i>
Conversión en Biocombustibles	30
<i>Producción de Biodiésel</i>	<i>30</i>
<i>Producción de Bioetanol</i>	<i>30</i>
<i>Producción de Biogás</i>	<i>30</i>
Procesos de Digestión Anaeróbica	31
<i>Tecnología de Digestores</i>	<i>31</i>
Metodología Propuesta	33
Enfoque Metodológico	33
Fuentes de Información	33
Criterios de inclusión y exclusión	34
Procedimiento de Comparación	34
<i>Matriz Comparativa de Especies</i>	<i>34</i>
<i>Matriz de Condiciones Ambientales y Geográficas</i>	<i>34</i>
<i>Matriz de análisis de viabilidad</i>	<i>35</i>

<i>Estrategia para Medir la Viabilidad:</i>	35
<i>Procedimiento de Análisis Comparativo</i>	37
Justificación del Método	38
Análisis de Viabilidad	39
Viabilidad Técnica	39
<i>Radiación Solar</i>	39
<i>Temperatura</i>	40
<i>Especies Nativas con Potencial Energético</i>	40
<i>Criterios para Seleccionar la Especie más Viable</i>	41
<i>Eficiencia Energética y Balance Eout/Ein</i>	42
<i>Disponibilidad de Recursos Hídricos</i>	42
Infraestructura y Tecnología Disponible	43
<i>Académica</i>	43
<i>Tecnologías Implementadas</i>	44
<i>Políticas y Planes Nacionales</i>	45
Viabilidad Económica	45
<i>Factores que Aumentan la Viabilidad Económica</i>	45
<i>Factores que Disminuyen la Viabilidad Económica</i>	46
Viabilidad Ambiental	46
<i>Captura de CO₂</i>	46
<i>Biorremediación</i>	47
<i>Reducción de Emisiones</i>	47
<i>Riesgos Ambientales Identificados</i>	47
Estudios Previos en Colombia	47
Estudio de Casos y Proyectos Piloto	49
<i>Evaluación Tecno-Económica de Biocombustibles por Medio de Microalgas</i>	49
<i>Producción de Biocrudo Mediante Licuefacción Hidrotérmica</i>	50
<i>Viabilidad de Fotobiorreactores Solares en el Valle del Cauca</i>	50
<i>Producción de Biocombustibles a Partir de Microalgas en el Tolima</i>	50
Impacto ambiental y sostenibilidad	52
Comparación entre Biomasa Microalgal y Fuentes Energéticas Convencionales	52
<i>Comparación entre Microalgas, Palma Africana y Diésel Fósil como Fuentes Energéticas</i>	53
Beneficios Ambientales	54
<i>Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)</i>	54
<i>Aprovechamiento de Recursos no Competitivos</i>	54
<i>Conservación del Suelo y Biodiversidad</i>	54
<i>Mitigación del Cambio Climático</i>	54
<i>Alta Eficiencia Energética</i>	54
<i>Desarrollo de Economías Circulares</i>	55
Reducción de Emisiones CO₂	55
<i>Captura Directa de CO₂ Industrial</i>	55

<i>Carbono Neutro</i>	55
<i>Mitigación del Cambio Climático</i>	55
Mejora de la Calidad del Agua	55
<i>Eliminación de Nutrientes</i>	56
<i>Reducción de Metales Pesados y Contaminantes</i>	56
<i>Reutilización de Aguas Residuales</i>	56
<i>Producción de Biomasa Durante el Tratamiento</i>	56
Desafíos y Consideraciones Ambientales	57
Impacto en Ecosistemas Acuáticos	57
<i>Impactos Positivos</i>	57
<i>Impactos Negativos</i>	57
Manejo de Residuos	58
<i>Aspectos Positivos</i>	58
<i>Aspectos Negativos</i>	59
Evaluación del Ciclo de Vida (LCA, Life Cycle Assessment)	59
<i>Fases del Ciclo de Vida</i>	59
Aspectos Evaluados en el LCA	63
<i>Consumo Energético Total</i>	63
<i>Impacto en el Cambio Climático</i>	64
<i>Uso de Recursos Naturales</i>	64
<i>Potencial de Reciclaje y Reutilización</i>	64
Desafíos y Oportunidades	65
Desafíos Técnicos y Científicos	65
<i>Cultivo y Escalabilidad</i>	65
<i>Cosecha y Pretratamiento</i>	66
<i>Conversión de Biomasa en Biocombustibles</i>	66
<i>Eficiencia Energética del Proceso</i>	66
<i>Variedad de Cepas y Genética</i>	67
Oportunidades de Innovación	67
<i>Biocombustibles de Tercera Generación</i>	67
<i>Producción de Hidrógeno Verde</i>	67
<i>Generación de Electricidad Mediante Bioceldas</i>	68
<i>Conversión de Microalgas en Biogás</i>	68
Colaboraciones y Alianzas Estratégicas	68
<i>HPCL y Sea6 Energy (India)</i>	68
<i>Proyecto SABANA – Universidad de Almería y Socios Europeos</i>	69
<i>Universidad de Cádiz (España)</i>	69
<i>Universidad de Arizona (EE.UU.)</i>	69
<i>Algafuture y Universidad de Málaga</i>	69
<i>Proyecto BioMara – Universidades del Reino Unido e Irlanda</i>	70
Futuro y Perspectivas	71

Optimización de Cultivos en Condiciones Tropicales	71
Reducción Progresiva de Costos Mediante Integración Productiva	71
Sinergias con Políticas Climáticas y Energéticas Nacionales	72
Diversificación de Productos para Fortalecer la Viabilidad Financiera	72
Fortalecimiento de la Investigación Aplicada y Cooperación Institucional	72
Escenarios de Escalamiento Gradual y Territorialmente Focalizado	73
Tendencias y Desarrollo Tecnológico	73
<i>Mejora en la Eficiencia del Cultivo</i>	73
<i>Tecnologías Avanzadas de Cosecha y Extracción</i>	74
<i>Integración de Sistemas Fotovoltaicos y Microalgas (Biofotovoltaicos)</i>	75
<i>Captura de Carbono y Biocombustibles Sostenibles</i>	75
<i>Desarrollo de Biocombustibles de Microalgas con Características Específicas</i>	76
<i>Tecnologías Emergentes en Biorreactores y Biorrefinerías</i>	76
Escalabilidad y Replicabilidad Global	77
<i>Escalabilidad</i>	77
<i>Replicabilidad Global</i>	78
<i>Barreras para la Escalabilidad y Replicabilidad</i>	80
Visión a Largo Plazo	80
<i>Sostenibilidad Energética Global</i>	81
<i>Integración con otras Fuentes de Energía Renovable</i>	81
<i>Avances Tecnológicos y Reducción de Costos</i>	81
<i>Diversificación Económica y Creación de Empleo</i>	82
<i>Replicabilidad y Expansión Global</i>	82
<i>Impacto Ambiental Positivo</i>	82
<i>Optimización Tecnológica</i>	83
<i>Desarrollo de Mercados Sostenibles</i>	83
Recomendaciones para el Futuro	83
<i>Mejorar la Eficiencia de los Procesos de Cultivo y Conversión</i>	84
<i>Incorporación de Sistemas de Economía Circular</i>	84
<i>Desarrollo de Políticas y Marcos Regulatorios de Apoyo</i>	84
<i>Fomento de Colaboraciones Multidisciplinarias y Alianzas Estratégicas</i>	84
<i>Explorar Nuevas Aplicaciones y Diversificación de Productos</i>	85
<i>Promover la Investigación en Genética de Microalgas y Biotecnología</i>	85
<i>Integración con Otras Energías Renovables</i>	85
Conclusiones	86
Referencias Bibliográficas	89
Apéndices	101

Lista de Tablas

Tabla 1 Criterios de viabilidad	36
Tabla 2 Beneficios del sistema de producción	36
Tabla 3 Criterios económicos	37
Tabla 4 Regiones con mayor potencial técnico	39
Tabla 5 Indicadores técnicos por especie evaluada	41
Tabla 6 Viabilidad de los recursos hídricos	42
Tabla 7 Comparativa entre biomasa algal y fuentes convencionales.....	52

Lista de Figuras

Figura 1 Esquema general de fotobiorreactores	27
Figura 2 Esquema de Flujo del Modelo de Evaluación de Viabilidad Tridimensional (MEVT).35	
Figura 3 Rango anual de disponibilidad de energía solar por regiones	40

Lista de Apéndices

Apéndice A Matriz comparativa de análisis documental – Viabilidad técnica	101
Apéndice B Matriz comparativa de análisis documental – Viabilidad económica	103
Apéndice C Matriz comparativa de análisis documental – Viabilidad ambiental.....	105
Apéndice D Viabilidad ambiental — Indicadores cuantitativos reportados	106
Apéndice E Viabilidad técnica — Productividad, composición y procesos	107
Apéndice F Viabilidad económica — Indicadores disponibles.....	108
Apéndice G Evaluación integrada según Modelo Tridimensional (MEVT).....	109
Apéndice H Comparación de especies evaluadas según criterios del MEVT	110
Apéndice I Indicadores claves para evaluar	111
Apéndice J Comparación de microalgas, palma africana y diésel fósil como fuentes energéticas según indicadores del MEVT	112

Justificación

La producción de energía a partir de microalgas representa una oportunidad estratégica para enfrentar los desafíos energéticos y ambientales del mundo contemporáneo. El aumento de la demanda energética, junto con la necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, exige el desarrollo de alternativas que sean verdaderamente sostenibles. En este contexto, estas microalgas se posicionan como una opción viable debido a su capacidad para generar biomasa sin competir por suelos agrícolas y con una eficiencia fotosintética superior a la de las plantas terrestres.

Las microalgas, pueden convertir entre el 3 % y el 8 % de la energía solar en biomasa — por encima del rendimiento promedio de las plantas terrestres, cercano al 0,5 %— y duplicar su biomasa en aproximadamente 24 horas (Hernández, 2019). Asimismo, pueden cultivarse en agua dulce, salada o residual, requiriendo significativamente menos agua que cultivos energéticos convencionales como el maíz. Esta versatilidad las convierte en un recurso atractivo para la producción de biocombustibles, particularmente biocrudos, los cuales presentan características fisicoquímicas comparables a las de los combustibles fósiles.

Otro elemento de relevancia es la capacidad de las microalgas para captar dióxido de carbono (CO₂) durante su crecimiento, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Adicionalmente, su aplicación en sistemas de tratamiento de aguas residuales aporta un valor ambiental agregado, al facilitar la remoción de nutrientes y mejorar la calidad del agua, integrando procesos de producción energética con estrategias de gestión ambiental.

La presente investigación busca visibilizar los avances desarrollados en Colombia en torno al uso de microalgas como fuente bioenergética y compararlos con experiencias internacionales, con el fin de identificar oportunidades para su aprovechamiento a nivel local. Al

centrar el análisis en los beneficios ambientales, la diversificación de la matriz energética y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, se pretende aportar una base técnica y científica sólida que contribuya a la promoción de alternativas energéticas sostenibles en el país.

Planteamiento del problema

La creciente demanda mundial de energía, impulsada por el aumento poblacional, el desarrollo industrial y la expansión urbana, ha intensificado la presión sobre los recursos naturales y ha profundizado los impactos ambientales asociados a su explotación. En particular, la producción energética basada en combustibles fósiles continúa generando efectos adversos significativos, entre ellos la contaminación del agua y del suelo, los derrames de hidrocarburos y las emisiones de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global.

Ante este panorama, resulta indispensable avanzar hacia fuentes energéticas sostenibles, eficientes y ambientalmente responsables. Entre las alternativas emergentes, los sistemas bioenergéticos de tercera generación, basados microalgas, destacan por su capacidad para generar biocombustibles, biogás y electricidad sin competir por suelos agrícolas y con un impacto ambiental relativamente menor en comparación con las fuentes convencionales. Estas características han motivado a diversos países a explorar su potencial dentro de estrategias de descarbonización y transición energética.

No obstante, el aprovechamiento energético de cultivos de microalgas enfrenta desafíos técnicos y económicos relevantes. Aspectos como el diseño de los sistemas de cultivo, la cosecha y concentración de biomasa, la extracción de compuestos energéticos y su conversión en combustibles presentan variabilidad en costos, eficiencia y requerimientos tecnológicos. A ello se suma que, en Colombia, la infraestructura productiva y las capacidades industriales asociadas a esta tecnología aún son incipientes, lo que demanda inversiones significativas y el fortalecimiento de políticas públicas orientadas al desarrollo de la bioeconomía.

Dado este contexto, surge la necesidad de evaluar alternativas energéticas que permitan reducir la dependencia de los combustibles fósiles y, simultáneamente, contribuir a la mitigación del cambio climático. En este marco, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Es viable implementar la generación de energía a partir de microalgas en Colombia, considerando las dimensiones técnica, económica y ambiental que condicionan su desarrollo?

En consecuencia, el presente estudio busca analizar la factibilidad de incorporar microalgas dentro del modelo energético colombiano, atendiendo a sus condiciones ambientales, los avances tecnológicos disponibles y las experiencias nacionales e internacionales. Este análisis permitirá determinar el papel que podría desempeñar la bioenergía microalgal en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el papel de las microalgas en el sector energético, evaluando su potencial como fuente alternativa y sostenible de energía, así como su viabilidad técnica, económica y ambiental en comparación con fuentes convencionales.

Objetivos Específicos

Identificar especies de microalgas con alto potencial energético mediante la determinación de su contenido de lípidos, carbohidratos y proteínas, con el fin de evaluar su idoneidad para la producción de biocombustibles y su posible incorporación en procesos de conversión energética.

Examinar la viabilidad técnica de las tecnologías de cultivo, cosecha y conversión de las microalgas, comparando sus ventajas y limitaciones con proyectos desarrollados en otros países, para determinar la implementación en Colombia.

Valorar el impacto ambiental asociado a la producción de energía a partir de microalgas mediante la evaluación de la huella de carbono, el uso de recursos naturales y los posibles efectos sobre los ecosistemas acuáticos, con el propósito de identificar estrategias que minimicen los impactos y favorezcan su adopción como alternativa energética limpia y renovable.

Introducción

La producción de energía a partir de microalgas ha ganado creciente interés a nivel mundial debido a su potencial como fuente renovable y sostenible (Chisti, 2007). Este enfoque resulta especialmente relevante en países como Colombia, donde la alta biodiversidad y las condiciones ambientales favorables permiten el crecimiento de múltiples especies algales con potencial energético. En este contexto, surge la necesidad de explorar la aplicabilidad real de esta tecnología dentro del territorio nacional, considerando tanto los factores ambientales como la disponibilidad de recursos que podrían favorecer su implementación (Wang et al., 2024).

Las microalgas destacan por su capacidad para transformar luz solar y dióxido de carbono en biomasa rica en lípidos, carbohidratos y proteínas. Esta biomasa puede convertirse en diversas formas de bioenergía —entre ellas biodiésel, bioetanol y biogás— lo que posiciona a las microalgas como una alternativa prometedora frente a los cultivos energéticos terrestres, los cuales requieren grandes extensiones de tierra cultivable y presentan riesgos asociados a la seguridad alimentaria (Chisti, 2007).

En Colombia, las condiciones de alta radiación solar, temperaturas estables y abundancia de recursos hídricos favorecen el cultivo de especies algales nativas con alto potencial energético, lo que evidencia una oportunidad estratégica para el desarrollo de este tipo de industria (Wang et al., 2024). Asimismo, el aprovechamiento de las microalgas no compite con la agricultura por el uso de suelos fértiles y puede integrarse a procesos de tratamiento de aguas residuales, aportando beneficios adicionales como la remoción de contaminantes y la reducción de la eutrofización.

El proceso de obtención de Biocombustibles algales comprende diversas etapas -cultivo, cosecha, extracción de lípidos o fermentación, y conversión final- cuyas tecnologías han

avanzado significativamente, logrando mejoras en eficiencia y reducción de costos (**Leite et al., 2013**). Para un país que se encuentra en etapas iniciales de adopción de tecnologías bioenergéticas, como Colombia, estas innovaciones representan una oportunidad para desarrollar un sector competitivo a nivel regional.

A pesar de su potencial, la consolidación de la bioenergía de origen microalgal enfrenta desafíos relacionados con la alta inversión inicial, las limitaciones tecnológicas y la escasa infraestructura especializada (Wang et al., 2024). En esta línea, la presente investigación se desarrolla con el propósito de identificar las condiciones técnicas, económicas y ambientales que influyen en la viabilidad de producir energía a partir de microalgas en Colombia. Este análisis permitirá comprender el potencial real de esta alternativa bioenergética en el país y orientar futuras iniciativas alineadas con los principios de sostenibilidad.

Marco Teórico

Para garantizar una comprensión progresiva del tema, el presente marco teórico se estructura de manera deductiva. En primer lugar, se expone una visión general sobre la bioenergía, sus fundamentos conceptuales y el papel de las algas en la producción sostenible de biomasa. Posteriormente, el análisis se focaliza en las microalgas, abordando sus características biológicas, su potencial bioenergético y los avances tecnológicos asociados a su aprovechamiento. Esta organización permite contextualizar el fenómeno en un nivel macro antes de profundizar en los aspectos específicos relevantes para la producción energética.

La producción de energía a través de microalgas ha emergido como una línea de investigación clave dentro de las bioenergías de tercera generación, debido a su potencial para generar combustibles renovables con menores impactos ambientales y alta eficiencia en la conversión de recursos (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Biología de las Algas

Son organismos fotosintéticos capaces de transformar luz solar, dióxido de carbono y nutrientes inorgánicos en biomasa a través de la fotosíntesis. Pueden encontrarse en ambientes dulceacuícolas, marinos o estuarinos, y abarcan desde microalgas hasta complejas macroalgas pluricelulares. Su diversidad metabólica, fisiológica y química las convierte en organismos versátiles con múltiples aplicaciones energéticas, ambientales e industriales (Brennan & Owende, 2010).

Tipos de Algas y sus Características

Las algas se clasifican principalmente en microalgas y macroalgas:

Microalgas. Son organismos unicelulares microscópicos, con la capacidad de realizar fotosíntesis y crecer en ambientes acuáticos tanto dulces como salinos. Son las más investigadas en ingeniería ambiental debido a su alta eficiencia en la captura de CO₂, capacidad de crecer en aguas residuales y potencial para producir biocombustibles. como biodiésel y biohidrógeno (Mata et al., 2010).

Los grupos más relevantes incluyen:

Clorofitas (algas verdes): Contienen clorofila ayb, y son abundantes en ambientes dulces. Destacan por su rápida tasa de crecimiento y alta productividad de lípidos, útiles en la producción de biodiésel (Chisti, 2007).

Cianobacterias (algas azules-verdosas): Aunque se clasifican como bacterias, se consideran dentro del estudio de algas por su capacidad fotosintética. Son útiles en procesos de fijación de nitrógeno y descontaminación de aguas (Rawat et al., 2011).

Diatomeas (*Bacillariophyceae*): Poseen paredes celulares de sílice con estructuras ornamentadas. Son productoras eficientes de ácidos grasos poliinsaturados y tienen aplicaciones en el tratamiento de aguas (Wang et al., 2013).

Macroalgas. Son algas de mayor tamaño, visibles a simple vista, comunes en ambientes marinos.

Principales grupos:

Verdes (*Chlorophyta*): Comunes en aguas dulces y poco profundas. Se utilizan en remediación de aguas y como fertilizantes orgánicos.

Pardas (*Phaeophyta*): Ricas en alginatos y fucoidanos, se utilizan en la industria alimentaria y cosmética, pero también tienen potencial en la producción de biogás a partir de digestión anaeróbica (Hughes et al., 2012).

Rojas (*Rhodophyta*): Producen ficobiliproteínas y polisacáridos como el agar. Son útiles como bioindicadores y en tratamientos de aguas residuales por su capacidad de absorber metales pesados (Rawat et al., 2011).

Ciclo de Vida de las Algas

En términos generales, estas presentan ciclos de vida de una estructura admirable, alternando entre fases haploides (n) y diploides (2n). Es común que muchas de estas algas sigan un patrón conocido como alternancia de generaciones, donde la fase haploide, que se designa como gametofito, se encarga de producir gametos a través de un proceso de mitosis, mientras que la fase diploide, identificada como esporofito, se dedica a la producción de esporas mediante el mecanismo de la meiosis. Posible observar que ambas generaciones pueden presentar similitudes morfológicas o ser completamente diferentes entre sí, lo que añade una capa de complejidad a su estudio y comprensión (Graham & Wilcox, 2000).

Algas verdes: Presentan alternancia de generaciones isomórfica, como en *Ulva*, donde gametofito y esporofito tienen morfología similar.

Algas rojas: Poseen un ciclo trifásico (gametofito–carposporofito–esporofito), como en *Porphyra*, de gran importancia comercial.

Algas pardas: El esporofito es la fase dominante, como en los bosques de kelp, fundamentales para la estructura de ecosistemas marinos (Barsanti & Gualtieri, 2023).

Historia y Evolución de la Bioenergía

Definición

La bioenergía se define como la energía derivada de biomasa vegetal o animal, incluyendo residuos agrícolas, forestales, cultivos energéticos y desechos orgánicos. Su carácter renovable se debe a que el CO₂ emitido durante su combustión es compensado por la fotosíntesis de la biomasa utilizada (McKendry, 2002a).

Las principales ventajas de la bioenergía incluyen la reducción de gases de efecto invernadero, la independencia energética, el aprovechamiento de residuos y la generación de empleo rural (Demirbas, 2009).

Sin embargo, existen desafíos como la competencia por suelos agrícolas y la gestión de residuos del proceso (Chum, 2001).

Conversión de Biomasa Algal en Energía

Este es un proceso mediante el cual materiales orgánicos, como residuos vegetales, animales o industriales, se transforman en diversas formas de energía útil, incluyendo electricidad, calor y combustibles. La biomasa algal puede transformarse mediante tres rutas principales: termoquímica, bioquímica y fisicoquímica (Demirbas, 2009).

Procesos Termoquímicos. Incluyen combustión, gasificación y pirólisis.

Combustión: Producción directa de calor o electricidad, mediante la quema de biomasa.

Gasificación: Conversión en gas de síntesis (syngas), que puede ser utilizado para la producción de energía eléctrica o como base para combustibles líquidos.

Pirólisis: Proceso en el que se descompone la biomasa en ausencia de oxígeno, generando la producción de biogás, bioaceite y carbón vegetal (McKendry, 2002a).

Procesos Bioquímicos. Incluyen fermentación y digestión anaerobia.

Fermentación alcohólica: es uno de los procesos bioquímicos más conocidos y se utiliza principalmente para la producción de bioetanol. En este proceso, los azúcares presentes en la biomasa, como la glucosa y la fructosa, son fermentados por levaduras, como *Saccharomyces cerevisiae*, en condiciones anaeróbicas, produciendo etanol y dióxido de carbono. (McKendry, 2002b).

Digestión anaerobia: Convierte materiales orgánicos, como estiércol y residuos agrícolas, en biogás mediante la acción de bacterias en ausencia de oxígeno. Este proceso se lleva a cabo en etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis donde se produce metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Convierte los desechos orgánicos en biogás metanogénesis (Angelidaki et al., 2011).

Procesos Fisicoquímicos. Estos procesos se caracterizan por la producción de biodiésel mediante la transesterificación, donde aceites o lípidos se combinan con alcoholes de cadena corta generalmente metanol, etanol o butano para producir ésteres metílicos o etílicos, que son combustibles líquidos renovables y como subproducto también se consigue glicerina. (Arpia et al., 2021).

Marco Conceptual de las Variables de Investigación

A diferencia de un marco teórico general, esta investigación requiere conceptualizar viabilidad técnica, económica y ambiental, ya que son las variables centrales que se miden en los resultados.

Condiciones Técnicas

La viabilidad técnica se define como la capacidad real de producir energía mediante el uso de microalgas con eficiencia, continuidad y adaptación a las condiciones del país. Para su análisis se consideran indicadores ampliamente aceptados por la literatura científica:

Teóricos:

Productividad de biomasa (g/L/día)

Contenido de lípidos, carbohidratos y proteínas (%)

Eficiencia energética ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ de biomasa o % $E_{\text{out}}/E_{\text{in}}$).

Requerimientos tecnológicos (fotobiorreactores, estanques, sistemas de cosecha)

Eficiencia de conversión (rendimiento de biodiésel, bioetanol o biogás)

Adaptabilidad de las especies a las condiciones locales (Mata et al., 2010; Chisti, 2007).

Condiciones Económicas

La viabilidad económica evalúa si la producción energética con microalgas puede sostenerse y escalarse financieramente. La literatura define los siguientes indicadores:

Teóricos:

Costos de inversión (CAPEX)

Costos operativos (OPEX)

Costo por litro de biocombustible

Rentabilidad y competitividad frente a combustibles fósiles

Disponibilidad de financiamiento y transferencia tecnológica

Escalabilidad comercial (Leite et al., 2013; Demirbas, 2009).

Condiciones Ambientales

La viabilidad ambiental analiza el impacto ecológico del proceso de producción de energía con microalgas. La literatura reporta los siguientes indicadores principales:

Teóricos:

Huella de carbono del proceso completo (LCA)

Uso de agua y nutrientes

Generación de residuos del cultivo

Impactos en los ecosistemas acuáticos

Contribución a la reducción de GEI (Angelidaki et al., 2011; Hernández, 2019).

Tecnologías y Procesos de Producción

Cultivo de Microalgas

Métodos de Cultivo (autótrofo, heterótrofo, mixótrofo)

El cultivo de microalgas con fines energéticos puede realizarse mediante tres enfoques principales: autótrofo, heterótrofo y mixótrofo. Cada método se diferencia por las fuentes de energía y carbono empleadas, lo cual influye directamente en la productividad de biomasa, los costos operativos y la eficiencia del sistema.

En el cultivo autótrofo, las microalgas utilizan luz como fuente de energía y CO₂ como fuente de carbono, mediante el proceso de fotosíntesis. Este método es el más común en la producción bioenergética debido a su menor costo en nutrientes y a su contribución a la captura de carbono, siendo ampliamente empleado en estanques abiertos y fotobiorreactores (Passos et al., 2014). Su eficiencia depende de factores como la intensidad lumínica, fotoperiodo, disponibilidad de CO₂ y composición de nutrientes.

Por el contrario, en el cultivo heterótrofo, las microalgas emplean compuestos orgánicos como glucosa o residuos biodegradables como fuente de carbono y energía. Este enfoque permite tasas de crecimiento significativamente mayores y alta densidad celular, aunque incrementa los costos por requerir insumos adicionales y sistemas cerrados sin luz (Perez-Garcia et al., 2011).

Finalmente, el cultivo mixótrofo combina ambos mecanismos, permitiendo que las microalgas realicen fotosíntesis y utilicen carbono orgánico simultáneamente. Este método aumenta la flexibilidad metabólica y la productividad, adaptándose a variaciones de luz y disponibilidad nutricional, lo cual lo convierte en una estrategia eficiente en términos de rendimiento energético y estabilidad del proceso (Liu et al., 2008).

Sistemas de Cultivo (fotobiorreactores, tanques abiertos)

El cultivo se desarrolla principalmente mediante fotobiorreactores cerrados o estanques abiertos, cada uno con características que inciden en la viabilidad técnica y económica del proceso.

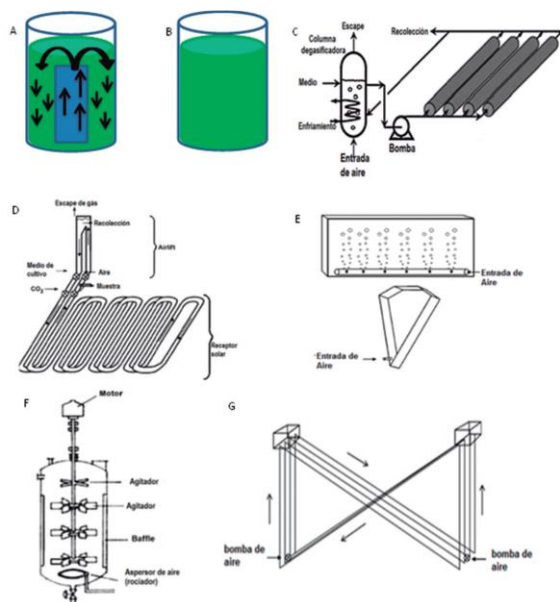
Los fotobiorreactores (FBR) ofrecen control preciso sobre temperatura, pH, concentración de CO₂, iluminación y condiciones estériles. Gracias a ello, permiten una mayor productividad y minimizan la contaminación microbiana. Sin embargo, su construcción y mantenimiento son costosos, lo cual limita su adopción a gran escala (Brennan & Owende, 2010).

En contraste, los estanques abiertos son sistemas de menor costo y fácil operación, ideales para regiones con alta radiación solar. Sus desventajas incluyen evaporación, variabilidad

Figura 1

ambiental, contaminación y menor productividad, aunque siguen siendo la opción más común en producción comercial de biomasa (Passos et al., 2014).

A continuación, se muestra un esquema general de fotobiorreactores incluye configuraciones tipo airlift, columna de burbujeo, tubular horizontal, tubular helicoidal, placa plana, tanque agitado y sistemas híbridos Ramírez Mérida et al., (2014).



Fuente. Tomado de Ramírez Mérida et al., (2014).

Cosecha y Extracción

Técnicas de Cosecha

La cosecha es uno de los pasos más costosos del proceso, representando entre el 20 % y el 30 % de los costos totales (Chen et al., 2011). Las técnicas más utilizadas son:

Floculación: adición de agentes que permiten la formación de flóculos que sedimentan rápidamente. Es económica y útil en cultivos de baja densidad. Se emplean sales metálicas y biopolímeros como la quitosana (Vandamme et al., 2013).

Centrifugación: altamente eficiente, pero costosa en términos energéticos; se utiliza para productos de alto valor (Molina Grima et al., 2003).

Filtración y ultrafiltración: útiles para especies grandes o para preconcentración; su limitación es la obstrucción de membranas (Kumar et al., 2022).

Flotación por aire disuelto (DAF): inyección de microburbujas que arrastran las células a la superficie; adecuada para cultivos de baja densidad y menor costo relativo (Uduman et al., 2010).

Métodos de Extracción de Lípidos y Otros Componentes

La extracción de lípidos es fundamental para la producción de biodiésel, mientras que proteínas, carbohidratos y pigmentos pueden ser valorizados en bioproductos. Los métodos principales son:

Métodos Químicos. La extracción con disolventes, como hexano y metanol, es la más aplicada. El método de Bligh y Dyer, permite extraer lípidos polares y neutros con alta eficiencia, aunque con el inconveniente del uso de disolventes tóxicos (Alba et al., 2013).

Métodos Mecánicos. Incluyen prensado, homogenización a alta presión y molienda con perlas. Son seguros y no tóxicos, pero menos eficientes en comparación con los métodos químicos (Sharma et al., 2012).

Métodos Combinados. La extracción asistida por ultrasonido o microondas mejora la disrupción celular y reduce el tiempo de proceso (Alba et al., 2013).

Extracción con CO₂ Supercrítico. Técnica limpia y altamente eficiente, sin residuos tóxicos; requiere equipos costosos y alta presión (Halim et al., 2011).

Conversión en Biocombustibles

Producción de Biodiésel

El biodiésel se obtiene mediante transesterificación de los triglicéridos presentes en los lípidos de las microalgas. El proceso incluye cultivo, cosecha, extracción lipídica y conversión química. Durante la reacción, los lípidos reaccionan con metanol o etanol en presencia de un catalizador, formando ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) y glicerol (Brennan & Owende, 2010).

Especies como *Nannochloropsis* y *Phaeodactylum* pueden alcanzar entre 30 % y 70 % de lípidos, lo que las convierte en organismos altamente competitivos para biodiésel (Chisti, 2007; Mata et al., 2010).

Producción de Bioetanol

El bioetanol deriva de la fermentación de carbohidratos contenidos en especies ricas en polisacáridos, como *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Spirulina*. Las etapas principales incluyen cultivo, cosecha, hidrólisis de polisacáridos y fermentación anaerobia con levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* (Costa & de Morais, 2011; Serrano, 2012).

La hidrólisis puede ser química (ácidos o bases) o enzimática, siendo esta última más selectiva y eficiente (Sharma et al., 2012). Aunque el proceso ofrece ventajas ambientales, enfrenta retos como costos de pretratamiento y baja escala comercial.

Producción de Biogás

El biogás se produce mediante digestión anaerobia de la biomasa algal, proceso que convierte materia orgánica en metano (CH₄) y CO₂. La eficiencia depende del pretratamiento, temperatura, pH, y relación C/N óptima entre 20 y 30 (Passos et al., 2014). La biomasa algal

pretratada es introducida en el digester donde se desarrolla la digestión anaerobia en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Cerón-Vivas et al., 2019).

Procesos de Digestión Anaeróbica

Generalmente se divide en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la fase de hidrólisis, las moléculas complejas, como los carbohidratos, lípidos y proteínas, se descomponen en compuestos más simples, como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos. Posteriormente, en la acidogénesis, estos compuestos son fermentados por bacterias acidogénicas para producir ácidos volátiles, como el ácido acético, y otros productos intermedios. En la acetogénesis, los ácidos volátiles son convertidos por bacterias acetogénicas en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, los cuales son los sustratos clave para los metanógenos (Xu et al., 2017).

Metanogénesis es la fase en la cual los microorganismos metanógenos transforman acetato, hidrógeno y CO₂ en metano, principal componente energético del biogás. Su eficiencia depende de condiciones estrictas de anaerobiosis, pH, temperatura y ausencia de inhibidores (Pámanes-Carrasco et al., 2021; Cioabla et al., 2014).

Tecnología de Digestores

Existen varias tecnologías de digestores, cada una adaptada a diferentes tipos de sustratos, escalas de operación y condiciones ambientales. Las tecnologías más comunes son:

Digestores de tanque cerrado: Operan en condiciones mesofílicas o termofílicas; alta versatilidad para diversos residuos (Cioabla et al., 2014).

Digestores de flujo continuo: Mantienen entrada y salida constante de sustrato, óptimos para grandes instalaciones (Gerardi, 2003).

Digestores tipo batch: Simples y económicos, adecuados para procesos a pequeña escala (Weiland, 2010).

Digestores de doble fase: Separan acidogénesis y metanogénesis para optimizar ambas etapas y aumentar la producción de metano (Cioabla et al., 2014; Weiland, 2010).

Metodología Propuesta

Enfoque Metodológico

La presente investigación se desarrolla bajo un diseño cualitativo-documental, cuyo propósito es analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental de las microalgas como productores de energía en Colombia. Este enfoque permite recopilar, examinar y comparar información proveniente de artículos científicos, tesis, informes técnicos, y documentos normativos vigentes, con el fin de construir un análisis fundamentado para esta investigación.

Mediante el estudio descriptivo se identifica y caracteriza las condiciones climáticas, biológicas, tecnológicas y regulatorias que influyen en la producción bioenergética.

Fuentes de Información

Se incluyeron artículos científicos, tesis de maestría y doctorado, documentos institucionales (IDEAM, MME, MinAmbiente), lineamientos internacionales (IPCC, FAO) y reportes técnicos. Las bases de datos consultadas fueron:

Scopus

ScienceDirect

Google Scholar

SpringerLink

SciELO

Repositorio institucional UNAL

Repositorio de la UAB

Criterios de inclusión y exclusión

Inclusión:

Estudios entre 2000 y 2024.

Investigaciones con datos técnicos sobre microalgas y bioenergía.

Modelos, análisis o proyectos que evaluarán: biodiésel, biogás, biohidrógeno o captura de CO₂.

Documentos con detalle metodológico verificable.

Estudios realizados en Colombia o aplicables a condiciones tropicales.

Exclusión:

Archivos sin información metodológica.

Estudios no relacionados con energía.

Documentos duplicados.

Proyectos sin datos técnicos medibles.

Procedimiento de Comparación

Para garantizar transparencia y verificabilidad, se aplicó un método comparativo estructurado basado en:

Matriz Comparativa de Especies

Evalúa composición bioquímica, productividad, adaptabilidad y potencial energético.

Matriz de Condiciones Ambientales y Geográficas

Relaciona indicadores ambientales del país con los requerimientos de cultivo.

Matriz de análisis de viabilidad (técnico, económico y ambiental)

Integra todos los indicadores definidos en la metodología y permite determinar el nivel de viabilidad en cada eje.

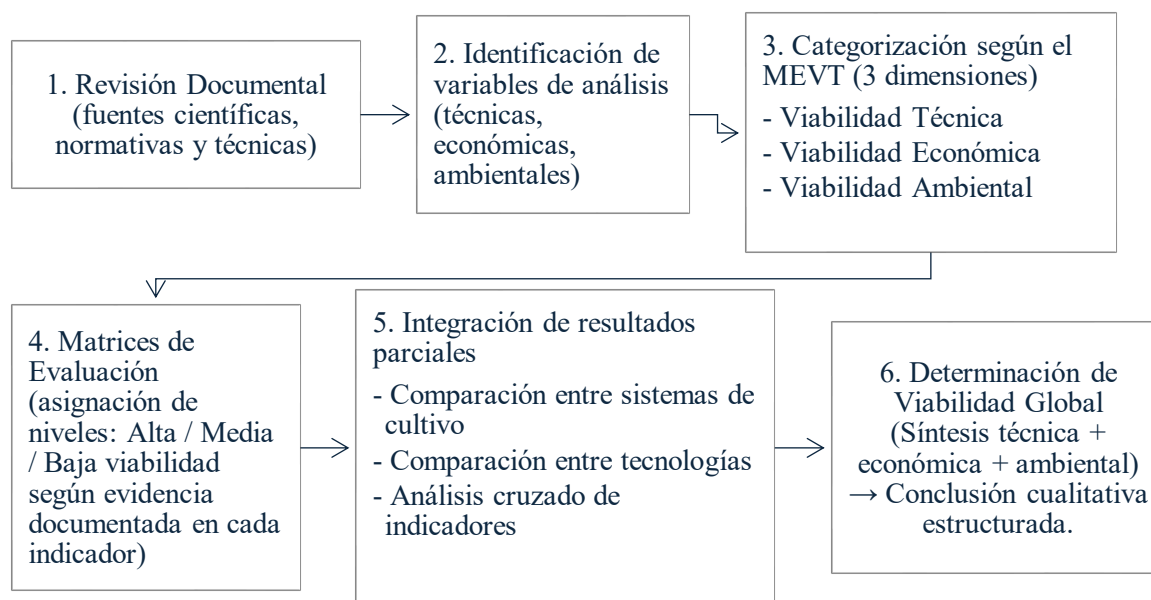
Estas matrices se incluyen íntegramente en los apéndices, con sus criterios, indicadores y fuentes de información.

Estrategia para Medir la Viabilidad:

Modelo de Evaluación Tridimensional (MEVT). Este modelo emplea criterios e indicadores cuantificables y comparables entre estudios, lo que permite medir de manera objetiva la viabilidad ambiental, tecnológica y económica de la producción energética.

Figura 2

Esquema de Flujo del Modelo de Evaluación de Viabilidad Tridimensional (MEVT)



Fuente. Elaboración propia (2025).

Nota. El esquema representa el proceso mediante el cual la revisión documental es transformada en una evaluación estructurada de viabilidad para cada dimensión del MEVT. El flujo permite verificar la trazabilidad metodológica desde la recolección de información hasta la calificación final del nivel de viabilidad.

Viabilidad Ambiental. Se evaluó mediante indicadores ampliamente utilizados en estudios de bioenergía:

Tabla 1

Criterios de viabilidad

Indicador	Unidad	Criterio de viabilidad
Captura de CO ₂	g/m ² /día	> 20 g/m ² /día
Remoción de N y P	%	> 60 %
Uso de suelo agrícola	% requerido	< 10 %
Impacto sobre biodiversidad	Cualitativo	No implica deforestación

Nota. Estos indicadores permiten valorar el desempeño ambiental y la compatibilidad del sistema con principios de sostenibilidad. *Fuente.* Autora con base en (Chisti, 2007; Brennan & Owende, 2010).

Tabla 2

Beneficios del sistema de producción

Indicador	Unidad	Criterio
Productividad de biomasa	g/L/día	> 0,3 g/L/día
Contenido lipídico	%	> 20–30 %
Escalabilidad	Nivel	Piloto → preindustrial posible
Disponibilidad tecnológica	Sí/No	Accesible en el país

Nota. Estos indicadores permiten medir los beneficios ambientales directos y la sostenibilidad del sistema de producción. *Fuente.* Autora (2025).

Viabilidad Tecnológica. La viabilidad tecnológica se analizó mediante indicadores que reflejan el desempeño real de la biomasa microalgal y su potencial de escalamiento:

Estos parámetros permiten determinar si la tecnología requerida puede operar en condiciones reales y escalarse económicamente.

Viabilidad Económica. La evaluación económica se realizó mediante indicadores estándar en estudios de costos de bioenergía:

Tabla 3

Criterios económicos

Indicador	Unidad	Criterio
Costo del biodiésel	USD/L	≈ 3 USD/L o tendencia a disminución
CAPEX	USD/ha	Comparación con palma y caña
OPEX	USD/año	Análisis comparativo
EROI	razón	> 1,5
Competitividad frente a alternativas	%	Competitividad favorable

Nota. Estos indicadores permiten determinar la rentabilidad y sostenibilidad económica del sistema productivo. *Fuente:* Autora con base en (Slade & Bauen, 2013; Quinn & Davis, 2015).

Procedimiento de Análisis Comparativo

Identificación de estudios relevantes mediante criterios de inclusión:

Publicaciones con DOI o respaldo institucional.

Investigaciones con datos experimentales verificables.

Proyectos piloto desarrollados en Colombia o en contextos tropicales similares.

Extracción y sistematización de datos en matrices comparativas que organizan las variables:

rendimiento biológico

eficiencia energética

costos

impactos ambientales

escalabilidad

Comparación cruzada entre variables para identificar patrones de rendimiento, barreras y oportunidades.

Aplicación del MEVT para determinar el nivel de viabilidad en cada dimensión.

Integración de resultados para formular conclusiones basadas en evidencia empírica y criterios verificables.

Justificación del Método

Procedimientos explícitos para la comparación entre estudios.

Indicadores verificables que permiten medir la viabilidad con rigor académico.

Criterios técnicos claros para interpretar los resultados.

Un marco analítico reproducible, útil para investigaciones futuras.

Con este enfoque, la investigación obtiene una base metodológica sólida y evaluable, garantizando coherencia entre los objetivos, los resultados y las conclusiones.

Análisis de Viabilidad

El análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental para la producción energética mediante microalgas en Colombia se realizó integrando datos climáticos, estudios previos, disponibilidad tecnológica e indicadores bioquímicos de las especies evaluadas. Los resultados se presentan organizados por variable y sustentados en evidencia documental actualizada.

Viabilidad Técnica

Condiciones ambientales favorables para el cultivo

Radiación Solar

Colombia presenta una radiación solar anual de **4–6 kWh/m²/día**, superior al promedio mundial, lo cual favorece el crecimiento de las microalgas (ICEX, 2022).

Las regiones con mayor potencial técnico fueron:

Tabla 4

Regiones con mayor potencial técnico

Región	Radiación solar	Implicación técnica
La Guajira	5.0–6.0 kWh/m ² /día	Ideal para sistemas abiertos a gran escala
Orinoquía	>5 kWh/m ² /día	Potencial alto para fotobioreactores y estanques
Altiplano	3.5–4.5	Adecuado para sistemas cerrados
Cundiboyacense	kWh/m ² /día	

Nota. Estos valores aseguran disponibilidad energética constante para procesos fototróficos.

Fuente. Autora (2025).

Figura 3

Rango anual de disponibilidad de energía solar por regiones

REGIÓN	kWh/m²/año
GUAJIRA	1.980 - 2.340
COSTA ATLÁNTICA	1.260 - 2.340
ORINOQUIA	1.440 - 2.160
AMAZONIA	1.440 - 1.800
ANDINA	1.080 - 1.620
COSTA PACÍFICA	1.080 - 1.440

Fuente. (UPME, 2005).

Temperatura

Las regiones cálidas mantienen temperaturas entre 24–30 °C, óptimas para las microalgas tropicales (Hincapie et al., 2019). Esto reduce la necesidad de climatización artificial, mejorando la viabilidad técnica.

Especies Nativas con Potencial Energético

Los resultados se presentan organizados por especie y se interpretan frente a los criterios de viabilidad técnica establecidos, contenido lipídico ≥ 30 %; eficiencia energética ≥ 50 %. (ver apéndice A).

Composición Bioquímica por Especie. El análisis comparativo se centró en indicadores técnicos clave: contenido lipídico, rendimiento de biomasa y eficiencia energética.

Tabla 5*Indicadores técnicos por especie evaluada*

Especie	Contenido lipídico	Productividad estimada	Evaluación técnica
Chlorella vulgaris	20–30% (hasta 40% con estrés)	Alta	Moderada–Alta
Nannochloropsis spp.	30–60%	Media–alta	Muy alta
Spirulina platensis	4–16%	Muy alta	Baja para biodiésel, alta para biogás

Nota. Comparando los porcentajes observados con el umbral metodológico ($\geq 30\%$),

Nannochloropsis cumple el criterio de contenido lipídico en condiciones optimizadas; *Chlorella* requiere manejo (estrés nutricional, mixotrofia) para alcanzar niveles óptimos; *Spirulina* resulta menos favorable para biodiésel, pero interesante para otras vías (biogás, co-productos). Fuente: autora (2025).

Criterios para Seleccionar la Especie más Viable

Rendimiento de biomasa (productividad): Los estudios consultados en la revisión documental muestran rangos de productividad de biomasa típicos para cultivos tropicales y controlados: $\approx 0.1\text{--}0.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$ para diversas cepas aisladas en zonas tropicales, con lipid productivities ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$) muy dependientes de la interacción crecimiento/acumulación de lípidos (aislamientos reportados en la literatura local y regional). Estos rangos aparecen en investigaciones recientes y en estudios de selección de cepas tropicales. (Pérez-Bravo et al., 2019).

Interpretación: la productividad observada en muchos ensayos resulta adecuada para esquemas piloto; sin embargo, para alcanzar la viabilidad técnica a escala industrial se requiere maximizar tanto la tasa de crecimiento como la productividad lipídica simultáneamente (lipid

productivity), lo cual suele lograrse mediante optimización de medios, fotoperíodo y manejo de nutrientes.

Coulson Reinel et al. (2022), destacan que esta microalga presenta una alta tasa de crecimiento y una composición lipídica favorable para la producción de biodiésel, incluso cuando se cultiva en condiciones controladas en Colombia.

Eficiencia Energética y Balance Eout/Ein

La literatura revisada y las notas del documento señalan que etapas críticas con alto consumo energético (secado, extracción por solventes, centrifugación) pueden reducir la eficiencia general del proceso; estudios recientes de plantas experimentales y LCA muestran que la electricidad y procesos de secado son los mayores contribuyentes a la huella energética y de carbono. En análisis de plantas piloto, el uso de energías renovables y técnicas de extracción en húmedo mejora sustancialmente el balance energético, pero la viabilidad energética aún depende de optimizaciones tecnológicas.

Interpretación: aplicando el criterio metodológico (eficiencia $\geq 50\%$), los procesos actuales alcanzan esa eficiencia solo en escenarios donde se minimiza el uso de energía fósil en etapas de cosecha y procesamiento (p. ej., uso de floculación eficiente, energía solar para secado o extracción en húmedo). Sin esas medidas, la eficiencia podría situarse por debajo del umbral.

Disponibilidad de Recursos Hídricos

Tabla 6.

Viabilidad de los recursos hídricos

Factor evaluado	Resultado	Implicación para la viabilidad
Índice de aridez	0,23 (moderado a húmedo)	Condiciones ideales para cultivo de microalgas
Disponibilidad de agua	48,5% del territorio con excedente	Alta viabilidad en casi la mitad del país

Regiones con déficit	6,9% del territorio nacional	Requiere tecnologías adaptadas (cultivos cerrados, aguas residuales)
----------------------	------------------------------	--

Nota. Según Hincapie et al. (2019): 48,5% del territorio presenta excedentes hídricos →

favorable, índice de aridez nacional: 0.23 → condición moderadamente húmeda, regiones

deficitarias: La Guajira, Magdalena, norte de Santander. *Fuente*. Autora (2025).

Infraestructura y Tecnología Disponible

Se identificaron tres frentes de avance:

Académica

Varias universidades colombianas están liderando investigaciones sobre el uso de microalgas productoras de biocombustibles. Por ejemplo, la Universidad Nacional de Colombia ha explorado la viabilidad de producir biocombustibles a partir de algas marinas, destacando su potencial en comparación con fuentes tradicionales como la palma africana (Agencia de Noticias UNAL, 2015).

La Universidad de los Andes ha investigado el uso de las microalgas como una alternativa ecológica para limpiar fuentes hídricas, tecnología que podría ser escalable en el país (Universidad de los Andes, 2017).

La Universidad Nacional Abierta y A distancia, el Ingeniero Mecánico Ramírez Duque, (2017) expone la viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobiorreactores en el municipio del Valle del Cauca. En su estudio nos muestra los diferentes tipos de fotobiorreactores, como lo son: tubulares, de placa, y columnas de burbujas.

Tecnologías Implementadas

Los fotobiorreactores (FBR). Estos sistemas han sido utilizados en universidades como la Universidad Nacional de Colombia y en centros de investigación como AGROSAVIA para su cultivo en condiciones controladas (FAO, 2013; Jaramillo Obando, 2011).

Los estanques abiertos tipo “raceway” son estructuras poco profundas con agitación constante, ideales por su bajo costo y eficiencia para zonas con buena radiación solar, como los Llanos Orientales o La Guajira. En Colombia, han sido aplicados en pruebas piloto para la producción de biofertilizantes mediante el uso de microorganismos autótrofos (FAO, 2013; IDEAM, 2022).

La extracción de lípidos para producción de biodiésel por el uso de solventes orgánicos como hexano y etanol, siguiendo procesos clásicos como la transesterificación. Estas técnicas han sido exploradas en laboratorios de universidades como la UNAL y centros de investigación como el CIB (Centro de Investigaciones Biológicas), tal como lo menciona el estudio de Jaramillo Obando, (2011).

Aunque en Colombia aún no existen plantas comerciales activas para la producción de biocombustibles algales, se han realizado avances significativos en investigación. Actualmente se evalúan procesos como la digestión anaerobia de biomasa para la producción de biogás, y la obtención de líquidos como bioetanol y biocrudo mediante técnicas de hidrólisis térmica o pirólisis, como se indica en los estudios de Jaramillo Obando, (2011) y Nuñez Caderon, (2014).

Políticas y Planes Nacionales

Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) para el periodo 2020-2030 plantea el objetivo de reducir en un 51 % las emisiones proyectadas de dióxido de carbono para el año 2030 (ICEX, 2022).

El Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052 identifica clústeres de captura de CO₂ asociados a industrias cercanas a refinerías y plantas de producción, lo cual podría articularse con proyectos de cultivo de microalgas para bioenergía (Ministerio de Minas y Energía, 2021)

Plan Nacional de Negocios Verdes 2022-2030 establece lineamientos para fomentar iniciativas sostenibles, incluyendo potencialmente el aprovechamiento energético de estos sistemas biológicos (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2022).

La Ley 1715 de 2014, que tiene como finalidad fomentar el aprovechamiento y el uso de fuentes de energía no convencionales e incentiva su incorporación al mercado eléctrico, su implementación en zonas no interconectadas y su aplicación en diversos usos energéticos. Su propósito principal es contribuir al desarrollo económico sostenible, garantizar el abastecimiento energético y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Brennan & Owende, 2010; Wang et al., 2024).

Viabilidad Económica

Aunque los datos numéricos específicos de costos provienen de estudios internacionales, los resultados muestran:

Factores que Aumentan la Viabilidad Económica

Uso de aguas residuales reduce costos de nutrientes (González et al., 1997).

Condiciones climáticas que reducen calefacción e iluminación disminuyen CAPEX y OPEX.

La cercanía a puertos e industrias facilita el acceso a CO₂.

Factores que Disminuyen la Viabilidad Económica

Costos elevados de fotobiorreactores.

Falta de incentivos nacionales.

Escasez de centros de procesamiento industrial.

Interpretación: Colombia presenta una viabilidad económica condicionada para el desarrollo de sistemas bioenergéticos cuando se emplean estrategias como el uso de sistemas híbridos de cultivo, el aprovechamiento de aguas residuales y la implementación de plantas modulares. Según los criterios del MEVT, esta viabilidad económica se clasifica como de nivel medio, debido a que, si bien existen oportunidades para reducir costos operativos y de inversión, aún persisten limitaciones asociadas a la escala productiva, la infraestructura disponible y los costos tecnológicos.

Viabilidad Ambiental

Beneficios ambientales observados

Captura de CO₂

Las microalgas capturan entre 1.8 y 2.0 kg de CO₂ por kg de biomasa (literatura internacional).

En zonas industriales (Bogotá, Medellín, Barranquilla) se podrían integrar cultivos para captura directa.

Biorremediación

Chlorella vulgaris y *Scenedesmus dimorphus* muestran:

Remoción de amonio y fósforo en aguas residuales

No generan contaminación secundaria (González et al., 1997).

Reducción de Emisiones

El biodiésel producido por las microalgas reduce hasta 70–90 % de emisiones frente al diésel fósil (según estudios comparativos citados).

Riesgos Ambientales Identificados

La contaminación hídrica puede reducir la productividad algal.

Regiones con déficit hídrico requieren manejo sustentable.

El cambio climático podría elevar temperaturas hasta 4 °C (Hincapie et al., 2019), afectando cultivos sensibles.

Estudios Previos en Colombia

Coulson Reinel et al. (2022), en su artículo *Evaluación del potencial de cultivo de cuatro especies microalgales nativas del departamento de Bolívar, Colombia*, publicado en la revista *Mutis*, evaluaron el potencial de cultivo de cuatro especies nativas: *Dunaliella salina*, *Cyclotella meneghiniana*, *Nitzschia palea* y *Navicula tripunctata*, aisladas de cuerpos de agua del departamento de Bolívar.

Estas especies se cultivaron en condiciones controladas utilizando el medio Conway modificado y se monitorearon parámetros como densidad celular, tasa de crecimiento y tiempo

de generación. Los resultados mostraron que *Dunaliella salina* alcanzó la mayor densidad celular (12.957.500 cel/mL), mientras que *Nitzschia palea* presentó la mayor tasa de crecimiento y el menor tiempo de generación. Estos hallazgos indican que, si bien *D. salina* es adecuada para cultivos masivos por su elevada densidad celular, *N. palea* podría ser más eficiente para procesos que requieran crecimiento acelerado.

El estudio también destaca el potencial bioenergético de *Cyclotella meneghiniana*, debido a su elevado contenido lipídico y a su productividad en diversas condiciones ambientales, lo que la posiciona como una candidata relevante para la generación de biocombustibles. Asimismo, se resalta la presencia de *Navicula tripunctata* en la Bahía de Cartagena de Indias, especie utilizada en la producción de biodiésel por su capacidad para sintetizar triglicéridos.

Núñez Caderon (2014), en su tesis *Producción de biohidrógeno a partir de Chlorella colombianensis*, presentada a la Universidad Autónoma de Bucaramanga, investigó la producción biológica de hidrógeno empleando la microalga *Chlorella colombianensis*, aislada e identificada en Colombia. La autora diseñó un sistema de fotobiorreactores de columna fabricados en vidrio templado para cultivar la microalga bajo condiciones controladas, analizando variables como la iluminación y el suministro de CO₂. El estudio demostró que la especie es capaz de generar biohidrógeno molecular, evidenciando su potencial como fuente de energía limpia y renovable. No obstante, se concluyó que, para alcanzar una viabilidad comercial, los rendimientos de producción deben superar ampliamente los obtenidos en laboratorio.

Finalmente, Jaramillo Obando (2011), en su tesis *Evaluación tecno-económica de la producción de biocombustibles a partir de microalgas*, presentada a la Universidad Nacional de

Colombia, identificó tres especies con alto potencial bioenergético: *Chlorella vulgaris*, *Chlorella protothecoides* y *Schizochytrium sp. N-2*. Estas fueron seleccionadas por su alto contenido de lípidos y almidón, características esenciales para la producción de biodiésel y bioetanol. Su capacidad de crecer en condiciones heterotróficas las hace especialmente viables para su implementación en procesos de biorefinería.

El análisis consideró criterios técnicos y económicos relacionados con la productividad de biomasa y la calidad del biocombustible obtenido. El estudio evaluó distintos sistemas de cultivo abiertos y cerrados, técnicas de cosecha y métodos de extracción de metabolitos. Asimismo, se emplearon modelos y simulaciones para examinar los impactos económicos, ambientales y sociales, proponiendo el desarrollo de biorefinerías multiproducto adaptadas al contexto nacional.

Estudio de Casos y Proyectos Piloto

En Colombia, el desarrollo de proyectos relacionados con la investigación expuesta ha avanzado mediante diversos estudios de caso y proyectos piloto implementados por universidades e instituciones científicas. A continuación, se presentan los más representativos.

Evaluación Tecno-Económica de Biocombustibles por Medio de Microalgas

La Universidad Nacional de Colombia llevó a cabo un estudio enfocado en la producción de biodiésel y bioetanol utilizando microalgas ricas en aceite y almidón. El objetivo principal fue identificar métodos de producción de biocombustibles a bajo costo, evaluando tanto la viabilidad técnica como económica del proceso (Jaramillo Obando, 2011).

Producción de Biocrudo Mediante Licuefacción Hidrotérmica

La Universidad de Antioquia ejecutó un proyecto que evaluó la producción de biocrudo utilizando especies sometidas a procesos de licuefacción hidrotérmica. Este método permite la conversión directa de biomasa húmeda en biocrudo, alcanzando la captura de aproximadamente 300 toneladas de CO₂ por hectárea al año, lo cual representa un aporte significativo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. (Universidad de Antioquia, 2024).

Viabilidad de Fotobiorreactores Solares en el Valle del Cauca

Un estudio publicado en la *Revista de Investigaciones Ambientales* analizó la producción de biomasa microalgal mediante fotobiorreactores solares adaptados a las condiciones climáticas del Valle del Cauca. Los resultados demostraron que estos sistemas pueden operar eficientemente en ambientes tropicales, favoreciendo la producción sostenible de biocombustibles (Ramírez Duque, 2017).

Producción de Biocombustibles a Partir de Microalgas en el Tolima

El proyecto "Fuel Algae", liderado por estudiantes de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, se centra en el aprovechamiento energético producido por la microalga *Chlorella vulgaris*. El estudio reveló que la producción de biocombustibles por medio de microalgas de agua dulce es 4,1 veces más eficiente que la obtenida a partir de palma africana, principal oleaginosa empleada en Colombia.

Estas mostraron una alta capacidad para absorber CO₂ atmosférico y nutrientes del agua, favoreciendo simultáneamente la mitigación de emisiones y el tratamiento de aguas residuales. El proyecto fue implementado en fincas ubicadas en Mariquita, Tolima, mediante sistemas de cultivo adaptados a las características locales. Los resultados preliminares evidenciaron la

viabilidad técnica del proceso y su potencial para impulsar el desarrollo rural sostenible.

(Agencia de Noticias UNAL, 2014).

Impacto ambiental y sostenibilidad

La producción de energía por medio de las microalgas ofrece múltiples beneficios ambientales que contribuyen a la sostenibilidad, la reducción de emisiones contaminantes y el fortalecimiento de sistemas de economía circular.

En coherencia con el objetivo general de la investigación, que plantea evaluar la viabilidad de la bioenergía microalgal en comparación con fuentes energéticas convencionales, el análisis se desarrolló mediante un enfoque comparativo estructurado.

La comparación se realizó a partir de información secundaria proveniente de literatura científica y técnica, contrastando el desempeño de la biomasa microalgal frente a combustibles fósiles y cultivos energéticos terrestres tradicionalmente empleados en la producción de biocombustibles. Resaltando los veneficios ambientales que representa este tipo de proyectos.

Comparación entre Biomasa Microalgal y Fuentes Energéticas Convencionales

Tabla 7.

Comparativa entre biomasa algal y fuentes convencionales

Indicador	Biomasa microalgal	Cultivos energéticos terrestres	Combustibles fósiles
Rendimiento por área	Muy alto	Medio–bajo	No aplica
Uso de suelo agrícola	No competitivo	Alto	No aplica
Emisiones netas de CO ₂	Bajas / neutras	Moderadas	Altas
Requerimiento hídrico	Flexible (aguas residuales)	Alto	Bajo
Costos actuales	Altos (fase piloto)	Medios	Bajos
Sostenibilidad a largo plazo	Alta	Media	Baja

Nota. Los datos comparados nos muestran en un rango de alto, medio y bajo los beneficios que tienen el uso de biomasa en contraste con fuentes energéticas convencionales. *Fuente.* Autora con base en (Chisti, 2007; Mata et al., 2010; Lardon et al., 2009).

Comparación entre Microalgas, Palma Africana y Diésel Fósil como Fuentes Energéticas

Desde la dimensión ambiental, las microalgas presentan ventajas significativas al no competir con suelos agrícolas, permitir el aprovechamiento de aguas residuales y exhibir un mayor potencial de captura de dióxido de carbono (CO₂) por unidad de superficie en comparación con la palma africana y los combustibles fósiles. En términos de productividad, la biomasa microalgal puede alcanzar rendimientos energéticos considerablemente superiores por hectárea; en contraste, el diésel fósil mantiene una mayor densidad energética, pero con impactos ambientales elevados asociados a su extracción, refinación y uso final.

En la dimensión económica y tecnológica, el biodiésel de palma y el diésel fósil cuentan con cadenas productivas consolidadas y menores costos de producción en el corto plazo. Por su parte, las tecnologías basadas en microalgas aún presentan costos relativamente altos y un nivel de desarrollo intermedio. No obstante, los avances recientes en sistemas híbridos de cultivo, biorrefinerías integradas y enfoques de economía circular sugieren un potencial creciente de competitividad para la bioenergía de origen microalgal a mediano y largo plazo en el contexto colombiano.

Este análisis comparativo evidencia que, si bien las microalgas aún no superan a las fuentes convencionales en términos de rentabilidad inmediata, sus ventajas ambientales, junto con su carácter estratégico para la diversificación de la matriz energética, las posicionan como una alternativa prometedora dentro del proceso de transición energética sostenible del país (ver Apéndice J).

Beneficios Ambientales

Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Las microalgas capturan cantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂) mediante la fotosíntesis. Este proceso permite utilizar CO₂ proveniente de emisiones industriales o plantas de generación energética, reduciendo la huella de carbono global (Khan et al., 2018).

Aprovechamiento de Recursos no Competitivos

Estas pueden cultivarse en suelos marginales, áreas no aptas para la agricultura y utilizando agua salada, residual o no potable. Esto evita la presión sobre recursos hídricos y agrícolas esenciales para la producción de alimentos (Chisti, 2007).

Conservación del Suelo y Biodiversidad

Al reducir la necesidad de cultivos energéticos terrestres, se disminuye la deforestación, la expansión agrícola y la pérdida de biodiversidad. Las microalgas representan una alternativa que protege los ecosistemas naturales (Brennan & Owende, 2010; Wang et al., 2024).

Mitigación del Cambio Climático

Además de capturar CO₂, las microalgas absorben contaminantes NO_x y SO_x, presentes en emisiones industriales. Esto contribuye a mejorar la calidad del aire y fortalecer estrategias de transición energética (Leite et al., 2013; Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Alta Eficiencia Energética

Presentan una elevada tasa de conversión de energía solar a biomasa, superando a los cultivos terrestres utilizados tradicionalmente para biocarburantes (Mata et al., 2010).

Desarrollo de Economías Circulares

Las microalgas permiten reutilizar desechos industriales, gases de combustión y aguas residuales como insumos productivos, reduciendo la generación de residuos y promoviendo sistemas circulares (Rawat et al., 2011).

Reducción de Emisiones CO₂

El cultivo de estas especies desempeña un papel central en la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), principal gas de efecto invernadero asociado al cambio climático. Durante la fotosíntesis, estas utilizan el CO₂ como fuente de carbono para su crecimiento, aportando beneficios como:

Captura Directa de CO₂ Industrial

Los sistemas de cultivo pueden integrarse con chimeneas industriales para canalizar gases de combustión hacia fotobiorreactores, reduciendo de manera significativa las emisiones liberadas a la atmósfera (Khan et al., 2018).

Carbono Neutro

A diferencia de los combustibles fósiles, los derivados de microalgas son prácticamente neutros en carbono. El CO₂ liberado durante la combustión de biomasa algal es equivalente al CO₂ capturado durante su crecimiento, cerrando el ciclo del carbono (Chisti, 2007).

Mitigación del Cambio Climático

La expansión de cultivos a gran escala podría reducir de forma sustancial las concentraciones atmosféricas de CO₂ (Mata et al., 2010).

Mejora de la Calidad del Agua

Un beneficio ambiental significativo del cultivo de microalgas es su capacidad para mejorar la calidad del agua, especialmente cuando se integran en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estos funcionan como biofiltros naturales capaces de eliminar contaminantes mientras producen biomasa útil para fines energéticos.

Eliminación de Nutrientes

Sus componentes muestran una elevada eficiencia en la absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, presentes comúnmente en aguas residuales domésticas e industriales. La remoción de estos compuestos evita procesos de eutrofización y contribuye a la recuperación de ecosistemas acuáticos (Park et al., 2011).

Reducción de Metales Pesados y Contaminantes

Diversas especies microalgales tienen la capacidad de absorber metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos. Esto las convierte en herramientas efectivas para la biorremediación de aguas contaminadas (Rawat et al., 2011).

Reutilización de Aguas Residuales

Las aguas tratadas mediante sistemas algales pueden reutilizarse para riego agrícola o en procesos industriales, promoviendo un manejo sostenible del recurso hídrico (Singh & Gu, 2010).

Producción de Biomasa Durante el Tratamiento

Mientras mejoran la calidad del agua, generan biomasa valiosa para producir combustibles orgánicos, biofertilizantes y otros coproductos, maximizando así los beneficios ambientales y económicos del proceso (Mata et al., 2010; Park et al., 2011).

Desafíos y Consideraciones Ambientales

Aunque la producción de energía a través de microalgas es una alternativa prometedora para la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático, presenta desafíos ambientales que requieren una gestión responsable. Un aspecto central es el impacto en ecosistemas acuáticos, el cual puede resultar tanto positivo como negativo.

Impacto en Ecosistemas Acuáticos

Impactos Positivos

Reducción de la Contaminación Acuática. El cultivo en sistemas de tratamiento de aguas residuales contribuye a la reducción de la eutrofización al absorber nutrientes como amonio y fósforo, disminuyendo la proliferación de organismos nocivos (González et al., 1997). Esto es particularmente relevante en áreas donde la contaminación agrícola e industrial afecta la biodiversidad acuática.

Captura de Carbono en Sistemas Acuáticos. Las microalgas actúan como sumideros biológicos de carbono, capturando CO₂ disuelto en el agua y contribuyendo a reducir la acidificación y mejorar el equilibrio químico de los ecosistemas (Mata et al., 2010).

Generación de Hábitats. En determinadas configuraciones, los sistemas algales pueden convertirse en refugios para fauna acuática, favoreciendo la biodiversidad (Rawat et al., 2011).

Impactos Negativos

Competencia por Recursos. El cultivo intensivo puede competir por recursos como nutrientes y agua, alterando cadenas tróficas y afectando la biodiversidad en sistemas naturales (Singh & Gu, 2010).

Eutrofización por Mal Manejo. Fugas o descargas no controladas desde sistemas de cultivo pueden incrementar la eutrofización y desencadenar proliferaciones algales nocivas (Pittman et al., 2011).

Riesgos de Especies Invasoras. El uso de microalgas no nativas puede llevar a su propagación incontrolada en ecosistemas locales, donde podrían desplazar a especies autóctonas y alterar el equilibrio ecológico (Khan et al., 2018; Mata et al., 2010)

Impacto en la Calidad del Agua. El manejo inadecuado de residuos, como material celular y compuestos orgánicos, puede deteriorar la calidad del agua y generar emisiones como metano (Chisti, 2007).

Manejo de Residuos

Aspectos Positivos

Producción de Subproductos Valiosos. Tras la extracción de lípidos, la biomasa residual conserva altos niveles de proteínas, carbohidratos y minerales, lo que permite su utilización en fertilizantes orgánicos, piensos, biofertilizantes o biogás mediante digestión anaerobia (Mata et al., 2010). La recuperación de estos subproductos contribuye a reducir residuos sólidos y mejorar la eficiencia global del sistema de producción energética.

Cierre del Ciclo de Nutrientes. El cultivo en aguas residuales permite reciclar nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, disminuyendo la dependencia de fertilizantes sintéticos y promoviendo sistemas de economía circular (Park et al., 2011; Rawat et al., 2011). La capacidad de algunas microalgas de absorber micronutrientes como hierro, potasio, calcio y magnesio refuerza su rol en la biorremediación y el reciclaje de nutrientes en entornos agrícolas e industriales.

Aspectos Negativos

Residuos no Biodegradables y Contaminantes Químicos. Procesos basados en disolventes orgánicos como hexano o metanol pueden generar residuos tóxicos si no se gestionan adecuadamente. Es fundamental implementar sistemas de recuperación o sustitución por solventes verdes (Mata et al., 2010).

Generación y Manejo de Lodos. Los procesos de cultivo y cosecha producen lodos que, sin infraestructura adecuada, pueden causar problemas ambientales como malos olores, patógenos o infiltración contaminante. Se requieren soluciones como digestión anaerobia o compostaje controlado o el uso en la producción de fertilizantes, siempre que se garantice su inocuidad ambiental (Singh & Gu, 2010).

Evaluación del Ciclo de Vida (LCA, Life Cycle Assessment)

En el caso del aprovechamiento energético basado en microalgas, el LCA se utiliza para evaluar de manera integral las ventajas, limitaciones y desafíos ambientales asociados con esta tecnología, considerando desde el cultivo hasta su conversión en biocarburantes y su uso final (Lardon et al., 2009).

Fases del Ciclo de Vida

Se puede desglosar en las siguientes fases:

Cultivo. El cultivo es determinante para la productividad y los impactos del sistema, ya que influye directamente en la cantidad de biomasa generada y, por tanto, en la eficiencia energética del proceso.

Aspectos importantes del cultivo:

Consumo Energético. Los sistemas abiertos, como lagunas poco profundas o estanques tipo raceway, son más económicos y fáciles de implementar, aunque están más expuestos a contaminaciones y variaciones ambientales. En contraste, los sistemas cerrados, como los fotobiorreactores, permiten un control riguroso de las condiciones de cultivo (temperatura, pH, iluminación, CO₂), logrando así mayores tasas de crecimiento y productividad, pero a costa de un mayor consumo energético (Brennan & Owende, 2010; Singh & Gu, 2010).

Uso de Recursos. Desde el punto de vista técnico, este cultivo requiere insumos esenciales para su metabolismo: nitrógeno, fósforo, potasio y, como fuente de carbono, el dióxido de carbono (CO₂). Estos nutrientes son indispensables para la formación de lípidos, proteínas y carbohidratos en la biomasa. En respuesta a la necesidad de hacer este proceso más sostenible, se ha estudiado con éxito el uso de aguas residuales como medio de cultivo, ya que estas contienen altas concentraciones de nutrientes inorgánicos (Park et al., 2011; Rawat et al., 2011)

Según Quinn & Davis, (2015), los fotobiorreactores presentan una mayor huella de carbono que los estanques abiertos debido a su consumo energético, aunque los primeros ofrecen un mayor control de las condiciones de cultivo.

Cosecha. Esta etapa es crítica no solo por su influencia en la eficiencia general del sistema, sino también por los impactos energéticos y ambientales que puede generar. Los métodos más comúnmente utilizados son:

Centrifugación. Alta eficiencia en términos de recuperación de biomasa, logrando tasas superiores al 90 %, pero elevado consumo energético lo que puede afectar la viabilidad

ambiental del proceso si no se acompaña de fuentes energéticas renovables (Amaro et al., 2011; Mata et al., 2010).

Floculación. Menos intensivo en energía, pero puede generar residuos secundarios y afectar la calidad del subproducto si no se controla adecuadamente (Vandamme et al., 2013)

Filtración y Flotación. Alternativas de bajo impacto energético, aunque menos eficientes para especies pequeñas como *Nannochloropsis* o *Chlorella vulgaris*, debido a su baja densidad y pequeño diámetro celular, lo que dificulta su recuperación sin el uso de pretratamientos o coagulantes naturales (Molina Grima et al., 2003).

Procesamiento de Biomasa. Una vez cosechada, la biomasa algal debe ser procesada para la obtención de compuestos de interés, lo cual implica fraccionarla en tres principales grupos:

Los lípidos, que son extraídos principalmente para la producción de biodiésel mediante procesos como la transesterificación.

Los carbohidratos, pueden fermentarse para obtener bioetanol, una alternativa renovable a los combustibles fósiles.

Las proteínas residuales pueden ser reutilizadas como subproductos en la elaboración de alimentos para animales o biofertilizantes (Amaro et al., 2011; Mata et al., 2010).

El secado térmico puede representar hasta el 30 % del consumo energético total, siendo una de las etapas más críticas del proceso (Lardon et al. 2009). Se investigan alternativas como secado solar, extracción en húmedo y microondas para hacer el proceso más sostenible, con el objetivo de reducir el impacto ambiental y mejorar la rentabilidad del sistema.

Conversión a Biocombustibles. Una vez procesada la biomasa microalgal y separados sus principales componentes, estos compuestos pueden ser transformados en distintos tipos de biocombustibles mediante procesos fisicoquímicos y biotecnológicos específicos. Esta etapa es clave en la valorización energética del cultivo de microalgas, ya que determina el tipo de energía renovable obtenida y su aplicabilidad.

Transesterificación (Biodiésel). reacciones de triglicéridos con alcoholes en presencia de un catalizador alcalino o ácido. El resultado son ésteres metílicos (biodiésel) y glicerina como subproducto (Halim et al., 2011; Mata et al., 2010).

Digestión Anaerobia (Biogás). Los residuos de biomasa microalgal, ricos en materia orgánica y nutrientes, pueden ser sometidos a digestión anaerobia, por medio de la descomposición microbiana en ausencia de oxígeno. Útil para calefacción o generación eléctrica (Angelidaki et al., 2011; Passos et al., 2014).

Fermentación Alcohólica (Bioetanol). conversión de carbohidratos en etanol mediante procesos de fermentación utilizando cepas específicas de levaduras, en condiciones anaerobias controladas. Este biocombustible puede mezclarse con gasolina o usarse directamente como energía para motores (Amaro et al., 2011; Chisti, 2007).

Distribución y Uso Final. Una vez convertidos en productos energéticos, los biocombustibles derivados de microalgas pueden ser distribuidos y utilizados en múltiples aplicaciones, como la generación de electricidad, el transporte terrestre o la calefacción industrial y doméstica. Esta etapa comprende procesos logísticos que incluyen el almacenamiento, transporte y comercialización del combustible. Aunque el transporte genera emisiones, el

balance de carbono suele ser favorable frente a combustibles fósiles, especialmente cuando se utilizan sistemas regionales de distribución (Batan et al., 2010; Lardon et al., 2009).

Gestión de Residuos y Subproductos. Entre los residuos más comunes generados por la producción de biocombustibles algales se encuentran:

Biomasa Residual. Después de la extracción de lípidos o carbohidratos, la fracción sólida rica en proteínas y minerales puede ser reutilizada como fertilizante orgánico o alimento para animales, mejorando el cierre de ciclo de nutrientes (Mata et al., 2010; Rawat et al., 2011).

Aguas Residuales. En muchos sistemas cerrados, el agua utilizada para el cultivo puede recircularse, lo que no solo reduce el consumo hídrico, sino que también mantiene nutrientes residuales como nitrógeno y fósforo útiles para nuevos ciclos de producción (Park et al., 2011).

Gases de Escape. El dióxido de carbono (CO₂) generado durante la combustión o fermentación puede ser capturado y redirigido nuevamente a los fotobiorreactores, donde las microalgas lo utilizan como fuente de carbono para la fotosíntesis, cerrando así un ciclo biogénico de carbono (Brennan & Owende, 2010).

Aspectos Evaluados en el LCA

Consumo Energético Total

Estudios han demostrado que los procesos de secado y extracción de lípidos representan los puntos de mayor demanda energética dentro del sistema. El secado térmico previo a la extracción, por ejemplo, puede representar hasta el 30 % del consumo energético total, afectando significativamente la eficiencia global del biocombustible producido (Lardon et al., 2009; Mata et al., 2010).

Impacto en el Cambio Climático

Aunque las microalgas capturan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) durante su cultivo, lo cual contribuye a la mitigación del cambio climático, las etapas posteriores de procesamiento y conversión generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según Batan et al. (2010), el uso de energías renovables para alimentar los sistemas de cultivo, recolección y secado puede reducir significativamente la huella de carbono, mejorando el balance neto de emisiones del proceso algal.

Uso de Recursos Naturales

El uso del agua es otro factor crítico. Si bien algunas especies requieren condiciones estrictas de calidad hídrica, la posibilidad de utilizar aguas residuales tratadas representa una ventaja considerable. Esto no solo reduce el consumo de agua dulce, sino que también contribuye al tratamiento de aguas contaminadas, permitiendo una integración con sistemas de biorremediación (Park et al., 2011; Rawat et al., 2011).

Potencial de Reciclaje y Reutilización

El LCA también valora el potencial de reaprovechamiento de subproductos. La biomasa residual rica en nutrientes, y los compuestos orgánicos no utilizados, pueden ser redirigidos a aplicaciones como fertilizantes, piensos animales o digestión anaerobia, cerrando ciclos de nutrientes y maximizando la eficiencia del sistema (Mata et al., 2010; Passos et al., 2014).

Desafíos y Oportunidades

El aprovechamiento energético basado en microalgas se considera una alternativa renovable con gran potencial; sin embargo, enfrenta diversos desafíos técnicos, económicos y ambientales. Al mismo tiempo, ofrece múltiples oportunidades que podrían transformar los sistemas energéticos y la gestión sostenible de recursos naturales. A continuación, se presentan los principales desafíos y oportunidades identificados en la literatura científica.

Desafíos Técnicos y Científicos

El aprovechamiento energético basado en microalgas representa un campo con potencial, pero enfrenta retos científicos y tecnológicos a lo largo de todo el proceso productivo. A continuación, se analizan algunos de los principales desafíos.

Cultivo y Escalabilidad

Desafío Técnico. El cultivo a gran escala requiere condiciones óptimas de luz, nutrientes, CO₂ y temperatura. Los sistemas disponibles (estanques abiertos o fotobiorreactores) presentan limitaciones asociadas a la contaminación, la eficiencia productiva y los elevados costos operativos (Chisti, 2007).

Oportunidad Técnica. El desarrollo de fotobiorreactores más eficientes, el uso de aguas residuales como medio de cultivo y la identificación de nuevas cepas con mayor contenido lipídico o crecimiento acelerado podrían mejorar significativamente la productividad (Quinn & Davis, 2015).

Cosecha y Pretratamiento

Desafío Técnico. Debido a su baja densidad, la cosecha suele ser costosa y energéticamente intensiva. Métodos como centrifugación, floculación y filtración tienen limitaciones en eficiencia, costo o impacto ambiental (Lardon et al., 2009).

Oportunidad Técnica. Nuevas tecnologías como la cosecha electromagnética, el auto-floculamiento inducido y enzimas especializadas para romper paredes celulares podrían reducir los costos y mejorar la eficiencia (Batan et al., 2010).

Conversión de Biomasa en Biocombustibles

Desafío Científico. Los procesos de extracción de lípidos y su conversión en biodiésel mediante transesterificación son energéticamente demandantes. Solo una fracción limitada de la biomasa se convierte efectivamente en combustible (Chisti, 2007).

Oportunidad Científica. Los avances en biotecnología permiten mejorar enzimas para optimizar la conversión y desarrollar procesos integrados de digestión anaerobia y fermentación para aprovechar residuos y coproductos (Quinn & Davis, 2015).

Eficiencia Energética del Proceso

Desafío Técnico. Para que el proceso sea viable, la energía generada debe superar la energía invertida en cultivo, cosecha y conversión. Actualmente, esta relación no siempre es favorable (Batan et al., 2010).

Oportunidad Técnica. La integración de energías renovables y la mejora de sistemas cerrados de recuperación de CO₂ pueden aumentar la eficiencia general del proceso (Chisti, 2007).

Variedad de Cepas y Genética

Desafío Científico. La variabilidad genética influye en crecimiento, composición bioquímica y eficiencia de conversión. La ingeniería genética requiere conocimientos avanzados y herramientas especializadas (Lardon et al., 2009).

Oportunidad Científica. La edición genética con herramientas como CRISPR abre la posibilidad de mejorar cepas en aspectos como productividad, resistencia y contenido lipídico (Batan et al., 2010).

Oportunidades de Innovación

Las microalgas presentan diversas oportunidades de innovación que podrían transformar el sector energético. A continuación, se detallan algunas de las más relevantes:

Biocombustibles de Tercera Generación

Las microalgas, son una fuente prometedora para la producción de biodiésel y bioetanol. Su alto contenido lipídico y su capacidad para crecer rápidamente en condiciones controladas las hacen ideales para este propósito. Pueden cultivarse en aguas no aptas para la agricultura, evitando la competencia con cultivos alimentarios y reduciendo la presión sobre los recursos hídricos. (Pérez-Bravo et al., 2019).

Producción de Hidrógeno Verde

Investigaciones recientes han demostrado que es posible generar hidrógeno verde mediante la colaboración entre microalgas y bacterias. Este proceso biológico ofrece una alternativa sostenible a los métodos tradicionales de producción de hidrógeno, que suelen depender de combustibles fósiles o de procesos energéticamente intensivos como la electrólisis del agua (Ingrassia, 2024).

Generación de Electricidad Mediante Bioceldas

Se han desarrollado tecnologías que utilizan microalgas para generar electricidad y oxígeno. Estas bioceldas aprovechan la fotosíntesis para producir energía eléctrica de manera sostenible, abriendo nuevas posibilidades para dispositivos electrónicos de bajo consumo y sistemas de energía autónomos (Ciencia en Chile, 2024).

Conversión de Microalgas en Biogás

Las microalgas marinas pueden ser procesadas para producir biogás, una fuente renovable de energía. Este proceso no solo genera energía, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ofreciendo una solución doblemente beneficiosa (Genia Bioenergy, s. f.).

Colaboraciones y Alianzas Estratégicas

Las colaboraciones y alianzas estratégicas para este proceso de producción de energía a partir de microalgas están ganando terreno, ya que diversas empresas, instituciones académicas y organismos gubernamentales están trabajando conjuntamente para desarrollar y comercializar tecnologías innovadoras que aprovechen el potencial de los sistemas biológicos productores de energía. A continuación, se mencionan algunas de las más destacadas:

HPCL y Sea6 Energy (India)

La empresa estatal Hindustan Petroleum Corporation Limited (HPCL) firmó un acuerdo con el startup Sea6 Energy para desarrollar tecnologías que conviertan biomasa de algas marinas en biocombustibles y productos químicos sostenibles. El objetivo es escalar estas tecnologías y mejorar la rentabilidad del cultivo de algas marinas (Biologicals Latam, 2024).

Proyecto SABANA – Universidad de Almería y Socios Europeos

Este proyecto, financiado por el programa Horizonte 2020 de la Unión Europea, tiene como objetivo desarrollar una biorrefinería sostenible basada en microalgas para producir biofertilizantes, biopesticidas y alimentos acuícolas. Participan diversas instituciones académicas y empresas del sector (Unión Europea, 2021).

Universidad de Cádiz (España)

Investigadores de la Universidad de Cádiz, liderados por José Luis García Morales, desarrollaron un proyecto para valorizar residuos del alga invasora *Rugulopteryx okamurae*, transformándolos en biocombustibles y biofertilizantes. Este proyecto fue reconocido en los Premios I+D+i de la Fundación Campus Tecnológico de Algeciras (Universidad de Cádiz, 2021).

Universidad de Arizona (EE.UU.)

La Universidad de Arizona recibió financiación para investigar la conversión de algas en biocombustibles, bioproductos y alimentos de manera económicamente sostenible, con el objetivo de establecer una industria de biocombustibles en Estados Unidos (AQUA, 2013).

Algafuture y Universidad de Málaga

La empresa Algafuture Iniciativas Sostenibles y la Universidad de Málaga han firmado acuerdos para potenciar las prácticas de alumnos y la I+D+i en el ámbito de las algas y microalgas, incluyendo la producción de biodiesel (Universidad de Málaga, 2013).

Proyecto BioMara – Universidades del Reino Unido e Irlanda

El proyecto BioMara, financiado por la Unión Europea, busca nuevas formas de producir biocombustibles a partir de algas, con la participación de universidades como la de Strathclyde, Queen's University de Belfast y la Universidad del Ulster. (Comisión Europea, 2023).

Futuro y Perspectivas

El aprovechamiento energético de las microalgas representa una alternativa con alto potencial dentro de la transición energética, particularmente para países con condiciones climáticas favorables como Colombia. Si bien esta tecnología aún enfrenta limitaciones técnicas, económicas y logísticas, el análisis desarrollado en esta investigación permite identificar escenarios futuros favorables, siempre que se adopten estrategias adaptadas al contexto nacional.

Optimización de Cultivos en Condiciones Tropicales

En el caso colombiano, la eficiencia de los sistemas de cultivo de microalgas puede verse fortalecida por la disponibilidad constante de radiación solar, temperaturas estables y alta biodiversidad microalgal. Estudios nacionales han demostrado que especies nativas pueden adaptarse eficientemente a sistemas abiertos y fotobiorreactores solares, especialmente en regiones como el Valle del Cauca y la Costa Caribe. El fortalecimiento de programas de bioprospección y selección de cepas locales permitiría mejorar la productividad sin depender exclusivamente de cepas importadas, reduciendo costos y riesgos operativos (Ramírez Duque, 2017; Coulson Reinel et al., 2022).

Reducción Progresiva de Costos Mediante Integración Productiva

La viabilidad económica futura en Colombia está estrechamente ligada a la integración de los sistemas de cultivo con infraestructuras existentes, como plantas de tratamiento de aguas residuales, complejos agroindustriales y sistemas energéticos híbridos. Experiencias documentadas a nivel nacional sugieren que el uso de aguas residuales y plantas modulares puede disminuir los costos operativos, al tiempo que se generan beneficios ambientales colaterales. Bajo este enfoque, y de acuerdo con los criterios del Modelo de Evaluación Tridimensional de Viabilidad (MEVT), la viabilidad económica se proyecta como media, con

tendencia a mejorar en escenarios de economía circular y escalamiento gradual (Slade & Bauen, 2013).

Sinergias con Políticas Climáticas y Energéticas Nacionales

El marco normativo colombiano, orientado a la reducción de emisiones y a la diversificación de la matriz energética, abre oportunidades para la incorporación de bioenergía de tercera generación. La alineación con instrumentos como las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) y el Plan Energético Nacional favorece el desarrollo de proyectos piloto que integren producción energética y gestión de emisiones industriales. En este contexto, la bioenergía de origen microalgal podría desempeñar un rol complementario en sectores específicos, más que competir directamente con fuentes convencionales en el corto plazo.

Diversificación de Productos para Fortalecer la Viabilidad Financiera

En Colombia, la viabilidad futura de esta tecnología no depende exclusivamente de la producción de biocombustibles. La posibilidad de generar coproductos de valor agregado — como biofertilizantes, insumos para la industria cosmética o suplementos nutricionales— resulta clave para mejorar la rentabilidad de los proyectos. Algunos estudios nacionales ya evidencian el potencial de estos esquemas de biorrefinería, particularmente en regiones rurales, donde podrían contribuir al desarrollo económico local y a la generación de empleo (Halim et al., 2011).

Fortalecimiento de la Investigación Aplicada y Cooperación Institucional

El análisis de experiencias nacionales muestra que el avance de esta tecnología depende en gran medida del fortalecimiento de la investigación aplicada y de la articulación entre universidades, centros de investigación y sector productivo. Proyectos liderados por instituciones como la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Antioquia evidencian que el

escalamiento tecnológico es viable si se consolidan alianzas estratégicas y se garantiza financiamiento sostenido para proyectos piloto y demostrativos (Mata et al., 2010).

Escenarios de Escalamiento Gradual y Territorialmente Focalizado

A diferencia de otros países con desarrollos industriales avanzados, en Colombia el futuro de la bioenergía de origen microalgal se perfila bajo un modelo de crecimiento gradual y regionalizado. Las zonas no aptas para la agricultura convencional, áreas costeras y regiones con alta disponibilidad hídrica representan escenarios estratégicos para la implementación de sistemas de cultivo a mayor escala. La automatización progresiva y el uso de tecnologías adaptadas a condiciones locales serán determinantes para consolidar esta alternativa energética (Brennan & Owende, 2010; Park et al., 2011; Rawat et al., 2011).

Tendencias y Desarrollo Tecnológico

El avance en tecnologías asociadas al aprovechamiento energético basado en microalgas está siendo impulsado por la necesidad de fuentes energéticas sostenibles y por la optimización de procesos existentes. Entre las principales tendencias destacan:

Mejora en la Eficiencia del Cultivo

Uno de los enfoques principales en el desarrollo tecnológico es aumentar la eficiencia de los cultivos algales. Esto incluye mejorar el rendimiento en términos de la biomasa producida y la concentración de lípidos (componentes clave para la producción de biodiésel) mediante:

Selección Genética y Modificación de Cepas. La ingeniería genética permite desarrollar cepas de microalgas con mayor productividad, mayor acumulación de lípidos y mayor resistencia a condiciones variables. La manipulación genética ha permitido avances en tolerancia a salinidad, temperatura y estrés lumínico (Li et al., 2008).

Optimización de Condiciones de Cultivo. La implementación de sistemas avanzados como fotobiorreactores optimizados o sistemas de cultivo suspendido ha mejorado los rendimientos y ha reducido costos. Paralelamente, se promueve el uso de aguas residuales, lo cual disminuye la demanda de agua dulce y fortalece la sostenibilidad (Wang et al., 2013).

Tecnologías Avanzadas de Cosecha y Extracción

La cosecha y extracción de biomasa microbiana fotosintética es un proceso costoso y complicado que limita la competitividad de los combustibles renovables derivados de microalgas. Por otra parte, se están desarrollando nuevas tecnologías para mejorar estas etapas:

Cosecha Automatizada. El desarrollo de tecnologías de cosecha más eficientes, como el uso de centrifugación, floculación y técnicas de filtración avanzada, promete reducir costos y aumentar la velocidad de cosecha. La automatización de estos procesos también está en auge, lo que permitirá una mayor escalabilidad (Kumar et al., 2022).

Tecnologías de Extracción más Sostenibles. Las tecnologías de extracción están evolucionando hacia métodos menos intensivos en energía y con menor uso de disolventes orgánicos (como hexano o etanol), siendo que son técnicas habitualmente utilizadas tienen diferentes inconvenientes como lo es que demanda de mucho tiempo, no se pueden automatizar, esto hace que presente una baja reproducibilidad y por lo tanto un bajo rendimiento en extracción también. Técnicas emergentes como ultrasonido, microondas o extracción supercrítica con CO₂ reducen el impacto ambiental y mejoran la pureza de los lípidos. Las técnicas de extracción son cada vez mejor ya que las nuevas tecnologías buscan mejorar la eficiencia, reducir el uso de productos químicos y minimizar el consumo energético en cada proceso (Herrero et al., 2012).

Integración de Sistemas Fotovoltaicos y Microalgas (Biofotovoltaicos)

Un desarrollo emergente es la combinación de sistemas fotovoltaicos y la producción de biomas algal. La sinergia entre estos dos sistemas promete aumentar la eficiencia en la generación de energía, al integrar la producción de biocombustibles y electricidad a partir de energía solar:

Biofotovoltaicos. Este concepto implica el uso de paneles solares que alimentan sistemas de cultivo controlado de las microalgas, lo que puede permitir la producción simultánea de electricidad y biomasa. Este enfoque aún está en sus primeras etapas, pero muestra un gran potencial como solución integral de energía renovable (Tschörtner et al., 2019).

Captura de Carbono y Biocombustibles Sostenibles

Las tecnologías que integran el aprovechamiento bioenergético de biomasa algal con sistemas de captura y utilización de carbono están despertando un creciente interés científico y tecnológico.

Tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC). Al integrar sistemas de CAC en las plantas de cultivo, es posible canalizar el CO₂ capturado desde fuentes industriales directamente hacia los fotobiorreactores, donde la biomasa microbiana fotosintética se utiliza como insumo para su crecimiento. Esta simbiosis tecnológica no solo contribuye a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también incrementa la eficiencia del proceso de fijación de carbono, posicionando estos microorganismos fotosintéticos como una opción viable dentro de los sistemas energéticos con emisiones negativas (Chisti, 2013; Singh & Dhar, 2019). La sinergia entre CAC y la producción algal mejora la viabilidad económica del proceso al valorizar el CO₂ capturado como recurso útil en lugar de residuo. Esta integración

permite mejorar la eficiencia en la fijación de carbono y reducir la huella ambiental de la industria energética.

Desarrollo de Biocombustibles de Microalgas con Características Específicas

Los avances en la química de los combustibles orgánicos están permitiendo la creación de productos más especializados:

Biodiésel Avanzado. Se están desarrollando técnicas para producir biodiésel de alta calidad a partir de microalgas, mediante la optimización del proceso de transesterificación y la mejora de la estabilidad fisicoquímica del combustible obtenido. Estos avances permiten que el aprovechamiento energético alcance niveles de eficiencia y competitividad económica comparables a los de los combustibles fósiles (Chisti, 2007).

Bioetanol y Biogás. Además del biodiésel, se están investigando otras rutas de producción de biocombustibles, como el bioetanol y el biogás, los cuales pueden obtenerse mediante el aprovechamiento de biomasa algal a través de procesos de fermentación y digestión anaeróbica. Estas alternativas bioenergéticas representan opciones relevantes dentro de la transición hacia sistemas energéticos más limpios y sostenibles (Muthu & Kamalanathan, 2021).

Tecnologías Emergentes en Biorreactores y Biorrefinerías

Las investigaciones en biorreactores avanzados y biorrefinerías están permitiendo procesos más eficientes y económicos para cultivar, cosechar y procesar microorganismos fotosintéticos:

Biorreactores Fotobiológicos. Que emplean la luz solar o artificial para promover el crecimiento de las microalgas, están siendo continuamente optimizados para mejorar su eficiencia en la captación de luz y el control preciso de variables como temperatura, pH, CO₂ y

nutrientes. Estos avances tecnológicos son fundamentales para aumentar el rendimiento de biomasa algal. Al mantener condiciones de cultivo estables y protegidas de contaminaciones externas, los biorreactores permiten una producción más predecible y sostenible (Brennan & Owende, 2010; Coulson Reinel et al., 2022)

Biorrefinerías de Microalgas. Las biorrefinerías basadas en biomasa algal integran diversas tecnologías de conversión con el fin de maximizar el aprovechamiento de las microalgas. Estos sistemas están diseñados para generar múltiples productos a partir de una única unidad de cultivo, lo que incrementa la rentabilidad del proceso y refuerza su sostenibilidad integral. (Xu et al., 2017).

Escalabilidad y Replicabilidad Global

La escalabilidad hace referencia a la capacidad de ampliar los sistemas de aprovechamiento energético de microalgas a gran escala con el fin de responder a las crecientes demandas energéticas globales. Diversas características favorecen esta posibilidad de expansión:

Escalabilidad

varias de las características que se presentan a continuación, la favorece:

Gran Potencial de Biomasa. Las microalgas pueden generar hasta 30 veces más biomasa por hectárea que los cultivos energéticos convencionales utilizados en la producción de biocombustibles de primera generación, como la soja o el maíz (Mata et al., 2010). Esta capacidad de alto rendimiento, en combinación con la disponibilidad de grandes áreas de agua marina, proporciona un amplio potencial para una producción a gran escala.

Adaptabilidad a Diferentes Condiciones Geográficas. Las microalgas pueden cultivarse en una amplia variedad de condiciones geográficas y climáticas, incluyendo ambientes

salinos, zonas desérticas y áreas no aptas para la agricultura convencional, lo que favorece su escalabilidad a nivel global. Asimismo, el uso de aguas residuales o no potables como medio de cultivo reduce el impacto ambiental y el consumo de recursos hídricos, ampliando la viabilidad del proceso en regiones con escasez de agua dulce. (Chisti, 2007).

Mejora en las Tecnologías de Cultivo y Cosecha. A medida que se desarrollan tecnologías más avanzadas para su cultivo y la cosecha automatizada, la escalabilidad de la producción se vuelve más viable. En el uso de sistemas de biorreactores cerrados y de sistemas de cultivo flotante ha mejorado la eficiencia de la producción a gran escala, lo que reduce el costo unitario de producción (Mata et al., 2010).

Reducción de Costos Mediante Biorrefinerías. La implementación de biorrefinerías para procesar microalgas y producir múltiples productos, está aumentando la rentabilidad y la escalabilidad de la industria. La integración de diferentes productos aumenta la rentabilidad de las instalaciones y puede hacer que la producción a gran escala sea más rentable y sostenible (Xu et al., 2017).

Replicabilidad Global

La replicabilidad se refiere a la capacidad de replicar con éxito las tecnologías y procesos de producción en diferentes partes del mundo, lo que permitiría una adopción global de la tecnología.

Implementación en Regiones con Condiciones Ideales. Las regiones costeras o desérticas, con condiciones de alta radiación solar y acceso al agua salina, presentan condiciones ideales para el cultivo las microalgas. Esto hace que el modelo de producción sea fácilmente replicable en diferentes zonas geográficas del mundo, especialmente en países con largas costas,

como los de América Latina, África y Asia, que tienen recursos subutilizados de agua salina y residuos orgánicos para alimentar los cultivos de microalgas (Li et al., 2008).

Uso de Infraestructura Existente. El aprovechamiento de infraestructuras existentes, como plantas desalinizadoras, instalaciones de tratamiento de aguas residuales y acuicultura, puede facilitar la replicabilidad del potencial energético de los sistemas de cultivos biológicos a gran escala. Estas instalaciones ya están presentes en muchas partes del mundo y pueden servir como base para la creación de sistemas híbridos que integran la producción de microalgas para energía con otras actividades (Wang et al., 2013).

Transferencia de Tecnología y Know-How. La transferencia de tecnología es esencial para la replicabilidad global de la de este proceso de producción de energía. A medida que se desarrollan tecnologías más maduras y las primeras plantas comerciales demuestran su viabilidad económica, el conocimiento y las mejores prácticas podrán ser transferidos a otros países y regiones que deseen adoptar esta tecnología. Esto es particularmente relevante en países en desarrollo que podrían beneficiarse de una fuente de energía renovable local, especialmente en áreas donde las fuentes de energía tradicionales son costosas o difíciles de implementar (FMAM, 2010).

Proyectos de Colaboración Internacional. A cooperación internacional entre países, empresas y centros de investigación ha contribuido significativamente a acelerar el desarrollo de la bioenergía basada en biomasa fotosintética. Iniciativas como la *Algal Biomass Organization* en Estados Unidos y la *European Algae Biomass Association* en Europa fomentan el intercambio de conocimiento técnico y la armonización de procedimientos relacionados con el cultivo, la cosecha y la conversión de biomasa en vectores energéticos renovables. Estos esfuerzos favorecen la estandarización tecnológica y facilitan la replicabilidad de modelos de

aprovechamiento energético sostenible a escala global (Asociación Europea de Biomasa de Algas (EABA), s. f.).

Barreras para la Escalabilidad y Replicabilidad

A pesar de sus múltiples ventajas, la producción de energía basada en microalgas enfrenta diversos desafíos que limitan su escalabilidad y replicabilidad.

En primer lugar, los altos costos iniciales asociados a la infraestructura y tecnologías necesarias representan una barrera significativa para su adopción generalizada. Aunque se han logrado avances en la reducción de costos, la inversión inicial sigue siendo elevada para muchos países (Lardon et al., 2009).

Persisten dificultades técnicas en la cosecha y procesamiento, ya que estos procesos siguen siendo intensivos en energía y requieren soluciones tecnológicas más eficientes (Brennan & Owende, 2010).

Finalmente, la ausencia de políticas públicas claras y marcos regulatorios estables limita la implementación de estos sistemas en muchos contextos nacionales, afectando directamente la viabilidad de los proyectos (Wang et al., 2024).

Visión a Largo Plazo

La visión a largo plazo es prometedora, considerando su potencial para convertirse en una fuente significativa de energía renovable que ayude a mitigar los efectos del cambio climático y a diversificar la matriz energética global. Este campo está en constante evolución, y se espera que en las próximas décadas las tecnologías relacionadas con las microalgas mejoren y se optimicen, permitiendo una mayor adopción y escalabilidad. A continuación, se presentan los principales elementos que configuran esta visión de futuro:

Sostenibilidad Energética Global

A largo plazo, el aprovechamiento energético de las microalgas presenta un alto potencial para contribuir a una matriz energética más sostenible. Estos organismos se caracterizan por elevadas tasas de crecimiento y una mayor eficiencia en la generación de vectores energéticos renovables en comparación con los cultivos agrícolas convencionales, además de requerir menores extensiones de suelo cultivable. La implementación a gran escala de biocarburantes de tercera generación permitiría reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, aportando de manera significativa a la mitigación del cambio climático (Chisti, 2007).

Integración con otras Fuentes de Energía Renovable

En escenarios prospectivos, los sistemas basados en microalgas pueden integrarse de forma complementaria con otras fuentes renovables, como la energía solar y eólica, dentro de estrategias energéticas diversificadas y sostenibles. Las instalaciones destinadas al aprovechamiento bioenergético podrían articularse con plantas solares o parques eólicos, generando sinergias que optimicen el uso de los recursos disponibles y favorezcan una oferta energética más estable y continua. Estos sistemas permiten la obtención de múltiples coproductos de valor agregado —como biogás, compuestos químicos renovables y subproductos aprovechables en alimentación o agricultura—, lo que impulsa esquemas de economía circular mediante la reutilización integral de la biomasa residual (Xu et al., 2017).

Avances Tecnológicos y Reducción de Costos

La evolución tecnológica en el cultivo, cosecha y procesamiento de las microalgas probablemente conducirá, con el tiempo, a reducciones sustanciales en los costos de producción. Ello favorecerá la instalación de plantas industriales de biocombustibles algales a gran escala y

mejorará su competitividad frente a fuentes tradicionales de energía. Se anticipa un avance considerable en la automatización de la cosecha y el procesamiento, lo cual permitirá escalar los sistemas con mayor eficiencia y reducir los costos operativos en el largo plazo (Wang et al., 2013).

Diversificación Económica y Creación de Empleo

La expansión de la industria basada en microalgas impulsará nuevas oportunidades económicas relacionadas con la biotecnología, la ingeniería ambiental, la agricultura especializada y el diseño de biorreactores. Su crecimiento puede estimular la innovación, dinamizar economías locales y generar empleos verdes en comunidades rurales y costeras, promoviendo alternativas sostenibles de desarrollo socioeconómico (Coulson Reinel et al., 2022; Escobedo & Calderón, 2021).

Replicabilidad y Expansión Global

El modelo de sistemas microalgales productores de energía podría replicarse en regiones diversas, particularmente en zonas costeras o desérticas con disponibilidad de agua salina o residual. Esta característica favorece su expansión a nivel global, incluso en territorios donde el uso de tierras cultivables es limitado. Por ello, la replicabilidad será un factor clave para consolidar la producción sostenible de energía en distintos contextos geográficos (Chisti, 2007).

Impacto Ambiental Positivo

Las microalgas tienen la capacidad de capturar dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera durante su crecimiento, lo que contribuye a la reducción de los gases de efecto invernadero y al secuestro de carbono. Adicionalmente, los sistemas algales pueden integrarse en procesos de tratamiento de aguas residuales o en la recuperación de ambientes marino-costeros degradados, contribuyendo a estrategias de biorremediación (Xu et al., 2017).

Desafíos por Superar. A pesar del panorama alentador, la bioenergía derivada de microalgas enfrenta desafíos que deben abordarse para permitir su expansión a escala industrial:

Altos Costos Iniciales. La implementación de sistemas como fotobiorreactores, estanques de cultivo y tecnologías avanzadas de cosecha y procesamiento requiere inversiones iniciales significativas. Aunque los costos han disminuido con los avances tecnológicos, aún representan un obstáculo importante (Brennan & Owende, 2010; Lardon et al., 2009).

Optimización Tecnológica

Los procesos actuales aún son mejorables en términos de eficiencia energética, aprovechamiento de recursos (agua, nutrientes y CO₂) y escalabilidad. La automatización y optimización de los procesos es esencial para lograr sistemas competitivos a nivel industrial (Coulson Reinel et al., 2022; Singh & Gu, 2010).

Desarrollo de Mercados Sostenibles

Para que los biocombustibles algales sean competitivos, es fundamental contar con políticas públicas robustas, incentivos fiscales, financiamiento y un marco normativo claro. La ausencia de estos elementos limita la consolidación de mercados sostenibles y retrasa la adopción de esta tecnología (Wang et al., 2024).

Recomendaciones para el Futuro

A continuación, se presentan algunas recomendaciones clave para el futuro de la producción de energía a través de microalgas, basadas en la investigación y el análisis de las tendencias actuales en este campo:

Mejorar la Eficiencia de los Procesos de Cultivo y Conversión

Es necesario profundizar en la investigación orientada al aumento de la eficiencia fotosintética y al mejoramiento de los métodos de extracción de biomasa. El perfeccionamiento de fotobiorreactores y tecnologías sostenibles de cultivo será crucial para incrementar la productividad (Anto et al., 2020).

Incorporación de Sistemas de Economía Circular

La valorización de subproductos derivados de las microalgas —como carbohidratos, proteínas o compuestos bioactivos— permitirá incrementar la rentabilidad y reducir la generación de residuos. Integrar estos subproductos en sectores como la agricultura, acuicultura o nutrición animal potencia la sostenibilidad del sistema (Brennan & Owende, 2010).

Desarrollo de Políticas y Marcos Regulatorios de Apoyo

Es esencial crear un marco regulatorio que fomente la investigación y el desarrollo de la biotecnología de microalgas. Esto incluye incentivos fiscales, subsidios y financiación pública para proyectos de investigación y desarrollo que busquen mejorar la rentabilidad y la escalabilidad del aprovechamiento de energía microalgal. Las políticas deben ser diseñadas para garantizar la sostenibilidad ambiental, la equidad social y la seguridad alimentaria, evitando conflictos con la producción de alimentos (Chisti, 2007).

Fomento de Colaboraciones Multidisciplinarias y Alianzas Estratégicas

El éxito en la implementación de proyectos de producción de energía por medio de microalgas dependerá, en gran medida, de la colaboración entre diversas disciplinas como la biotecnología, la ingeniería, la economía y la política ambiental. Es fundamental fomentar alianzas estratégicas entre gobiernos, universidades, empresas y centros de investigación para

compartir conocimientos, recursos y capacidades técnicas, lo cual permitirá acelerar el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles (Gouveia & Oliveira, 2009; Murphy et al., 2015).

Explorar Nuevas Aplicaciones y Diversificación de Productos

La investigación debe orientarse no solo al biodiésel, sino también a otras aplicaciones, como la producción de bioetanol, biogás, plásticos biodegradables, y productos farmacéuticos. La diversificación en la producción de valor agregado permitirá aumentar la viabilidad económica de los proyectos y reducir la dependencia de un solo producto. Se puede mitigar los riesgos asociados con fluctuaciones en los precios de los biocombustibles (Gouveia & Oliveira, 2009; Mata et al., 2010).

Promover la Investigación en Genética de Microalgas y Biotecnología

El futuro del aprovechamiento energético de las microalgas podría beneficiarse enormemente de avances en la genética y la biotecnología. Se recomienda continuar con los estudios sobre la modificación genética de microalgas para mejorar su rendimiento en términos de crecimiento, acumulación de lípidos, y resistencia a condiciones adversas. La mejora genética también podría permitir la creación de cepas microscópicas fotosintéticas adaptadas a condiciones climáticas específicas, lo que facilitaría su cultivo en una mayor variedad de regiones geográficas (Anto et al., 2020).

Integración con Otras Energías Renovables

La combinación de sistemas algales con energía solar, eólica u otras fuentes renovables genera sistemas híbridos más flexibles y resilientes. Este enfoque es especialmente pertinente en países como Colombia, donde existe alta radiación solar y potencial eólico, contribuyendo así a una matriz energética más diversificada y sostenible (Murphy et al., 2015; Slade & Bauen, 2013).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir que los sistemas de bioenergía basados en microalgas representan una alternativa técnica, ambiental y estratégicamente viable para Colombia, siempre que se desarrollen estrategias integrales que articulen avances científicos, infraestructura tecnológica, condiciones ambientales favorables y marcos normativos específicos.

En relación con el objetivo general, se verificó que las microalgas poseen un alto potencial como fuente alternativa y sostenible de energía. Su capacidad para generar biomasa con altos contenidos lipídicos, su eficiencia fotosintética, el rápido crecimiento celular y su adaptabilidad a distintos medios de cultivo las posicionan como materia prima sólida para la producción de biocombustibles como biodiésel, bioetanol y biogás. Asimismo, presentan características que favorecen su integración con procesos de biorremediación y de captura de carbono, aumentando su contribución a un modelo energético sostenible.

Respecto al primer objetivo específico, centrado en identificar especies de alto potencial energético, se concluye que *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis* spp. y *Cyclotella meneghiniana* destacan por su composición bioquímica y adaptabilidad al entorno colombiano.

Nannochloropsis spp. sobresale por sus contenidos lipídicos superiores al 30 %, mientras que *Chlorella vulgaris* presenta alta eficiencia en el tratamiento de aguas residuales y una tasa de crecimiento favorable, lo que refuerza su idoneidad para sistemas integrales de producción energética y ambiental.

Con relación al segundo objetivo específico, que buscaba analizar procesos de producción energética a partir de microalgas mediante estudios de caso y evidencia internacional, se concluye que Colombia cuenta con bases técnicas y logísticas para iniciar

proyectos piloto en diversas regiones del país. No obstante, los cuellos de botella tecnológicos más relevantes se concentran en la cosecha, el secado y la extracción de lípidos, etapas que representan los mayores costos operativos y energéticos del proceso. Los resultados comparados con países como México, Brasil y Estados Unidos muestran que la optimización de estas etapas es determinante para la competitividad del biocombustible algal frente a combustibles fósiles y otras fuentes renovables.

De acuerdo con el tercer objetivo específico, orientado a valorar el impacto ambiental de la producción energética mediante microalgas, se concluye que este sistema puede reducir significativamente las emisiones de CO₂, reutilizar aguas residuales, minimizar la presión sobre el suelo agrícola y disminuir la dependencia de cultivos energéticos terrestres. Sin embargo, existen desafíos potenciales asociados al manejo de residuos, el riesgo de eutrofización por mal manejo, la posible introducción de especies invasoras y la generación de residuos químicos derivados de procesos de extracción. En consecuencia, la viabilidad ambiental depende de la implementación de tecnologías limpias y de protocolos de manejo adecuados.

De manera transversal, se evidencia que Colombia presenta una combinación excepcional de radiación solar, disponibilidad hídrica, biodiversidad algal y zonas geográficas aptas para cultivos extensivos, lo cual fortalece el potencial de estos sistemas biológicos productores de energía. Sin embargo, la falta de un marco normativo específico para la bioenergía con microalgas, así como la limitada infraestructura industrial en zonas rurales, constituyen barreras significativas que deben abordarse mediante políticas públicas, inversión en I+D y alianzas entre academia, industria y gobierno.

Finalmente, se concluye que la producción energética basada en microalgas puede convertirse en una estrategia clave dentro de la transición energética colombiana, contribuyendo

a los objetivos de reducción de emisiones, diversificación energética y desarrollo de economías circulares. No obstante, para transitar hacia la escala industrial se requiere fortalecer las capacidades técnicas, económicas y regulatorias, así como promover pilotajes regionales y esquemas de apoyo gubernamental que aceleren la implementación de esta tecnología en el país.

Referencias Bibliográficas

Agencia de Noticias UNAL. (2015, 22 de junio). *Algas, futuro de los biocombustibles*. Universidad Nacional de Colombia. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co>

Agencia de Noticias UNAL. (2014, 28 de noviembre). *Biocombustibles a partir de algas abastecerán fincas del Tolima*. Universidad Nacional de Colombia. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co>

Alba, C. (2013). *Extracción de lípidos a partir de biomasa microalgal: Evaluación del método Bligh & Dyer* (Tesis de pregrado). Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/e8111b28-2d65-43d4-889c-601c4d21287d/content>

Amaro, H. M., Guedes, A. C., & Malcata, F. X. (2011). Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*, 88(10), 3402-3410. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.12.014>

Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D. J., Plugge, C. M., & Stams, A. J. M. (2011). Biomethanation and Its Potential. *Methods in Enzymology*, 494, 327-351. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385112-3.00016-0>

Anto, S., Mukherjee, S. S., Muthappa, R., Mathimani, T., Deviram, G., Kumar, S. S., Verma, T. N., & Pugazhendhi, A. (2020). Algae as green energy reserve: Technological outlook on biofuel production. *Chemosphere*, 242, 125079. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.125079>

Aqua. (2013, 11 de octubre). *Estados Unidos: Universidad de Arizona realizará investigación por millones de dólares para biocombustibles en base a algas*.

<https://www.aqua.cl/estados-unidos-universidad-de-arizona-realizara-investigacion-por-us-millones-para-biocombustibles-en-base-a-algas-2/>

Arpia, A. A., Chen, W. H., Lam, S. S., Rousset, P., & de Luna, M. D. G. (2021). Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review. En *Chemical Engineering Journal* (Vol. 403). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126233>

Asociación Europea de Biomasa de Algas (EABA). (s. f.). *EABA is the backbone for the Algae sector in Europe*. <https://www.eaba-association.org/en>

Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2023). *Algae Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology* (2.^a ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003187707>

Batan, L., Quinn, J., Willson, B., & Bradley, T. (2010). Net energy and greenhouse gas emissions evaluation of biodiesel derived from microalgae. *Environmental Science & Technology*, 44(20), 7975–7980. <https://doi.org/10.1021/es102052y>

Biologicals Latam. (2024, 16 de diciembre). *Colaboración entre empresas indias buscará transformar algas marinas en productos sostenibles*. <https://biologicalslatam.com/colaboracion-entre-empresas-indias-buscara-transformar-algas-marinas-en-productos-sostenibles/>

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557-577. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.10.009>

- Cerón-Vivas, A., Acosta, J. P., Alvear, L. V., & Gamarra, Y. (2019). Potencial bioquímico de metano de la *Chlorella vulgaris*: influencia de la hidrólisis térmica. *Revista ION*, 31(2), 27-36. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018002>
- Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102(1), 71-81. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.06.159>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Chisti, Y. (2013). Constraints to commercialization of algal fuels. *Journal of Biotechnology*, 167(3), 201-214. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTECH.2013.07.020>
- Chum, H. L., & Overend, R. P. (2001). Biomass and renewable fuels. *Fuel Processing Technology*, 71(1-3), 187-195. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00146-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00146-1)
- Ciencia en Chile. (2024, 5 de agosto). *Desarrollan innovadora tecnología que utiliza algas para generar electricidad y oxígeno*. <https://www.cienciaenchile.cl/desarrollan-innovadora-tecnologia-que-utiliza-algas-para-generar-electricidad-y-oxigeno/>
- Cioabla, A. E., Ionel, I., & Cioablă, A. E. (2014). *Biogas production based on agricultural residues. From history to results and perspectives*. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 12(4), 43–48. <https://www.researchgate.net/publication/228479920>
- Comisión Europea. (2023). *El proyecto comunitario BioMara busca nuevas formas de producir biocombustibles a partir de algas*. <https://cordis.europa.eu/article/id/30660-eufunded-project-biomara-seeks-new-ways-to-produce-biofuels-from-algae/es>

Costa, J. A. V., & de Morais, M. G. (2011). The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae. *Bioresource Technology*, *102*(1), 2-9.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.014>

Coulson Reinel, J. P., Torres Virviescas, M. J., Henao Castro, A., & Díaz Páramo, G. X. (2022).

Evaluación del potencial de cultivo de cuatro especies microalgales nativas del departamento de Bolívar, Colombia. *Revista Mutis*, *12*(2).

<https://doi.org/10.21789/22561498.1821>

Demirbas, A. (2009). Biofuels: Securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*, *50*(9), 2239–2249. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.010>

Escobedo, M. J., & Calderón, A. C. (2021). Microalgal biomass with high potential for the biofuels production. En *Scientia Agropecuaria* (Vol. 12, Número 2, pp. 265-282). Universidad Nacional de Trujillo. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.030>

FAO. (2013). *La bioenergía en América Latina y el Caribe: El estado del arte en países seleccionados*. <https://www.fao.org/publications>

Fondo para el Medio Ambiente Mundial. (2010). *Transferencia de tecnología para mitigar el cambio climático*. https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/gef06_spn_0.pdf

Genia Bioenergy. (s. f.). *Biogás a partir de algas marinas*. <https://geniabienergy.com/biogas-a-partir-de-algas/>

González, L. E., Cañizares, R. O., & Baena, S. (1997). Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris*

and *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource Technology*, 60(3), 259-262.

[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00029-1)

Gouveia, L., & Oliveira, A. C. (2009). Microalgae as a raw material for biofuels production.

<https://doi.org/10.1007/s10295-008-0495-6>

Graham, L. K. E., & Wilcox, L. W. (2000). *The origin of alternation of generations in land plants:*

a focus on matrotrophy and hexose transport. <https://doi.org/10.1098/rstb.2000.0614>

Halim, R., Gladman, B., Danquah, M. K., & Webley, P. A. (2011). Oil extraction from microalgae for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 178-185.

<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.06.136>

Hernández, D. G. (2019). *Combustible a partir de microalgas: Una opción con futuro en*

Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

<https://periodico.unal.edu.co/articulos/combustible-a-partir-de-microalgas-una-opcion-con-futuro-en-colombia/>

Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. En *Revista de*

Biología Marina y Oceanografía (Vol. 49, Número 2, pp. 157-173). Universidad de

Valparaíso. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>

Herrero, M., Mendiola, J. A., Plaza, M., & Ibañez, E. (2012). Screening for bioactive compounds

from algae. En *Advanced Biofuels and Bioproducts* (Vol. 9781461433484, pp. 833-872).

Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3348-4_35

- Hincapie, J. A., Mejia, C. Z., & Prieto, L. E. (2019). Climate change and water resources in Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, 22(2).
<https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1368>
- Hughes, A. D., Kelly, M. S., Black, K. D., & Stanley, M. S. (2012). Biogas from Macroalgae: Is it time to revisit the idea? En *Biotechnology for Biofuels* (Vol. 5).
<https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-86>
- ICEX. (2022). *Energía solar en Colombia*. <https://www.icex.es>
- IDEAM. (2022). *Estudio nacional del agua en Colombia*. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/publicacion-jue-23032023-1200>
- Ingrassia, V. (2024, 4 de abril). *Logran producir hidrógeno verde a partir de algas y bacterias: Por qué no solo servirá para generar energía*. Infobae.
<https://www.infobae.com/america/medio-ambiente/2024/04/04/logran-producir-hidrogeno-verde-a-partir-de-algas-y-bacterias-por-que-no-solo-servira-para-producir-energia/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jaramillo, J. J. (2011). *Evaluación tecnoeconómica de la producción de biocombustibles a partir de microalgas* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9747>
- Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and

other products. En *Microbial Cell Factories* (Vol. 17, Número 1). BioMed Central Ltd.
<https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>

Kumar, L., Anand, R., Shah, M. P., & Bharadvaja, N. (2022). Microalgae biodiesel: A sustainable source of energy, unit operations, technological challenges, and solutions. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 8, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100145>

Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009). Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. En *Environmental Science and Technology* (Vol. 43, Número 17, pp. 6475-6481). <https://doi.org/10.1021/es900705j>

Leite, G. B., Abdelaziz, A. E. M., & Hallenbeck, P. C. (2013). *Algal Biofuels; Challenges and Opportunities*. Bioresource technology. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.007>.

Li, Y., Horsman, M., Wu, N., Lan, C. Q., & Dubois-Calero, N. (2008). Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress*, 24(4), 815-820. <https://doi.org/10.1021/bp.070371k>

Liu, Z. Y., Wang, G. C., & Zhou, B. C. (2008). Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 99(11), 4717-4722.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.073>

Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.07.020>

McKendry, P. (2002a). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)

McKendry, P. (2002b). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies.

Bioresource Technology, 83(1), 47-54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)

Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. Wiley-Interscience.

<https://books.google.fr/books?id=kHRhlmT0ggC>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2022). *Plan Nacional de Negocios Verdes 2022-*

2030. <https://www.minambiente.gov.co/negocios-verdes/plan-nacional-de-negocios-verdes/>

Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Actualización del Plan Energético Nacional (PEN) 2022–2052*. República de Colombia.

https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Actualizacion_PEN_2022-2052_VF.pdf

Molina Grima, E., Belarbi, E. H., Ación Fernández, F. G., Robles Medina, A., & Chisti, Y. (2003).

Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics.

Biotechnology Advances, 20(7-8), 491-515. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(02\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(02)00050-2)

Murphy, J. D., Drosig, B., Allen, E., Jerney, J., Xia, A., Herrmann, C., & Baxter, D. (2015). *A*

perspective on algal biogas. IEA Bioenergy. [https://www.ieabioenergy.com/wp-](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/09/AD_of_Algae_ebook_end.pdf)

[content/uploads/2015/09/AD_of_Algae_ebook_end.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/09/AD_of_Algae_ebook_end.pdf)

Muthu, B., & Kamalanathan, A. (2021). *Microalgae as a Renewable Source of Energy-Processing*

and Biofuel Production a Short Review. <https://doi.org/10.37028/lingcure.v5nS1.1600>

Núñez Caderon, J. A. (2014). *Producción de biohidrógeno a partir de Chlorella colombianensis*.

Universidad autónoma de Bucaramanga. <https://repository.unab.edu.co/>

- Pámanes-Carrasco, G., Murillo-Ortiz, M., Reyes-Jáquez, D., Valencia, R., & Herrera-Torres, E. (2021). Reducción en la producción ruminal de metano in vitro con la inclusión de Cucurbita foetidissima. *Revista MVZ Cordoba*, 26(1). <https://doi.org/10.21897/rmvz.1941>
- Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35-42. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.06.158>
- Passos, F., Uggetti, E., Carrère, H., & Ferrer, I. (2014). Pretreatment of microalgae to improve biogas production: A review. *Bioresource Technology*, 172, 403-412. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.08.114>
- Pérez-Bravo, S. G., Mendoza-Martínez, A. M., Castañeda-Chávez, M. del R., & Aguilera-Vázquez, L. (2019). Bioenergía a partir de microalgas en México. *Revista de Energías Renovables*, 23-34. <https://doi.org/10.35429/jre.2019.8.3.23.34>
- Perez-Garcia, O., Escalante, F. M. E., de-Bashan, L. E., & Bashan, Y. (2011). Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. *Water Research*, 45(1), 11-36. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2010.08.037>
- Pittman, J. K., Dean, A. P., & Osundeko, O. (2011). The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology*, 102(1), 17-25. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.06.035>
- Quinn, J. C., & Davis, R. (2015). The potentials and challenges of algae based biofuels: A review of the techno-economic, life cycle, and resource assessment modeling. *Bioresource Technology*, 184, 444-452. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.10.075>

- Ramírez Duque, J. L. (2017). Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobiorreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 45–58. <https://10.18779/cyt.v6i2.178>
- Ramírez Mérida, L. G., Jacob-Lopes, E., & Queiroz Zepka, L. (2014). Fotobiorreactor: herramienta para cultivo de cianobacterias. *Ciencia y Tecnología*, 6(2), 9. <https://doi.org/10.18779/cyt.v6i2.178>
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411-3424. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.11.025>
- Serrano, J. (2012). *Estudio de cuatro cepas nativas de microalgas para evaluar su potencial uso en la producción de biodiesel* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10636>
- Sharma, K. K., Schuhmann, H., & Schenk, P. M. (2012). High lipid induction in microalgae for biodiesel production. *Energies*, 5(5), 1532-1553. <https://doi.org/10.3390/en5051532>
- Silos Vega, C. A. (2021). *Efecto del medio de cultivo sobre el crecimiento y valor nutricional de *Arthrospira maxima**. https://sunspiru.com/wp-content/uploads/2022/09/TesisM.FCQ_.2021.Efecto.Silos_.PDFVersio%CC%81n-pu%CC%81blica.pdf
- Singh, J., & Dhar, D. W. (2019). Overview of carbon capture technology: Microalgal biorefinery concept and state-of-the-art. En *Frontiers in Marine Science* (Vol. 6, Número FEB). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00029>

- Singh, J., & Gu, S. (2010). Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2596-2610.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.06.014>
- Slade, R., & Bauen, A. (2013). Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, 53, 29-38.
<https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2012.12.019>
- Tschörtner, J., Lai, B., & Krömer, J. O. (2019). Biophotovoltaics: Green power generation from sunlight and water. En *Frontiers in Microbiology* (Vol. 10, Número APR). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00866>
- Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M. K., Forde, G. M., & Hoadley, A. F. A. (2010). *Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels*. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2(1), 012701. <https://doi.org/10.1063/1.3294480>
- Unión Europea. (2021). *Biorrefinería sostenible de algas para agricultura y acuicultura (SABANA)* (Programa Horizonte 2020, Acuerdo de subvención n.º 727874).
<https://www2.ual.es/sabana/sabana-2/>
- Universidad de Antioquia. (2024, 7 de febrero). *Biocombustible a partir del CO₂ capturado por microalgas* [Nota periodística]. <https://www.udea.edu.co>
- Universidad de Cádiz. (2021, 1 de septiembre). *Un proyecto de la UCA aprovecha los residuos de algas invasoras para obtener biocombustibles y biofertilizantes*.
<https://www.uca.es/noticia/un-proyecto-de-la-uca-aprovecha-los-residuos-de-algas-invasoras-para-obtener-biocombustibles-y-biofertilizantes/>

- Universidad de los Andes. (2017, 20 de junio). *Microalgas: alternativa ecológica para limpiar fuentes hídricas*. <https://uniandes.edu.co>
- Universidad de Málaga. (2013, 24 de junio). *Algafuture y la Universidad de Málaga formalizan dos acuerdos para potenciar las prácticas de alumnos y la I+D+i en el ámbito universitario*. <https://www.uma.es/otri/noticias/algafuture-y-la-universidad-de-malaga-formalizan-dos-acuerdos-para-potenciar-las-practicas-de-alumnos-y-la-idi-en-el-ambito-universitario/>
- UPME. (2005). *Atlas de radiación solar de Colombia*. www.upme.gov.co
- Vandamme, D., Foubert, I., & Muylaert, K. (2013). Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. *Trends in Biotechnology*, 31(4), 233-239. <https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2012.12.005>
- Wang, H., Zhang, W., Chen, L., Wang, J., & Liu, T. (2013). The contamination and control of biological pollutants in mass cultivation of microalgae. *Bioresource Technology*, 128, 745-750. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.10.158>
- Wang, M., Ye, X., Bi, H., & Shen, Z. (2024). *Microalgae biofuels: Illuminating the path to a sustainable future amidst challenges and opportunities*. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17, Article 61. <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02461-0>
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. En *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 85, Número 4, pp. 849-860). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- Xu, F., Li, Y., Ge, X., Yang, L., & Li, Y. (2017). *Anaerobic digestion of food waste- challenges and opportunities*. <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>

Apéndices

A continuación, se presentan las matrices comparativas que sirvieron como instrumento de análisis documental para la evaluación de la viabilidad técnica, económica y ambiental de la producción de biocombustibles a partir de microalgas.

Apéndice A

Matriz comparativa de análisis documental – Viabilidad técnica

Referencia bibliográfica (APA)	Especie de microalga estudiada	Variable técnica	Indicador	Resultado reportado	Interpretación de viabilidad	Nivel de desempeño (Alto / Medio / Bajo)
(Chisti, 2007). <i>Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances.</i>	<i>Nannochloropsis oculata</i>	Contenido lipídico	% lípidos / peso seco	35–60 %	Alta concentración lipídica. Alta viabilidad para biodiésel.	Alto
Coulson Reinel et al. (2022). <i>Revista Colombiana de Biotecnología</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	Productividad de biomasa	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	0.4–0.8	Productividad adecuada para sistemas tropicales.	Medio
Silos Vega (2021). <i>Revista Iberoamericana de Energía.</i>	<i>Spirulina platensis</i>	Eficiencia energética	% Eout/Ein	40–50	Bajo rendimiento lipídico; viable para biogás.	Bajo
(Hernández, 2019). <i>Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental.</i>	<i>Scenedesmus obliquus</i>	Contenido lipídico	% lípidos / peso seco	25–45 %	Potencial medio, adaptable a aguas residuales.	Medio
(Wang et al., 2024). <i>Biotechnology</i>	<i>Tetraselmis suecica</i>	Productividad de biomasa	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	0.2–0.5	Apta para sistemas	Medio

*for Biofuels
and
Bioproducts..*

mixtos
costeros.

Nota. Se evalúan el desempeño técnico de distintas especies de microalgas con potencial para la producción de bioenergía. Se comparan variables como el contenido lipídico, la productividad de biomasa y la eficiencia energética, junto con los indicadores utilizados en cada investigación y los resultados reportados. A partir de estos datos se interpreta el nivel de viabilidad y desempeño de cada especie, clasificándolas en categorías de alto, medio o bajo potencial según su capacidad para la generación de biocombustibles o su adaptación a diferentes sistemas de cultivo. *Fuente.* Autora (2025).

Apéndice B

Matriz comparativa de análisis documental – Viabilidad económica

Referencia bibliográfica (APA)	País / Proyecto	Variable económica	Indicador	Valor estimado	Interpretación	Nivel de viabilidad (A/ M /B)
(Leite et al., 2013). <i>Renewable Energy</i> .	Brasil	Costo de producción	USD/L	1.10–1.40	Competitivo en clima tropical.	Medio
(Mata et al., 2010). <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> .	España	ROI	Años	6–8	Periodo de retorno medio-alto.	Medio
(Hernández, 2019). <i>Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental</i> .	México	Costo por tonelada de biomasa	USD/t	400–550	Costos moderados, integrados con biorremediación.	Alto
Coulson Reinel et al. (2022). <i>Revista Colombiana de Biotecnología</i> .	Colombia (escenario base)	Costo de producción	USD/L	2.00–4.00	No competitivo sin subsidios o co-productos.	Bajo
(Wang et al., 2024). <i>Biotechnology for Biofuels and Bioproducts</i> .	Colombia (escenario optimizado)	ROI	Años	3–5	Viable con energía solar y coproductos.	Alto

Nota. resume diversos estudios que analizan la viabilidad económica de la producción de bioenergía a partir de microalgas en diferentes países y contextos tecnológicos. Se comparan indicadores como el costo de producción y el retorno de la inversión (ROI), mostrando que la competitividad económica depende de factores como las condiciones climáticas, la integración con otros procesos productivos y el aprovechamiento de coproductos. En general, los resultados

indican niveles de viabilidad variables, desde bajos en escenarios sin optimización tecnológica hasta altos cuando se incorporan estrategias como energía solar o sistemas integrados.

Fuente. Autora (2025).

Apéndice C

Matriz comparativa de análisis documental – Viabilidad ambiental

Referencia bibliográfica (APA)	Aspecto ambiental evaluado	Indicador	Valor reportado	Resultado o hallazgo	Interpretación ambiental	Nivel de impacto (A/ M/ B)
IPCC (2023). <i>Sixth Assessment Report (AR6)</i> .	Emisiones de GEI	Huella de carbono (kg CO ₂ eq/L)	1.0–1.5	Reducción del 65–75 % frente a diésel fósil.	Alta mitigación de emisiones.	Alto
(FAO, 2013). <i>Microalgae-based biofuels</i> .	Uso del recurso hídrico	L de agua/kg biomasa	2,000–3,000	Consumo moderado; mejorable con aguas residuales.	Requiere optimización hídrica.	Medio
Leite et al. (2013). <i>Renewable Energy</i> .	Energía renovable utilizada	% energía renovable	50–70	Uso de energía solar reduce huella energética.	Alta sostenibilidad.	Alto
Al Shehhi et al. (2025). <i>Frontiers in Microbiology</i> .	Reutilización de nutrientes	% de reutilización	60–75	Integración con tratamiento de aguas residuales.	Promueve economía circular.	Alto
(Wang et al., 2024). <i>Biotechnology and Bioproducts</i> .	Efectos ecológicos	Cualitativo	-	Mínimo impacto sobre ecosistemas acuáticos.	Compatible con sostenibilidad ambiental.	Alto

Nota. Se presenta resultados de investigaciones que evalúan el impacto ambiental asociado al uso energético de microalgas mediante indicadores como huella de carbono, consumo de agua, uso de energía renovable y reutilización de nutrientes. Los estudios reportan reducciones significativas de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con combustibles fósiles y destacan el potencial de estos sistemas para integrarse con procesos de economía circular. En conjunto, los resultados evidencian un nivel de impacto ambiental generalmente favorable cuando se aplican prácticas de gestión sostenible. *Fuente*. Autora (2025).

Apéndice D

Viabilidad ambiental — Indicadores cuantitativos reportados

Indicador	Valor reportado	Interpretación
Radiación solar promedio nacional	4,5 kWh·m ⁻² ·día ⁻¹ (ICEX, 2022)	Nivel alto, favorable para cultivos fotosintéticos.
Rango solar por regiones	4–6 kWh·m ⁻² ·día ⁻¹ ; La Guajira 5.0–6.0; Pacífico <3.5 (UPME, 2005; ICEX, 2022)	Zonas óptimas para cultivos abiertos en regiones áridas y semiáridas.
Temperatura promedio	20–30 °C en la mayor parte del territorio	Intervalo ideal para la mayoría de microalgas tropicales.
Índice de aridez promedio	0,23 (Hincapié et al., 2019)	Condiciones moderadamente húmedas.
Territorio con excedentes hídricos	48,5 % (Hincapié et al., 2019)	Apto para futuros cultivos a escala piloto e industrial.
Territorio con déficit hídrico	6,9 % (Hincapié et al., 2019)	Riesgo localizado; requiere sistemas cerrados.
Captura potencial de CO ₂ (ej. biocrudo)	Hasta 300 t CO ₂ ·ha ⁻¹ ·año ⁻¹ (Univ. de Antioquia)	Alto potencial de mitigación climática.
Impacto climático proyectado	Aumento de ~2 °C; hasta 4 °C en regiones (Hincapié et al., 2019)	Exige cultivos resilientes al cambio climático.

Nota. En la tabla resume variables ambientales relevantes para evaluar el potencial de cultivo de

microalgas en Colombia, incluyendo radiación solar, temperatura, disponibilidad hídrica y

capacidad de captura de CO₂. Los valores reportados indican que gran parte del territorio

presenta condiciones favorables para el desarrollo de cultivos fotosintéticos, aunque algunos

factores regionales, como el déficit hídrico o los efectos del cambio climático, pueden requerir

estrategias de adaptación tecnológica. *Fuente.* Autora (2025).

Apéndice E

Viabilidad técnica — Productividad, composición y procesos

Criterio / Especie / Proceso	Valor reportado	Implicación técnica
Productividad de biomasa (general)	0.1 – 0.8 g·L ⁻¹ ·día ⁻¹ (Pérez-Bravo et al., 2019)	Apto para pilotos; escalamiento requiere optimización.
<i>Chlorella vulgaris</i> — contenido lipídico	20–30 % (González et al., 1997; Coulson Reinel et al., 2022)	No alcanza umbral técnico (≥30 %) sin inducción.
<i>Nannochloropsis</i> spp. — contenido lipídico	30–60 % (literatura incluida)	Cumple umbral técnico; ideal para biodiésel.
<i>Spirulina</i> (<i>Arthrospira maxima</i>)	4–16 % lípidos (Silos Vega, 2021)	No apta para biodiésel; sí para biogás/proteínas.
Densidad celular: <i>Dunaliella</i>	12.957.500 cel·mL ⁻¹ (Coulson Reinel et al., 2022)	Alta densidad → cultivo eficaz.
Eficiencia de centrifugación	>90 % (Amaro et al., 2011)	Muy eficiente, pero costosa energéticamente.
Secado térmico	Hasta 30 % de la energía total del proceso (Lardon et al., 2009)	Principal cuello de botella técnico.
Umbral técnico de eficiencia (modelo MEVT)	≥50 % Eout/Ein	Requiere renovables + optimización.

Nota. Se sintetiza indicadores técnicos relacionados con la productividad de biomasa, contenido

lipídico de distintas especies de microalgas y eficiencia de los procesos de cosecha y

procesamiento. Los resultados muestran que ciertas especies, como *Nannochloropsis*, presentan

mayor potencial para la producción de biodiésel, mientras que otras especies pueden ser más

adecuadas para la obtención de biogás o coproductos. Asimismo, se identifican limitaciones

técnicas importantes, como el alto consumo energético en las etapas de centrifugación y secado.

Fuente. Autora (2025).

Apéndice F

Viabilidad económica — Indicadores disponibles

Indicador económico	Valor reportado	Interpretación económica
Eficiencia comparativa algas vs palma	4,1× más eficiente (proyecto Fuel Algae — UNAL Tolima)	Indica potencial ventaja productiva.
Costo energético crítico	Secado = hasta 30 % del gasto energético (Lardon et al., 2009)	Afecta OPEX; exige eficiencia térmica.
Referencias económicas clave	Leite et al. (2013) — costos y requerimientos (solo conceptual)	No se reportan cifras numéricas.
Umbral económico (según modelo propuesto)	Energía neta positiva + costos inferiores a palma	No cuantificable sin datos faltantes.

Nota. Se presentan algunos indicadores económicos asociados al aprovechamiento energético de microalgas, destacando comparaciones de eficiencia productiva y factores que influyen en los costos del proceso. Los resultados sugieren que, aunque las microalgas pueden ofrecer ventajas productivas frente a cultivos energéticos tradicionales, la viabilidad económica depende en gran medida de la optimización energética del proceso y de la disponibilidad de datos cuantitativos que permitan estimar costos reales de producción. *Fuente.* Autora (2025).

Apéndice G

Evaluación integrada según Modelo Tridimensional (MEVT)

Dimensión	Criterio evaluado	Valor reportado	¿Cumple umbral?	Comentario
Ambiental	Radiación solar mínima requerida	4–6 kWh/m ² /d	Sí	Adecuada para distintas regiones.
Ambiental	Disponibilidad hídrica	>48 % territorio con excedente	Sí	Apto para pilotos.
Técnica	Contenido lipídico ≥30 %	Chlorella ~20–30 %; Nannochloropsis 30–60 %	Nanno: Sí / Chlorella: No	Depende de la especie.
Técnica	Productividad mínima	0.1–0.8 g/L/d	Sí	Rango apto para piloto.
Técnica	Eficiencia energética ≥50 %	No reportada	Indeterminado	Requiere cálculos LCA.
Económica	Ventaja frente a palma	4,1 × eficiencia	Indicio favorable	Faltan costos exactos.
Económica	Costo energético crítico	Secado = 30 % energía	Riesgo	Reduce viabilidad si no hay renovables.

Nota. Se presenta una síntesis de criterios ambientales, técnicos y económicos utilizados para evaluar la viabilidad del aprovechamiento energético de microalgas. Los resultados muestran que las condiciones ambientales y la productividad de biomasa cumplen generalmente los umbrales mínimos para proyectos piloto, mientras que algunos indicadores técnicos y económicos, como la eficiencia energética y los costos asociados al secado, requieren mayor optimización tecnológica para consolidar la viabilidad del sistema. *Fuente.* Autora (2025).

Apéndice H

Comparación de especies evaluadas según criterios del MEVT

Especie microalgal	Lípidos (%)	Productividad reportada	Ventaja técnica	Limitación principal
Chlorella vulgaris	20–30 %	Media	Cultivo robusto	No cumple umbral lipídico sin inducción.
Nannochloropsis spp.	30–60 %	Alta	Excelente para biodiésel	Requiere condiciones controladas.
Dunaliella spp.	Alta densidad celular	Media	Tolerante a salinidad	Proceso de extracción más complejo.
Spirulina (Arthrospira)	4–16 %	Alta	Proteína / biogás	No apta para biodiésel.

Nota. Se comparan distintas especies de microalgas en función de su contenido lipídico, productividad y características técnicas relevantes para la producción de bioenergía. Los resultados indican que especies como *Nannochloropsis* presentan un mayor potencial para la producción de biodiésel debido a su alto contenido de lípidos, mientras que otras especies, como *Spirulina*, pueden ser más adecuadas para la obtención de biogás o productos proteicos, dependiendo del enfoque de aprovechamiento. *Fuente.* Autora (2025).

Apéndice I

Indicadores claves para evaluar

Variable	Tipo	Valor reportado	Estado frente a umbral
Radiación solar	Ambiental	4–6 kWh/m ² /d	Cumple
Disponibilidad hídrica	Ambiental	48,5 % excedente	Cumple
Contenido lipídico	Técnica	20–60 % según especie	Parcialmente cumple
Productividad	Técnica	0.1–0.8 g/L/d	Cumple para pilotos
Eficiencia energética	Técnica	Sin dato numérico	No evaluable
Rendimiento comparativo	Económica	4,1 × palma	Cumple indicio
Costo energético del secado	Económica	30 % energía total	Riesgo

Nota. Los indicadores muestran que la radiación solar, la disponibilidad hídrica y la productividad de biomasa cumplen con los requisitos mínimos para el desarrollo de proyectos piloto, aunque la eficiencia energética aún no puede evaluarse plenamente debido a la falta de datos cuantitativos y algunos factores económicos, como el costo energético del secado, representan posibles limitaciones. *Fuente.* Autora (2025).

Apéndice J

Comparación de microalgas, palma africana y diésel fósil como fuentes energéticas según indicadores del MEVT

Dimensión (MEVT)	Indicador	Microalgas (bioenergía de 3.^a generación)	Palma africana (biodiésel)	Diésel fósil
Ambiental	Uso de suelo	No compite con suelo agrícola; puede cultivarse en áreas marginales o cuerpos de agua	Alta competencia con suelo agrícola; asociada a deforestación	No aplica, pero asociado a degradación ambiental indirecta
	Captura de CO ₂	Alta capacidad de fijación de CO ₂ durante el crecimiento	Moderada	Nula
	Emisiones GEI (ciclo de vida)	Bajas a medias	Medias	Altas
	Uso de agua	Puede emplear aguas residuales o salobres	Alto consumo de agua dulce	Bajo en uso directo, alto impacto indirecto
Técnica	Productividad energética	Muy alta por hectárea (hasta 20–30 veces mayor que cultivos terrestres)	Media	Alta densidad energética
	Madurez tecnológica	Media (en desarrollo y validación piloto)	Alta (tecnología consolidada)	Muy alta
	Flexibilidad tecnológica	Alta (biodiésel, biogás, biohidrógeno, electricidad)	Baja (principalmente biodiésel)	Baja
Económica	Costos de producción	Altos actualmente	Medios	Bajos a corto plazo
	Infraestructura existente en Colombia	Limitada	Amplia	Muy amplia
	Escalabilidad	Media (dependiente de inversión e innovación)	Alta	Alta
	Viabilidad económica (MEVT)	Media	Alta	Alta (no sostenible a largo plazo)

Nota. Se muestra que las microalgas presentan ventajas ambientales significativas, como mayor capacidad de fijación de CO₂ y menor competencia por el uso del suelo, aunque su desarrollo tecnológico y económico aún se encuentra en etapas de consolidación. En contraste, las tecnologías basadas en palma y combustibles fósiles presentan mayor madurez tecnológica y menor costo inmediato, pero con impactos ambientales más elevados o menor sostenibilidad a largo plazo. *Fuente.* Autora (2025).