

Evaluación Del Proceso Batch De Producción De AIA A Partir De Cultivos De *Chlorella* sp. En
Lixiviados De Relleno Sanitario Mediante Un Análisis De Ciclo De Vida

Liseth Johana Calderón Medina y Silvia Fernanda Tobo Ortiz

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira

Magister en Ingeniería Química

Codirector

María Daniela Ortiz Álvarez

Magister en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga
2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi inspiración y motor de vida, mi madre Nohemí Ortiz, quien, con su entrega incansable, sus consejos, sus oraciones y su amor me enseñó a nunca rendirme y a seguir luchando en los momentos más difíciles. Eres la raíz de mis sueños y la razón por la cual nunca dejé de creer en mí misma, de ti aprendí que el amor de una madre es la mayor fuerza que existe en este mundo. A la memoria de mi padre Fernando Tobo, que, aunque ya no está en este mundo, lo siento presente en cada logro, en cada esfuerzo y en cada triunfo. A mi compañero de vida Juan Esteban Villamizar, que con su amor, paciencia, ternura y apoyo incondicional se convirtió en mi refugio, en la voz que me recordaba que los sueños se alcanzan con perseverancia. Y a mis hermanos, Yuliana Tobo y Ferney Ortiz, quienes con su apoyo, cariño y confianza me dieron la fuerza para afrontar cada adversidad. A ustedes, les entrego este logro con todo mi corazón, porque más que mío, es de ustedes.

Silvia Fernanda Tobo Ortiz

A mi madre, María Luisa, ejemplo de fortaleza y amor incondicional, quien con su valentía y dedicación me enseñó a nunca rendirme y a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Su entrega y apoyo constante son la base de cada uno de mis logros. A mi sobrina Mariana, una de mis personas favoritas en la vida, cuya alegría es una inspiración diaria y una fuente de motivación que me impulsa a dar lo mejor de mí en cada paso. A mi gran amiga Silvia, agradezco a la vida por haberla puesto en mi camino en el momento justo. Su compañía, apoyo y amistad sincera han sido un regalo invaluable que me acompañó en este proceso con palabras de aliento y una complicidad única que siempre recordaré con gratitud.

Liseth Johana Calderón Medina

Agradecimientos

A Dios, por darme la sabiduría necesaria para alcanzar esta meta, y por guiarme en cada paso del camino. A mis padres Nohemí y Fernando, mis hermanos Yuliana y Ferney y mi pareja Juan Esteban por motivarme y no dejarme desfallecer en los momentos más difíciles, por celebrar conmigo cada paso y por recordarme que soy capaz, incluso cuando yo lo olvidaba. los amo inmensamente. A mi profe Nelson, por sus enseñanzas, por creer siempre en mí y por sus palabras de sabiduría que llegaron en los momentos más oportunos. Y, de manera especial, a Liseth, mi director, codirectora y tutora, por su orientación, apoyo y valiosas contribuciones que hicieron posible la culminación de este trabajo. Porque al final, más que un logro personal, es un reflejo del amor, paciencia y fe que me regalaron en cada paso del camino. Muchas gracias a todos

Silvia Fernanda Tobo Ortiz

Me siento profundamente agradecida con la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Química, un lugar que se convirtió en mi segundo hogar y en donde aprendí a amar y admirar mi carrera. Allí recibí el apoyo de docentes, administrativos y personas maravillosas que se cruzaron en mi camino y que, con pequeños gestos, dejaron huellas valiosas en mi vida. A mis codirectoras, Ing. María Daniela Ortiz, Ing. Janet Bibiana García Martínez y a mi director el Ing. Crisóstomo Barajas Ferreira, gracias infinitas por su guía y paciencia. Fue un honor trabajar junto a ustedes y contar con su apoyo en este proyecto tan importante. También agradezco de corazón a esa persona especial que siempre me ha recordado lo capaz e inteligente que soy. Sus palabras fueron inspiración y fuerza.

Liseth Johana Calderón Medina

Tabla de Contenidos

	Pág.
Introducción	10
1 Objetivos	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2 Alcance	11
3 Estado Del Arte.....	12
3.1 Relleno Sanitario.....	12
3.2 Aguas Residuales	12
3.2.1 Demanda Química De Oxígeno (DQO).....	13
3.2.2 Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO).....	14
3.3 Medio De Cultivo Convencional De Microalgas.....	14
3.4 Tipos De Radiación.....	15
3.5 Valorización De Microalgas	15
3.6 Fitohormonas	18
3.7 Ácido Indolacético (AIA)	18
3.8 Nitratos.....	19
3.9 Fosfatos.....	19
3.9 Análisis De Ciclo De Vida.....	20

4. Metodología	21
4.1 Flujos De Entrada Y Salida	21
4.2 Impactos Ambientales	22
4.3 Analisis De Sensibilidad Y Diseño De Estrategias.....	24
5. Resultados y discusiones.....	24
5.1 Definición de Escenarios	24
5.1.1.1 Lixiviado De Relleno Sanitario (12:12).....	24
5.1.1.2 Lixiviado De Relleno Sanitario Con Radiación Natural.....	25
5.1.1.3 Medio De Cultivo Bold Basal.....	27
5.1.2 Identificación De Flujos De Entrada De Materia	27
5.1.3 Identificación De Flujos De Salida	30
5.2 Impactos Ambientales Potenciales Del Proceso	31
5.2.1 Indicadores De Impacto	31
5.3. Análisis De Sensibilidad Y Formulación De Estrategias De Mejora	35
5.3.1 Análisis De Sensibilidad	35
5.3.2 Estrategias De Sostenibilidad	38
6. Conclusiones	42
7. Recomendaciones	43
Referencias Bibliográficas	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valorización de lixiviado con <i>Chlorella</i> sp.....	17
Tabla 2. Categorías de impacto.....	23
Tabla 3. Caracterización del lixiviado y entradas al reactor batch.....	28
Tabla 4. Caracterización del medio de cultivo Escenario 3.....	29
Tabla 5. Consumos energéticos.....	30
Tabla 6. Flujos de salida de los escenarios.....	30

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sistema para el escenario de lixiviado de relleno sanitario con radiación 12:12.....	25
Figura 2. Sistema para escenario de lixiviado de relleno sanitario con radiación natural.....	26
Figura 3. Sistema para escenario de medio de cultivo estándar.....	27
Figura 4. Indicadores de impacto.....	32
Figura 5. Normalización de escenarios.....	35
Figura 6. Sensibilidad de electricidad.....	36
Figura 7. Sensibilidad de caracterización.....	37
Figura 8. Consumo energético.....	39
Figura 9. Consumo de agua.....	40

Resumen

Título: Evaluación del proceso batch de producción de AIA a partir de cultivos de *Chlorella* sp. en lixiviado de relleno sanitario mediante un análisis de ciclo de vida^{1*}

Autor: Liseth Johana Calderón Medina, Silvia Fernanda Tobo Ortiz^{2**}

Palabras Clave: AIA, *Chlorella* sp., lixiviado, Impactos ambientales

Descripción: El presente proyecto analizó los potenciales impactos medioambientales del proceso batch de producción de AIA a partir de cultivos de *Chlorella* sp. en lixiviado de relleno sanitario, mediante la metodología de análisis de ciclos de vida (ACV) de puerta a puerta. Se empleó como herramienta el simulador OpenLCA, además del método ReCiPe (H) 2016 de punto medio para tres escenarios: medio de cultivo con lixiviado al 5% y radiación 12:12 con el uso de lámparas de luz led, medio de cultivo con lixiviado al 5% y radiación natural y medio de cultivo Bold Basal que se fundamentó en la presencia de macronutrientes y micronutrientes que lo caracterizan. Los resultados obtenidos arrojaron la relevancia del consumo de electricidad y el recurso hídrico los cuales contribuyeron de manera considerable en el análisis de los impactos, teniendo una repercusión en eutrofización tanto de agua marina como de agua dulce, calentamiento global 45,21 kg CO₂ eq, toxicidad no cancerígena 41,96 kg 1,4-DCB y consumo de agua. Este proyecto resultó ser una propuesta innovadora por su aporte significativo a la gestión ambiental, dado que las aguas residuales de los rellenos sanitarios son un problema que debe ser solucionado con alternativas sostenibles y efectivas, de esta manera se tiene la posibilidad de transformar un residuo de difícil gestión en un valor agregado.

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. Magister en Ingeniería Química. Codirector: María Daniela Ortiz Álvarez. Magister en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Evaluation of the batch IAA Production Process from *Chlorella* sp., Cultures in Landfill Leachate Using a Life Cycle Assessment^{3*}

Author: Liseth Johana Calderón Medina, Silvia Fernanda Tobo Ortiz^{4**}

Key Words: AIA, *Chlorella* sp., Leachate, Environmental impacts

Description: This project analyzed the potential environmental impacts of the AIA production batch process from *Chlorella* sp. crops. In leachate of sanitary filling, through the methodology of analysis of life cycles (ACV) from door to door. The OpenLCA simulator was used as a tool, in addition to the 2016 midpoint method for three scenarios: culture medium with 5% leachate and 12:12 radiation with the use of LED light lamps, culture medium with 5% leachate and natural radiation and average basal bold culture that was based on the presence of macronutrients and micronutrients that characterize it. The results obtained threw the relevance of electricity consumption and water resource which contributed considerably in the analysis of the impacts, having an eutrophication impact of both marine water and fresh water, global warming 45,21 kg CO₂ eq, non -carcinogenic toxicity 41,96 kg 1,4-DCB, and water consumption. This project turned out to be an innovative proposal for its significant contribution to environmental management, since the wastewater of the sanitary landfills is a problem that must be solved with sustainable and effective alternatives, in this way there is the possibility of transforming a residue of difficult management into an added value.

³ * Grade work

^{4**} Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: Crisostomo Barajas Ferreira. Master in Chemical Engineering. Co -director: Maria Daniela Ortiz Alvarez. Master in Chemical Engineering.

Introducción

Los rellenos sanitarios generan diversos residuos contaminantes, entre ellos gases de efecto invernadero y residuos líquidos conocidos como lixiviados. Estos últimos se caracterizan por contener diversos compuestos orgánicos e inorgánicos, algunos de ellos tóxicos, como metales pesados y compuestos biorefractarios (Paiva et al., 2021) Estos efluentes representan una amenaza significativa para la salud y en el medio ambiente, debido a su difícil degradación y alta carga contaminante. Por esta razón, los principales esfuerzos se han centrado en el tratamiento de estos lixiviado, sin embargo, en el contexto actual de economía circular, con un enfoque en los objetivos de desarrollo sostenible, ha aumentado el interés por su valorización, es decir, su uso como insumos para generar productos de alto valor agregado (Ilmasari et al., 2022).

En este contexto, el cultivo de microalgas como *Chlorella* sp. en lixiviado de relleno sanitario se ha propuesto como una alternativa prometedora para el transformar estos efluentes en biomasa útil (Tighiri & Erkurt, 2019), la cual se reconoce como una fuente significativa para la producción de ácido indolacético (AIA), una fitohormona de interés agrícola (Kapoor et al., 2021a). Además, la biomasa microalgal puede valorizarse en la obtención de otros compuestos de interés, tales como pigmentos, lípidos y proteínas, que amplían el potencial de aplicación de esta biotecnología en sectores como la agricultura, la alimentación y la energía. Sin embargo, este tipo de procesos a escala requiere una evaluación de su viabilidad ambiental, especialmente cuando se busca emplear esquemas de producción en lote, los cuales son comunes en etapas iniciales de desarrollo de esta tecnología.

No obstante, en la actualidad no se cuenta con suficiente información que identifique los impactos ambientales asociada a la producción de AIA a partir de *Chlorella* sp. cultivada en lixiviados, lo que limita la identificación de puntos críticos y oportunidades de mejora en el

proceso. En este sentido, resulta fundamental contar con herramientas que permitan cuantificar y evaluar dichos impactos ambientales del proceso batch de producción de AIA a partir de cultivos de *Chlorella* sp. en lixiviados de relleno sanitario. La metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) posibilita estimar las cargas ambientales de un producto o servicio considerando todas las etapas, desde la obtención de materias primas hasta la disposición final, este enfoque permitirá cuantificar los impactos asociados y proponer estrategias que favorezcan la implementación de procesos sostenibles de valorización.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar el desempeño ambiental del proceso batch de producción de AIA a partir de cultivos de *Chlorella* sp. en lixiviado de relleno sanitario, mediante herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV).

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar los flujos de entrada y salida involucrados en el proceso de producción de AIA, de acuerdo con los lineamientos requeridos por la metodología del ACV.
- Cuantificar los impactos ambientales potenciales del proceso batch de producción AIA empleando el software OpenLCA.
- Evaluar los factores críticos del sistema mediante el ACV para diseñar estrategias que mejoren la sostenibilidad del sistema.

2. Alcance

Este proyecto se realizó implementando la microalga *Chlorella* sp. y lixiviados proporcionados por parte de la empresa Veolia Aseo Cúcuta S.A. E.S.P del Centro Inteligente de

Gestión Ecológica Guayabal con el objetivo de analizar el desempeño ambiental empleando herramientas de Análisis de Ciclo de Vida de la producción de AIA en un proceso batch.

3. Estado del arte

La presencia de metales pesados, aromáticos, compuestos halogenados, fenoles, pesticidas y amonio en los lixiviados provenientes de los rellenos sanitarios se ha convertido en un problema grave a nivel mundial preocupando la seguridad, salud de los seres humanos, afectación al ecosistema y forma de vida animal (Naveen et al., 2017). En este contexto, más allá de la caracterización y el tratamiento convencional de estos efluentes, la valorización surge como una estrategia relevante, ya que permite transformar los lixiviados en productos de interés biotecnológico. De esta manera, se contribuye simultáneamente a la reducción de contaminantes y a la generación de valor agregado a partir de una corriente residual de difícil aprovechamiento.

3.1 Relleno Sanitario

Los rellenos sanitarios se conocen como lugares técnicamente seleccionados y localizados para la disposición final controlada de los desechos (orgánicos, inorgánicos, de construcción...) de esta manera se busca evitar el peligro o riesgo a la salud pública, para esto se implementan métodos ingenieriles como: confinación, compactación, control de gases y lixiviados (*Relleno Sanitario / Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos -UAESP-*, n.d.).

3.2. Aguas Residuales

Las aguas residuales también conocidas como aguas servidas son líquidos que contienen un sinnúmero de contaminantes provenientes de diversas actividades domésticas, industriales, agrícolas, ganaderas, entre otra (Hidrotec, n.d.). Estas sustancias representan problemas como la

contaminación de suelos, pérdida de biodiversidad, riesgos a la salud pública, entre otros. Por esta razón es necesario implementar múltiples tratamientos que permitan mitigar los efectos negativos.

Un caso particular de aguas residuales son los lixiviados de vertedero los cuales son definidos como líquidos orgánicos complicados que se generan en el proceso de vertido sanitario (Teng et al., 2021), son fluidos turbios de olores desagradables y con material sólido flotante en ellas (Claudia & Herrera Herrera, 2018), cuya naturaleza se ve afectada altamente por la variedad de contaminantes provenientes de diversas actividades humanas, que impiden su uso (Zarza, 2023). Como resultado contienen altas concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos (Pinpatthanapong et al., 2022), sodio, calcio, potasio, magnesio, cloro, azufre, fosfato, bicarbonato, metales pesados, sales de amonio, nitratos y otros compuestos (Tebbutt, 1983).

Dentro de la evaluación de aguas residuales, existen una serie de parámetros a tener en cuenta para realizar un monitoreo: la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBQO), metales pesado y presencia de fósforo y nitrógeno.

3.2.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es la medida de la cantidad de oxígeno necesaria para poder oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica presente en el agua, para ello se usa un agente químico (IEQFB, 2023) por lo general se usa dicromato de potasio en presencia de ácido sulfúrico (Hanna Instruments Colombia., 2023), así la cantidad de oxígeno consumido es proporcional a la cantidad de materia orgánica presente en la muestra de agua (IEQFB, 2023), este parámetro permite evaluar la calidad del agua.

3.2.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Cantidad de oxígeno que los microorganismos presentes consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra al ser un proceso que requiere cuidado es necesario tener en cuenta parámetros como el incubar la muestra durante 5 días a una temperatura específica de 20 °C (Induanalisis, n.d.), así la diferencia de niveles de oxígeno al principio y al final de la incubación determina el valor de DBO. La importancia de esta medida radica arrojar información de la biodegradabilidad de la muestra (Tebbutt, 1983)

Si el análisis arroja un nivel alto de DBO significa una mayor presencia de materia orgánica en el agua, así que mayor será el oxígeno que los microorganismos consumirán para la degradación, llegando a que se pueda agotar el oxígeno disuelto, ocasionando un desequilibrio en los ecosistemas (Cromtek, 2023).

3.3. Medio de cultivo convencional de microalgas

El Medio Basal de Bold (BBM) es uno de los medios de cultivo estándar más empleados en estudios de laboratorio con microalgas, debido a que proporciona un equilibrio adecuado de macronutrientes y micronutrientes esenciales para su crecimiento. En un principio se desarrolló para cultivos de *Chlorella* sp. y la composición incluye fuentes inorgánicas de nitrógeno, fosforo, magnesio, azufre, calcio, así como oligoelementos como hierro, magnesio, zinc. (Anderson, 2005). La formulación asegura condiciones óptimas para evaluar el potencial de producción de metabolitos como las fitohormonas bajo un ambiente controlado y reproducible, sin embargo, tiene limitaciones a gran escala por los costos de los reactivos químicos y las cargas ambientales asociadas a su producción.

3.4 Tipos de radiación

En el proceso de cultivo de microalgas, la radiación constituye un factor crítico, ya que la disponibilidad y calidad de la luz determinan la eficiencia fotosintética, la productividad de biomasa y la síntesis de metabolitos secundarios como las fitohormonas. En este sentido, el control de la radiación es fundamental para garantizar un cultivo sostenible ya que en el proceso de cultivo y la cosecha consumen mucha energía y son costosos, (Blair et al., 2014).

En condiciones de radiación artificial con el uso de lámparas con fotoperiodos controlados 12:12 (luz/oscuridad) permiten mantener condiciones estables de iluminación, independientes de la variabilidad climática, lo que asegura un mayor control sobre el cultivo (Anyanwu et al., 2022). Por otro lado, se encuentra la radiación solar, un método que permite ahorro en el consumo energético, pero que requiere la implementación de un sistema de polisombra que regulen la intensidad de la luz incidente, para evitar tanto la fotoinhibición (Mata et al., 2010)

3.5. Valorización de Microalgas

La valorización de microalgas surge como una estrategia sostenible para transformar nutrientes residuales en productos de valor agregado. Las microalgas son un grupo diverso de organismos fotosintéticos, en su mayoría unicelulares que emplean la luz solar y dióxido de carbono para sintetizar metabolitos. Las cianobacterias (algas verdeazuladas) son conocidas por su fijación de nitrógeno, ofreciendo un bioestimulante sostenible que dan un apoyo a la disminución del impacto ambiental (Kapoore et al., 2021b).

El aprovechamiento de aguas residuales como medio de cultivo para microalgas no solo disminuye la presencia de nitrógeno y fósforo en efluentes, sino que, al mismo ofrece oportunidades únicas que impulsa la producción de biomoléculas con aplicaciones industriales, y

de paso hace un aporte a la economía circular mediante la generación de un producto de valor. (Kapooore et al., 2021b).

Las microalgas son productores biológicos de lípidos más eficientes por su aporte de biomasa, debido a su estructura celular simple, las algas tienen tasas de producción de biomasa y lípidos más altas, la *Chlorella* sp. seca puede contener aproximadamente 20% lípidos, 45% proteínas, 20% carbohidratos y 10% minerales y vitaminas (Alba et al., 2013). Existe una amplia diversidad de microalgas entre las que más destacan se encuentra la *Chlorella* sp. (Vacca-Jimeno et al., 2017) por su capacidad de adaptación, niveles de pH, temperatura, fotoperiodo, intensidad lumínica, aireación y nutrientes permiten la transformación de lípidos de valor para la industria. (Ríos & Saavedra, 2023).

La valorización de microalgas, especialmente de *Chlorella* sp., para la producción de AIA en un proceso batch, implica etapas de cultivo, cosecha, lisis celular y extracción del ácido indolacético. Estas biotransformaciones permiten la obtención de metabolitos de interés agronómico y energético, demostrando que las microalgas no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino que también impulsan a la generación de productos con valor agregado. (Vacca-Jimeno et al., 2017). Los resultados de las diferentes investigaciones demuestran la habilidad de la microalga *Chlorella* sp. para convertir nutrientes de aguas residuales en metabolitos de valor agregado, con el fin de crear técnicas sostenibles, en la tabla 1 se presenta un resumen de algunos artículos, en los que se presenta condiciones de cultivos y obtención del producto de valor agregado.

Tabla 1*Valorización de lixiviados con Chlorella sp.*

Microorganismo	Tipo de efluente	Condiciones de cultivo	Remociones	Producto de valor agregado	Referencia
<i>Chlorella vulgaris</i>	Lixiviado crudo diluido 20%	Cultivo semicontinuo, biomasa inicial 0.25 g/L	99.9% NH_4^+ – N fósforo 22.8/2.9 mg/L.d	Biomasa para biocombustible	(Hu et al., 2021)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Lixiviado crudo diluido 20% + plasma	Tratamientos comparados	75% Amoníaco	Biomasa altamente tolerante al amoníaco	(Farag et al., 2024)
<i>Chlorella sp.</i>	Lixiviado crudo diluido 10%	Batch	N/A	78% Lípidos	(El Ouaer et al., 2023)
<i>Chlorella sp.</i>	Lixiviado salino-alcalino	Cultivo	Densidad celular alta	18% lípidos	(Liu et al., 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Lixiviado de vertedero con alta concentración de nitratos	Cultivo aislado en lote (Batch)	44% nitratos	17.7% lípidos 21.9% carbohidratos	(Nordin et al., 2019)
<i>Chlorella sp.</i>	Lixiviados estabilizados con lodos activados	Cultivo mixotrófico	98.81% NH_4^+ – N 88.62% TN, 99.55% TP.	Disminución de las emisiones de carbono	(Lian et al., 2024)
<i>Chlorella sp.</i>	Fuentes de agua contaminadas con antibióticos	Biorreactor en medio de cultivo nutritivo	71.19% cefalexina	Lípidos	(Angulo et al., 2018)
<i>Chlorella sp.</i>	Lixiviado crudo diluido 10%	20 días, luz LED	Reducción de compuestos orgánicos	Fertilizante	(Dahril et al., 2022)
<i>Chlorella zofingiensis</i>	Aguas residuales municipales	Reactor Batch mixto	93% nitrógeno 90% fosforo	Lípidos	(Zhou et al., 2018)

La microalga *Chlorella sp.* es ampliamente utilizada debido a su capacidad de adaptarse a diferentes condiciones. Los resultados de las diferentes investigaciones demuestran la habilidad para tratar lixiviados, así como la producción de metabolitos de valor agregado, que implementan la creación de técnicas sostenibles, lo que la hace una herramienta prometedora para el uso de diversos tipos de aguas residuales. (Ortiz, 2023)

3.6. Fitohormonas

Las fitohormonas son producidas naturalmente por las plantas, sin necesidad de formación de glándulas especializadas, por esta razón se definen como compuestos orgánicos que ayudan en la síntesis de una parte específica de la planta. Una vez se generan estas se trasladan a otras zonas. Actúan en cantidades muy pequeñas a diferencia de otras sustancias como lo son las vitaminas o los nutrientes, más o menos sus concentraciones típicas son milmillonésimas a millonésimas molar (Rodríguez, n.d.)

Las fitohormonas son pequeñas moléculas de señalización natural en procesos celulares vegetales, producidas en bajas concentraciones, que actúan como mensajeros químicos para la regulación y estimulación del crecimiento y desarrollo de las plantas (Kapoore et al., 2021b). La síntesis microbiológica de las fitohormonas puede ser una alternativa para llegar a una ecología sostenible, dejando a un lado el uso de masivo de pesticidas y fertilizantes químicos (Castillo et al., 2005).

3.7 Ácido indolacético (AIA)

El ácido indolacético (AIA), es un compuesto heterocíclico que contiene un grupo carboximetilo que pertenece a la familia de las fitohormonas auxinas (Bashan & de-Bashan, 2010) presente en la mayoría de las plantas, estimula algunos procesos fisiológicos como la división celular, respuesta a la luz y a la gravedad, diferenciación de tejidos y alargamiento (Press et al., 1997). El AIA se sintetiza en las puntas de crecimiento de raíces y brotes, para luego desplazarse a diferentes regiones de la planta, el traslado puede ser de una célula a otra por difusión y transporte activo y si es a distancias más largas por medio del floema (McIvor, 2025).

Un proceso en operación discontinua para la producción de AIA involucra la incubación de microorganismos en un medio de cultivo específico, generalmente en un biorreactor o matraz

que cuente con un proceso de agitación, bajo condiciones de operación específicas como lo son temperatura, pH, oxigenación y agitación. El proceso batch, enfocado en la producción de AIA a partir de cultivos con microalgas involucra varias etapas, las cuales consisten en una incubación, separación de la biomasa, extracción del AIA del sobrenadante, y finalmente, la purificación y análisis del AIA extraído (Banguera & Varela, 2021)

3.8 Nitratos

Los nitratos son compuestos que se pueden encontrar en la naturaleza, los cuales forman parte del ciclo del nitrógeno. El exceso de nitratos en aguas eleva el crecimiento de algas. Así mismo los nitratos no suelen ser tóxicos para la salud humana, de hecho, tienen un efecto positivo protector en el estómago que reduce el riesgo de úlceras y otros problemas, pero si la cantidad es elevada en los alimentos o aguas se podría convertir en metabolitos perjudiciales (Arias, 2016).

Para este contexto la disponibilidad de nitratos modula la actividad enzimática y la expresión de genes que se relacionan con la vida del triptófano principal precursor de AIA, de esta, para un lixiviado rico en nitratos sostiene el crecimiento de la biomasa y potencializa la transformaban. Por esta razón, el control de la concentración de nitratos resulta esencial para garantizar el crecimiento y la producción óptima, conviene precisar que un exceso no es favorable, ya que puede inducir a un crecimiento desmedido de no producto deseado.

3.9 Fosfatos

Los fosfatos son compuestos que contienen fósforo y presentan la principal forma en que este elemento se encuentra en la naturaleza haciendo parte de los suelos, las rocas y aguas, donde cumplen un papel importante en el ciclo del fósforo. En el contexto del proceso, contar con niveles apropiados de fosfatos favorece tanto la síntesis de AIA a partir del triptófano como el metabolismo energético. Por lo tanto, es fundamental ajustar la concentración de fosfato en el

medio pues niveles adecuados favorecen la biosíntesis de AIA y el crecimiento celular, mientras que una cantidad excesiva podría provocar un crecimiento desmesurado sin un incremento proporcional de fitohormonas. (Mixquititla-Casbis & Villegas-Torres, 2016).

3.9 Análisis de ciclo de vida

La metodología del Análisis de Ciclo de Vida -ACV (Life Cycle Analysis o Life Cycle Assessment -LCA) permite considerar todos los aspectos ambientales, la salud humana, y los recursos, facilitando cuantificar todos los consumos y las emisiones asociadas a un producto, que puedan generar un impacto ambiental, entre ellos se destacan la huella de carbono y la huella hídrica, (Pablo & Arena, 2017).

Permite involucrar análisis de todas las etapas de producción de un producto o sistema de productos, desde su inicio de vida, incluyendo la extracción de materias primas, hasta su fin de vida o disposición final, este análisis de ciclo de vida incluye todos los flujos de materias que han sido involucrados en la realización del producto, por ello la International Organization for Standardization (ISO), ha creado normas ambientales como la ISO 14040 Y 14044 de 2006, las cuales establecen 4 etapas que debe abordar el análisis de ciclo de vida, definición del objetivo y alcance del estudio, las fases de estudio, análisis de inventario para determinar los impactos ambientales y por último la interpretación de los resultados obtenidos por el análisis. (Kurt Eduardo Ziegler Rodriguez, n.d.).

Según la ISO 14040, el ACV analiza el alcance de un ACV, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle depende del tema y puede diferir considerablemente del objetivo de un ACV en particular; la fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) relaciona los datos de entrada/salida del sistema; la fase de evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV) proporciona información adicional para ayudar a evaluar los resultados del ICV de un sistema del

producto a fin de comprender mejor su impacto ambiental; la interpretación del ciclo de vida es la fase final del procedimiento de ACV, en el cual se resumen y discuten los resultados del ICV para la toma de decisiones de acuerdo con el alcance definido. (ISO 14040, 2006)

Según la ISO14044, el ACV puede ayudar a identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida, aportando informaciones para planificar estrategias, establecer prioridades y seleccionar indicadores de desempeño ambiental (ISO 14040, 2006)

4. Metodología.

4.1 Identificar los flujos de entrada y salida involucrados en el proceso de producción de AIA, de acuerdo con los lineamientos requeridos por la metodología del ACV.

4.1.1. Recolección de datos primarios y secundarios: Se utilizaron datos experimentales obtenidos en laboratorio para el cultivo batch de *Chlorella* sp. y la producción de AIA bajo condiciones experimentales controladas de iluminación y aireación, las cuales constituyeron los datos primarios del estudio. De manera complementaria, se incorporaron datos de inventario de ciclo de vida de la base de datos Ecoinvent v3.10. reconocidos como datos secundarios. Para garantizar la representatividad contextual, se priorizarán procesos equivalentes en cuanto a condiciones tecnológicas y geográficas, tales como el uso del mix eléctrico colombiano, el abastecimiento de agua tratada y el aprovisionamiento de reactivos estándar.

4.1.2 Identificación de flujos de materia y energía: Se determinaron todos los insumos (agua, energía asociada a las operaciones de agitación, iluminación, aireación y funcionamiento de los equipos utilizados, insumos necesarios, lixiviado) y productos/salidas (AIA, biomasa residual, emisiones gaseosas, efluentes líquidos) asociados al proceso. Con esta información se establecieron balances de masa y energía, que permitieron cuantificar las entradas y salidas del

sistema y verificar la coherencia del inventario. Estos balances fueron fundamentales para representar de manera precisa el funcionamiento del proceso batch en el marco del Análisis de Ciclo de Vida.

4.2 Cuantificar los impactos ambientales potenciales del proceso batch de producción AIA empleando el software openLCA.

Este estudio adoptó un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), conforme a los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14044. Por lo cual, se establecieron las siguientes actividades:

4.2.1 Definición de la unidad funcional: Se estableció la unidad funcional como una cantidad definida de AIA producido (1 gramo de AIA), con el objetivo de comparar de forma estandarizada el desempeño ambiental del proceso.

4.2.2 Determinación de los límites del sistema: Se delimitó el sistema desde la preparación del medio de cultivo hasta la obtención de la fitohormona (AIA). El sistema no consideró los aspectos del transporte del lixiviado, así como tampoco el transporte de insumos o disposición del producto final. Para el análisis, se evaluaron tres escenarios experimentales:

- Escenario 1: Medio de cultivo con lixiviado al 5% y condiciones de iluminación artificial 12:12 (luz: oscuridad).
- Escenario 2: Medio de cultivo con lixiviado al 5% y condiciones de iluminación natural.
- Escenario 3: Medio de cultivo Bold Basal con iluminación artificial 12:12 (luz: oscuridad).

4.2.3 Modelamiento del sistema: Se estructuró el Inventario del Ciclo de Vida (ICV), obtenido mediante la información recolectada en la fase 1, en el software openLCA, configurando procesos, flujos y conexiones entre unidades, conforme a la estructura modular del ACV.

4.2.4 Definición de las categorías de impacto y cuantificación de impactos: Se empleó el método ReCiPe 2016 (H) (Midpoint) para la evaluación de impactos ambientales potenciales (como cambio climático, eutrofización, toxicidad humana, ecotoxicidad acuática, uso de recursos y consumo de energía). Estas categorías, junto con otras incluidas en la metodología, se detallan en la Tabla 2, donde se presentan sus abreviaciones y unidades de caracterización. Finalmente, el software openLCA generó los perfiles de impacto ambiental del proceso.

Tabla 2

Categorías de impacto

Categoría de impacto	Abreviación	Unidad de caracterización
Calentamiento global	CC	kg CO_2 eq
Formación de material particulado fino	FMP	kg PM _{2.5} eq
Toxicidad cancerígena humana	TCH	kg 1,4-DCB
Toxicidad cancerígena no humana	TCN	kg 1,4-DCB
Agotamiento de la capa de ozono estratosférico	ACO	kg CFC11 eq
Radiación ionizante	RI	kBq Co-60 eq
Formación de ozono, salud humana	FOH	kg NO_x eq
Acidificación terrestre	AT	kg SO_2 eq
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	FOE	kg NO_x eq
Uso de suelo	US	$m^2 a$ crop eq
Consumo de agua	CA	m^3
Ecotoxicidad terrestre	EcT	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidad en agua dulce	EcA	kg 1,4-DCB
Eutrofización en agua dulce	EAD	kg P eq
Ecotoxicidad marina	EcM	kg 1,4-DCB
Eutrofización marina	EAM	kg N eq
Escasez de recursos fósiles	ERF	kg oil eq
Escasez de recursos minerales	ERM	kg Cu eq

Nota. Adaptado de (Huijbregts et al., 2017)

4.3 Evaluar los factores críticos del sistema mediante el ACV para diseñar estrategias que mejoren la sostenibilidad del sistema.

4.3.1 identificación de aspectos significativos: Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar las etapas del proceso con mayor contribución a las cargas ambientales. Este análisis consistió en la variación de datos característicos del sistema en el software OpenLCA con el fin de evaluar si los datos son representativos para el sistema que se está modelando.

4.3.2 Formulación de estrategias de mejora: Con base en los aspectos significativos identificados, se propusieron medidas orientadas a mejorar la sostenibilidad del proceso, alineadas con los principios de la economía circular.

5. Resultados y discusiones.

5.1 Definición de escenarios

De acuerdo con la metodología de ACV, se identificaron los principales flujos de entrada y salida del proceso de producción batch de producción de AIA a partir de cultivos de *Chlorella* sp, para tres escenarios: lixiviado de relleno sanitario en solución al 5% con radiación artificial 12:12 (luz: oscuridad), lixiviado de relleno sanitario en solución al 5% con radiación natural y Bold Basal condiciones estándar. Estos flujos corresponden a los recursos materiales y energéticos empleados como a los productos, coproductos y emisiones generados, los datos experimentales empleados en la construcción del inventario de ciclo de vida (ICV) los datos primarios utilizados provienen de los ensayos a nivel laboratorio de la producción de AIA en el sistema batch de *Chlorella* sp. reportados por (Ortiz, 2023) en su tesis de maestría y complementados con literatura y bases de datos secundarios.

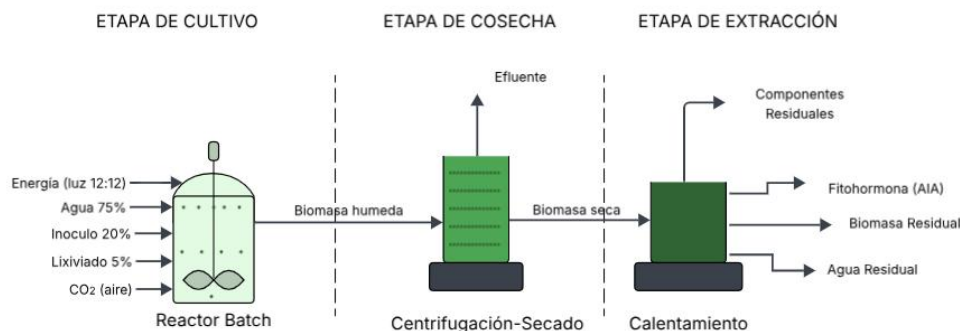
5.1.1.1 Lixiviado de relleno sanitario (12:12)

La carga inicial se formuló con un 5% de lixiviado proveniente del relleno sanitario de la empresa Veolia Aseo Cúcuta S.A. E.S.P del Centro Inteligente de Gestión Ecológica Guayabal; un 20% de inóculo de *Chlorella* sp.; y el restante de agua como medio de dilución. Las condiciones de cultivo se mantuvieron constantes durante 15 días, con aireación continua y un fotoperiodo de 12:12 horas (luz: oscuridad), parámetros considerados óptimos para el crecimiento de microalgas en sistemas de laboratorio.

Los resultados del inventario de consumo energético evidencian que la deshidratación y la aireación representan los mayores aportes al consumo energético del sistema, por lo que deben ser considerados con atención en la evaluación de impactos dentro del ACV.

Figura 1

Sistema para el escenario de lixiviado de relleno sanitario con radiación 12:12



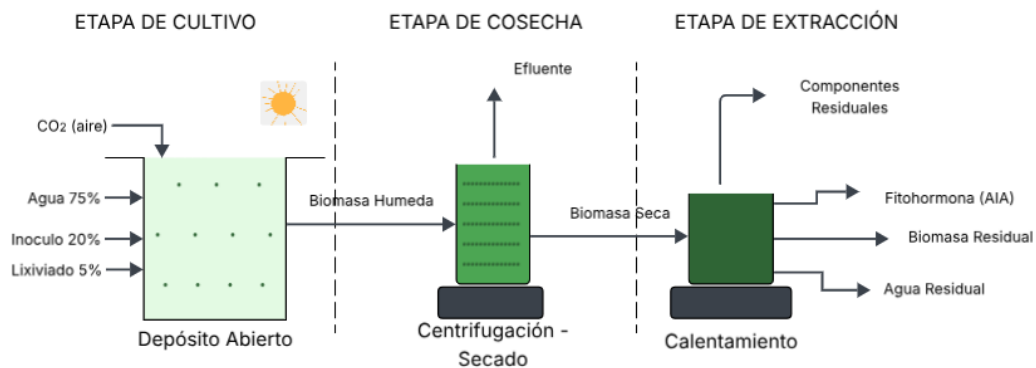
5.1.1.2 Lixiviado de relleno sanitario con radiación natural

La formulación inicial del cultivo para este escenario fue idéntica al escenario anterior, la diferencia está en la fuente de luz, dado que para este sistema se usó luz natural. Sin embargo, el fotoperiodo y la intensidad lumínica fueron modulados mediante una polisombra, la cual redujo la radiación directa e incremento la dispersión de la luz, evitando excesos de irradiancia que pudieran

afectar la fisiología de la *Chlorella* sp., siendo parámetros considerados óptimos para el crecimiento de microalgas en sistemas de laboratorio.

Figura 2

Sistema para el escenario de lixiviado de relleno sanitario con radiación natural



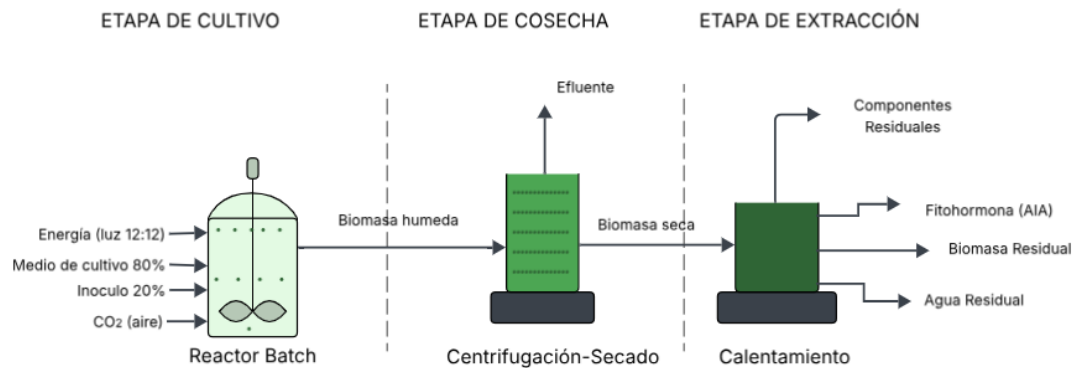
Se observa en la Figura 1 y 2 los procesos batch de producción de AIA a partir de cultivos de *Chlorella* sp. en lixiviado de relleno sanitario, constan de tres etapas principales. En la etapa 1 para el escenario 1 se desarrolla en un reactor batch bajo un fotoperiodo controlado de 12 h de luz y 12 h de oscuridad. En el escenario 2 se usa iluminación natural, regulada mediante polisombras de manera que se pueda evitar el daño por radiación intensa. Además de condiciones especificadas de agua (75%), inoculo (20%) y (5%) de lixiviado e inyección de CO_2 por parte de la aireación necesaria para los dos escenarios. En la etapa 2 de cosecha, la biomasa húmeda se somete a una sección de centrifugado y secado con el objetivo de separar el efluente y poder llegar a una mayor concentración de biomasa seca. La etapa 3 de extracción, la biomasa saliente de la etapa anterior experimenta condiciones térmicas para facilitar la liberación de metabolitos intracelulares como la AIA, además de fracciones de biomasa residual, agua residual y otros componentes. Posteriormente, la cuantificación de la fitohormona mediante el método Salkowski modificado por Bric et al 1991, para precisar la concentración de AIA.

5.1.1.3 Medio de cultivo Bold Basal

Para este escenario las proporciones y condiciones del inóculo y del cultivo se mantuvieron idénticas a los escenarios anteriores, la diferencia radica en la presencia elevada de las concentraciones de fosfatos y nitratos. En comparación con los otros escenarios este sistema no tiene un aporte orgánico todo radica en el aporte inorgánico. Por otro lado, el consumo energético se gestionó de manera similar al escenario 1.

Figura 3

Sistema para el escenario de medio de cultivo estándar



Se observa en la Figura 3 el proceso batch de producción de AIA a partir de cultivos de *Chlorella* sp, en cultivo estándar, consta de 3 etapas principales: la etapa 1 de cultivo, donde el crecimiento se desarrolla en un reactor batch bajo un fotoperiodo controlado 12:12, además se emplea un medio de cultivo (80%) el cual presenta una variedad de macronutrientes, micronutrientes, solución de metales, solución alcalina y solución de hierro, complementado con un inóculo (20%) y con el suministro de CO₂ proveniente de la aireación. En la etapa 2 y 3 se describen de igual manera que para los otros dos escenarios.

5.1.2 Identificación de flujos de entrada de materia

En el marco del estudio de ACV se establecieron los flujos de entrada al reactor batch para la producción de 1 gramo de AIA. En el inventario de ciclo de vida se consideran como entradas de energía los consumos asociados a la operación del reactor y a las etapas de cosecha del AIA, considerando sus respectivos tiempos. La Tabla 3 presenta las estimaciones correspondientes para la caracterización del lixiviado empleado en los balances de masa. Posteriormente se incorporan al software openLCA conforme a los lineamientos de la metodología ACV.

Tabla 3

Caracterización del lixiviados y entradas al reactor batch

Variable	Lixiviado
Amoniaco (mg NH_3-N/L)	48.50
Fosfatos (mg PO_4-P/L)	6.56
Nitratos (mg NO_3-N/L)	33.23
DQO (mg O_2/L)	251.2
DBO (mg O_2/L)	155.7
TOC (ppm)	5398.61
CO_2 (g)	2.5
Agua (L)	236.6
Biomasa (g/L)	0.022
Fitohormonas AIA (%p/p)	0.167

La Tabla 3 muestra la caracterización del lixiviado empleado como cultivo para el escenario 1 (iluminación artificial) y el escenario 2 (radiación natural), las entradas permanecen constantes en ambos casos, de manera que la diferencia está en la fuente de radiación y por ende el valor de consumo energético.

A continuación, se presenta la caracterización para el medio de cultivo estándar Bold Basal como medio de cultivo característico por su composición balanceada de macro y micronutrientes, combinando sales inorgánicas y agentes quelantes que aportan en el crecimiento de la microalga.

Tabla 4*Caracterización del medio de cultivo Escenario 3*

COMPONENTE	SOLUCIÓN STOCK <i>(g * L⁻¹ de H₂O)</i>	CANTIDAD UTILIZADA <i>(mL * L de medio)</i>
Macronutrientes		
<i>NaNO₃</i>	25.0 g	10mL
<i>MgSO₄. H₂O</i>	7.50 g	10mL
<i>NaCl</i>	2.50 g	10mL
<i>K₂HPO₄</i>	7.50 g	10mL
<i>KH₂PO₄</i>	17.50 g	10mL
<i>CaCl₂. 2H₂O</i>	2.50 g	10mL
Micronutrientes		
<i>Solución de metales</i>		1mL
<i>ZnSO₄. 7H₂O</i>	8.82 g	
<i>MnCl₂. 4H₂O</i>	1.44 g	
<i>MoO₃</i>	0.71 g	
<i>CuSO₄. 5H₂O</i>	1.57 g	
<i>Co(NO₃)₂. 6H₂O</i>	0.49 g	
<i>Solución de Boro</i>		1mL
<i>H₃BO₃</i>	11.42 g	
<i>Solución alcalina</i>		1mL
<i>EDTA</i>	50.0 g	
<i>KOH</i>	31.0 g	
<i>Solución de Hierro</i>		1mL
<i>FeSO₄. 7H₂O</i>	4.98 g	
<i>H₂SO₄(conc)</i>	1.0 mL	

Además de los flujos de entrada, fue necesario identificar los equipos empleados en cada escenario, ya que estos representan un aporte significativo al consumo energético del sistema. La estimación de la energía demandada por cada etapa experimental (iluminación, aireación y cosecha de biomasa) permite establecer con mayor precisión el ICV, dado que estos consumos constituyen una de las principales cargas ambientales del proceso. La Tabla 5 presenta el listado de equipos empleados y sus respectivos consumos energéticos.

Tabla 5*Consumos energéticos*

Equipo	Escenario 1(kWh)	Escenario 2(kWh)	Escenario 3(kWh)
Compresor	36.49	36.49	224.49
Lámparas	68.14	0	419.20
Centrifuga	2.23	2.23	2.237
Plancha de calentamiento	0.10	0.10	0.104
Deshidratador	24	24	24
TOTAL	130.96	62.82	670.04

5.1.3 Identificación de flujos de salida

Los flujos de salida representan los elementos importantes para la construcción del inventario del ciclo de vida (ICV), debido a que permiten cuantificar el rendimiento del proceso como la generación de los impactos ambientales, para ello se identificó la fitohormona (AIA) como producto valorizable del proceso; la biomasa residual de *Chlorella* sp. como un subproducto; y las concentraciones de nitratos y fosfatos presentes en el medio, que permiten observar la fracción de nutrientes no asimilados durante el cultivo, como se evidencia en la Tabla 6.

Tabla 6*Flujos de salida de los escenarios*

Variable	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
PO ₄ -P (mg/L)	1.02	1.02	----
NO ₃ -N (mg/L)	68.13	68.13	----
Biomasa (g/L)	0.121	0.121	0.229
Fitohormona AIA (%p/p)	3.493	3.493	0.3

Al finalizar el proceso, la fracción residual del medio corresponde a 159.705 litros para el Escenario 1 y Escenario 2, mientras que en el Escenario 3 alcanza 1048.032 litros. La diferencia respecto al volumen inicial de agua se explica por las pérdidas asociadas a los procesos de la fase de cosecha principalmente en el centrifugado y deshidratado, así como por la evaporación durante

el secado y las pérdidas adicionales por exposición a radiación, sin embargo, el diseño del sistema busca mantener un volumen de operación constante.

La identificación de los flujos de materia, energía y emisiones permitió estructurar el inventario en el simulador openLCA, garantizando la coherencia de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En este sentido, los consumos energéticos y de insumos se incorporan como flujos de entradas del sistema, mientras que la fitohormona (AIA), la biomasa residual y los residuos líquidos derivados de la etapa de cosecha y extracción se establecieron como flujos de salida. Esta caracterización en el software constituye la base para el cálculo de impactos ambientales y la valorización del proceso de producción de AIA.

5.2 Impactos ambientales potenciales del proceso

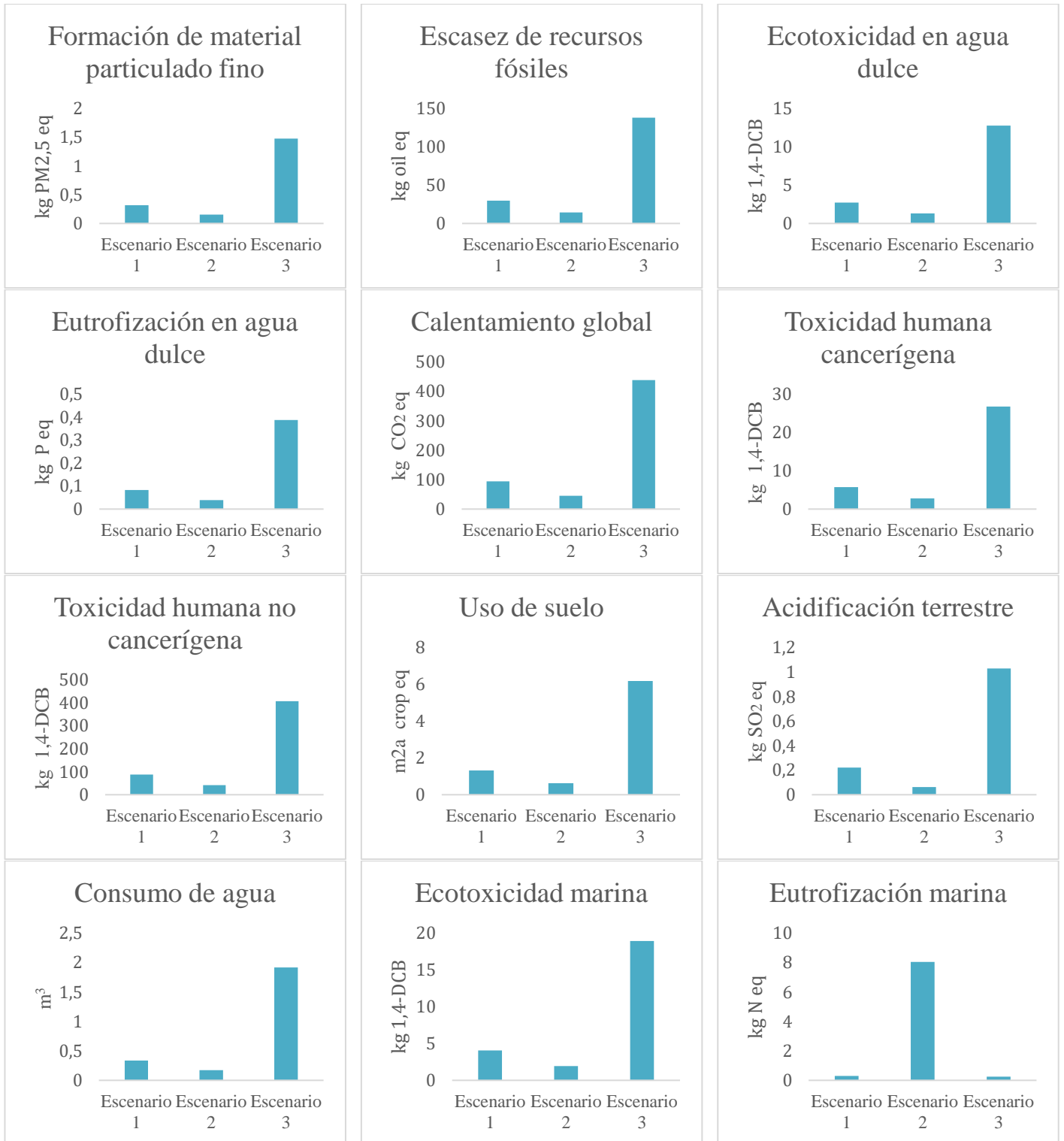
La determinación de las medidas de impacto se llevó a cabo a partir de la caracterización de resultados, utilizando el método de impacto ReCiPe 2016 (Midpoint) bajo la perspectiva Hierarchist para la evaluación de impactos ambientales potenciales como el cambio climático, eutrofización, toxicidad humana, ecotoxicidad acuática, uso de recursos y consumo de energía con el objetivo de manifestar la importancia de cada indicador.

5.2.1 Indicadores de impacto

En el software openLCA se implementó la metodología ReCiPe 2016 (H) Midpoint, y evaluó 18 impactos apropiados para el estudio y considerados de importancia para el análisis de la producción de AIA y toma de decisiones en términos de sostenibilidad ambiental.

Figura 4

Indicadores de impacto



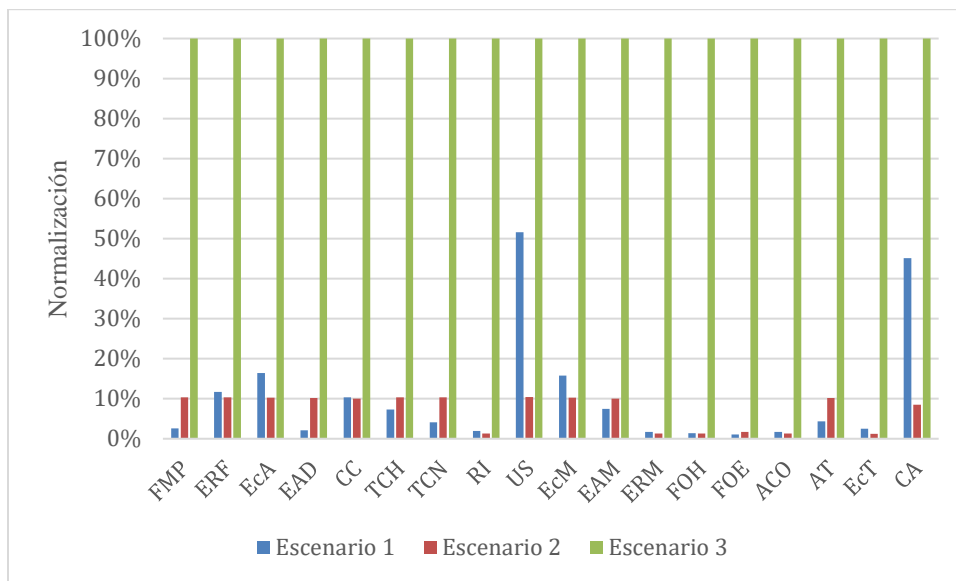
Mediante diagramas de barras se compararon los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios, en cuanto al impacto por emisiones de material particulado y sus precursores (European Commission, n.d.). El Escenario 3 muestra un valor más alto, con 1.477 kg PM_{2.5} eq, frente a 0.15291 kg PM_{2.5} eq en el Escenario 2 y 0.3187 kg PM_{2.5} eq en el Escenario 1. Esta diferencia se explica por la composición del medio de cultivo que se compone de sales minerales, solución de metales y alcalina, así como por macronutrientes y micronutrientes de origen sintético implicando un mayor consumo de recursos, lo que se traduce en mayores emisiones e impactos. En contraste con los escenarios con lixiviados, que aprovechan nutrientes residuales ya disponibles, reduciendo la necesidad de insumos adicionales.

De manera similar, el impacto en la acidificación terrestre refleja la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua debido a los aportes ácidos y el uso de suelos (Andres olivera, 2016). La eutrofización de agua dulce se relaciona con el aporte de nitrógeno y fósforo que afecta la integridad de los ecosistemas acuáticos (Dey & Ray, 2022). La ecotoxicidad en el agua dulce se refiere a los posibles efectos considerables sobre los compuestos que existen de manera natural en el medio por presencia de compuestos xenobióticos (Andres olivera, 2016), mientras, la ecotoxicidad terrestre está dominada por el uso de pesticidas al suelo, ácido sulfúrico y vapor durante el proceso (Dey & Ray, 2022). En todos estos casos, el Escenario 3 se muestra como la opción menos favorable, con valores que superan más de tres veces los observados en los escenarios con lixiviados.

Por otro lado, el impacto del calentamiento global evaluado a partir del aumento de la temperatura media global como resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (European Commission, n.d.), presenta diferencias significativas entre los escenarios, lo que justifica un análisis más detallado. El Escenario 2, presenta un valor más bajo, con 45.2156 kg

CO_2 eq, debido a que evita el consumo eléctrico asociado a la iluminación artificial, siendo aportada por radiación natural, además de beneficiarse del uso de los nutrientes residuales. El Escenario 1 ocupa una posición intermedia, ya que, si bien emplea lixiviados como fuente de nutrientes, presenta una demanda eléctrica elevada en etapas del proceso, puntualmente en la iluminación artificial y aireación, lo que incrementa su carga ambiental respecto al Escenario 2. Finalmente, el Escenario 3 es el menos favorable, dado que a su baja productividad es necesario incrementar el consumo energético en los equipos para alcanzar volúmenes comparables de producción de AIA. No obstante, el consumo de agua también se incrementa en igual medida, pues es necesario utilizar volúmenes adicionales para compensar la menor eficiencia del proceso.

Por su parte la toxicidad humana no cancerígena se refiere a niveles de riesgo por exposición a tóxicos ambientales no cancerígenos. (Andres olivera, 2016), para este análisis se obtuvo un valor de 407.07 kg 1,4-DCB por gramo de AIA para el Escenario 1, 4.966 kg 1,4-DCB para el Escenario 2 y 87.475 kg 1,4-DCB para el Escenario 3. Lo que sugiere que los sistemas estudiados se ven particularmente afectados por el uso de energía e insumos en la etapa de cultivo y extracción, así como el manejo del medio de cultivo, que puede contener compuestos con efectos tóxicos no cancerígenos. Cabe resaltar que el Escenario 1 muestra una reducción en los efectos asociados a la presencia de metales en comparación con los demás escenarios, este comportamiento se respalda en lo señalado por (Nawaz et al., 2020), quienes recomienda emplear el uso de un reactor que garantice condiciones de fotoluminiscencia y adecuada oxigenación.

Figura 5*Normalización de escenarios*

En el análisis de ciclo de vida (ACV) realizado no se consideraron los impactos correspondientes a la radiación ionizante, escasez de recursos minerales, formación de ozono en la salud humana y ecosistemas terrestres, agotamiento de la capa de ozono estratosférico y ecotoxicidad terrestre, debido a que cuando se realizó la normalización sus contribuciones fueron bajas en comparación con otras categorías evaluadas, esto indica que, aunque estén presentes en el inventario, su contribución relativa al desempeño ambiental es mínima y no representa un punto crítico dentro del proceso analizado.

5.3. Análisis de sensibilidad y formulación de estrategias de mejora

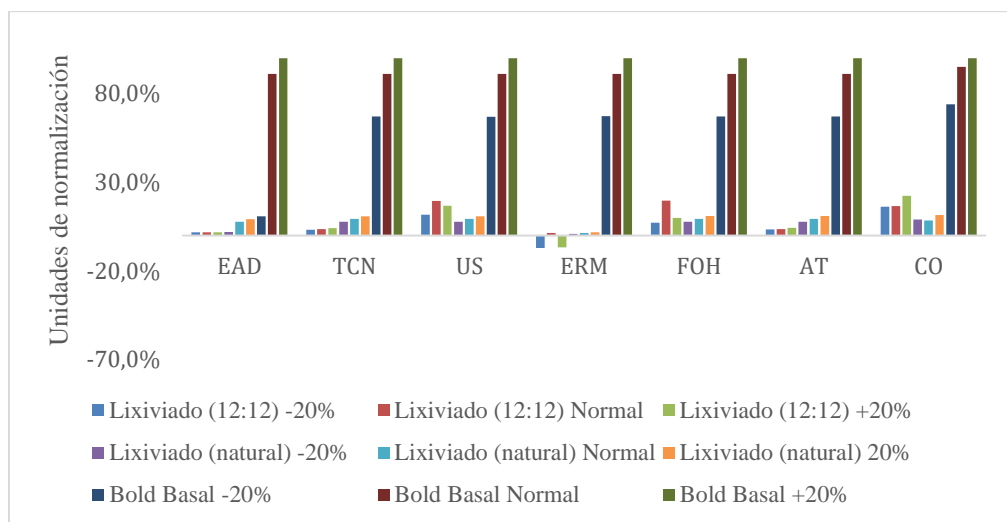
5.3.1 Análisis de sensibilidad

En el análisis de sensibilidad de ACV es común considerar variaciones de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ y $\pm 30\%$ en los parámetros de entrada para reflejar incertidumbre de los procesos y consumos energéticos. Para este proceso se seleccionó un rango $\pm 20\%$ porque representa un equilibrio en la interpretación de resultados. (GreenDelta, n.d.).

En particular, el análisis se aplicó a los parámetros consumo energético y aporte de nutrientes en el medio de cultivo, ya que estos representan las principales contribuciones a la carga ambiental del sistema y, por lo tanto, contribuyen factores críticos de incertidumbre. Se determinó la sensibilidad de los efectos evaluados la variación en porcentaje con respecto al valor inicialmente calculado. (Ríos & Saavedra, 2023).

Figura 6

Sensibilidad de electricidad



A continuación, se presentan los resultados del análisis de sensibilidad realizado sobre la variación en el consumo eléctrico en los tres escenarios evaluados. Los porcentajes de sensibilidad calculados muestran que las variaciones obtenidas no superaron al 15% en los resultados de impacto, lo cual indica que el modelo presenta una robustez aceptable frente a fluctuaciones en el consumo energético (Bisinella et al., 2016). Por otro lado, se evidenció una relación directa de los impactos evaluados con el incremento del consumo energético. Demostrando así que, el consumo energético resalta como un punto crítico en el desempeño del sistema.

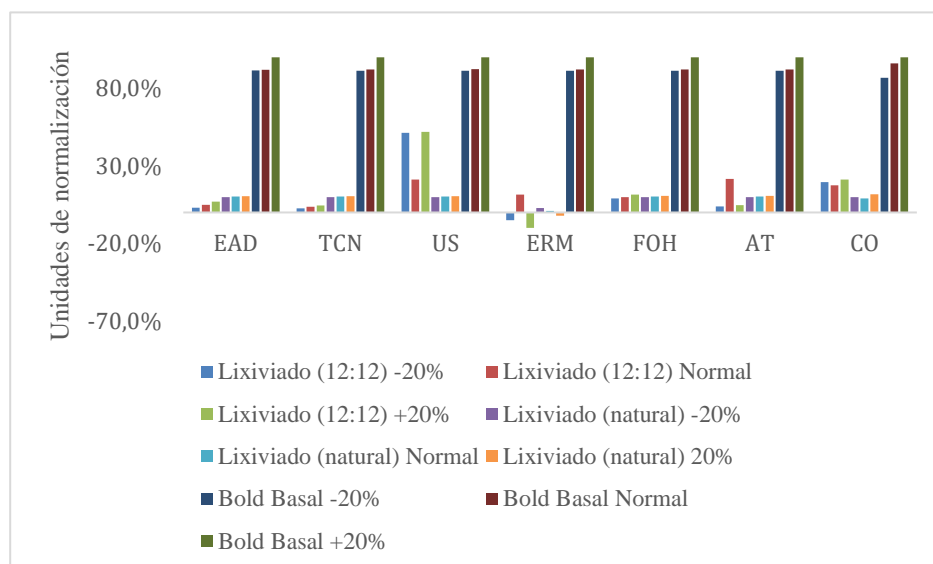
Bradley et al., (2023) menciona que la electricidad y la infraestructura son fuente importante de impacto ambiental, en el caso de este estudio, la energía directa utilizada consiste

en la energía empleada en las etapas de cultivo, cosecha y la extracción, que determinan en gran parte de la carga ambiental del sistema, influyendo de manera directa en el cambio climático que relaciona los impactos de eutrofización marina y en agua dulce, así como la acidificación terrestre, los cuales se ven intensificados.

Por último, se analiza la sensibilidad que presenta la caracterización del medio de cultivo que ingresa al reactor batch, bajo el supuesto que se mantiene constante el porcentaje de remoción de contaminantes en el reactor, esto se traduce en un mayor potencial de eutrofización, tanto en agua dulce como en ecosistemas marinos, debido a la disponibilidad adicional de fosforo y nitrógeno. (Corominas et al., 2013)

Figura 7

Sensibilidad de caracterización



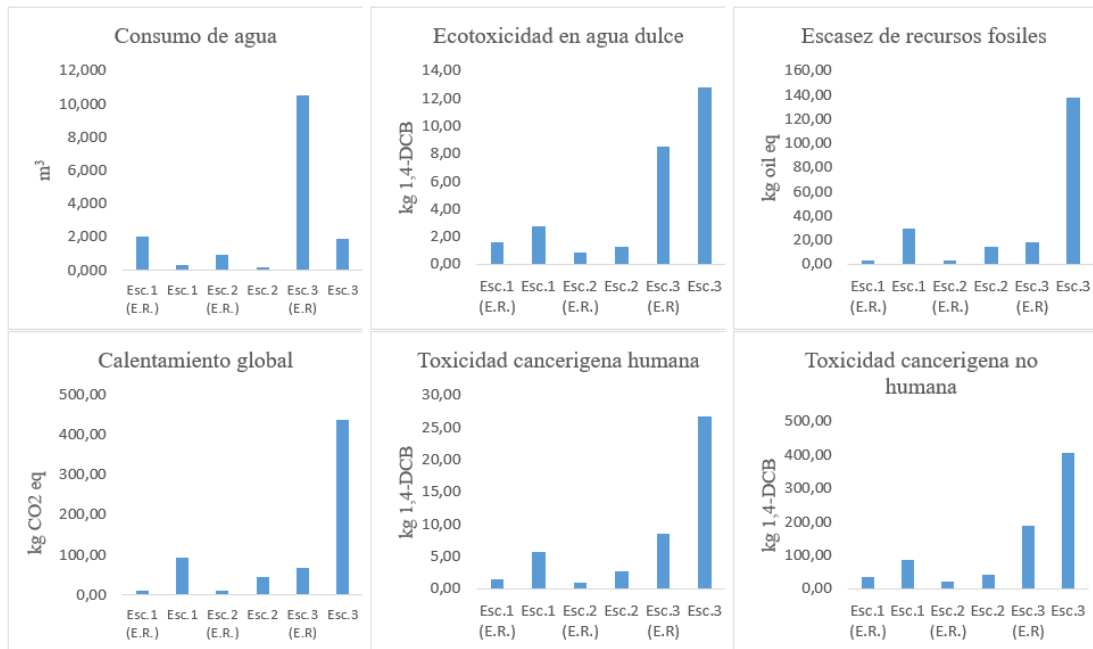
A continuación, se presentan los resultados del análisis de sensibilidad realizado sobre la variación la caracterización del medio en los tres escenarios evaluados. Los porcentajes de sensibilidad calculados muestran que las variaciones obtenidas no superaron al 5% en los resultados de impacto a excepción de la categoría de eutrofización marina que superan el 10%, además se observa una relación directamente proporcional del impacto con la variación de las

características del medio de cultivo, lo cual indica que el modelo presenta una robustez aceptable. (Bisinella et al., 2016)

En este contexto, estudios previos han demostrado que el uso de lixiviado puede favorecer tanto la productividad como la eficiencia del sistema. Nawaz et al., (2020) reportaron que la *Chlorella sp.* cultivada en lixiviado alcanzo un crecimiento 1.8 veces mayor al observado en medio Bold Basal, con un 77.4% de remoción de nitrato. Este comportamiento sugiere que la interacción iónica entre el lixiviado y la microalga contribuye a la disminución de efectos tóxicos y promoviendo el crecimiento.

5.3.2 Estrategias de sostenibilidad

Dentro del marco de la sostenibilidad del proceso se plantean diversas estrategias con el propósito de reducir los impactos ambientales resultantes del proceso batch de producción de AIA a partir de cultivos de *chlorella sp.* En primer lugar, se propone la sustitución de energía eléctrica convencional por fuentes renovables, dado que el consumo energético es uno de los aspectos que más tiene repercusión en los resultados de análisis de ciclo de vida (ACV), puntualmente en las categorías de calentamiento global y escasez de recursos fósiles, categorías dominantes en el Escenario 1 y 3.

Figura 8*Consumo energético*

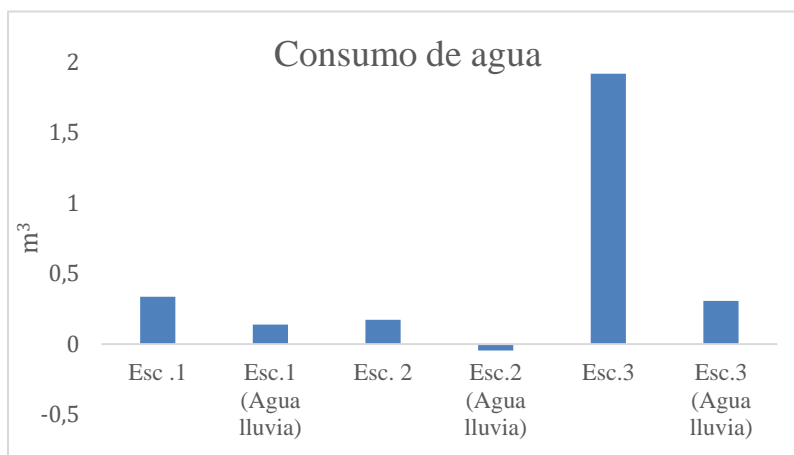
Nota: E.R.: Energía renovable

A partir de los resultados del ACV, se evidencio que el uso de lixiviados como medio de cultivo representa una mejor alternativa frente al Escenario 3 (Bold Basal), al presentar menores cargas ambientales y un mejor rendimiento de producción de AIA. No obstante, como estrategia de mejora para mitigar los efectos asociados al consumo energético, se sugiere implementar fuentes de energía renovable, lo que contribuiría a disminuir la huella ambiental sin sacrificar la eficiencia del proceso. Esto se puede evidenciar en la Figura 7, donde se presentan los resultados del ACV al emplear una energía renovable, como resultado se evidencia que las categorías con mayores reducciones de emisiones en el escenario 1, son calentamiento global de 83.24 kg CO_2 eq, escasez de recursos fósiles 26.74 kg oil eq., toxicidad cancerígena, no humana de 52.64 kg 1,4-DCB; en el escenario 2, son calentamiento global de 35.66 kg CO_2 eq, escasez de recursos fósiles 11.47 kg oil eq., toxicidad cancerígena, no humana de 21.29 kg 1,4-DCB. En el caso del escenario

2 (lixiviado con radiación natural mediante polisombra), esta opción resulta ventajosa al reducir impactos y aprovechar la luz solar; sin embargo, presenta la limitación de no contar con un control adecuado de fotoluminiscencia, estas variaciones se deben a condiciones climáticas. Por ello, se recomienda priorizar el Escenario 1 (lixiviado con radiación artificial), que permite mantener un proceso más estable y controlado.

Figura 9

Consumo de agua



Por otra parte, la recolección y aprovechamiento de agua lluvia, como medida para disminuir el consumo de agua, que constituye una de las categorías críticas en todos los escenarios, lo cual hace que esta práctica sea relevante pues la cantidad de agua usada es elevada, además se puede evidenciar un ahorro económico (Valenzuela C et al., 2019).

El consumo de agua es una limitación transversal en todos los escenarios, pero especialmente crítico en el Bold Basal, por lo que se propone la implementación de sistemas de recolección y aprovechamiento de agua lluvia como estrategia de sostenibilidad. Si bien esta medida es relevante de forma general, es importante ya que la combinación de lixiviados con agua lluvia permite reducir la dependencia de agua potable y aprovechar recursos disponibles locales.

Los resultados de la categoría de consumo de agua muestran diferencias notables entre los escenarios evaluados, siendo el Escenario 3 (Bold Basal) el de mayor impacto, con un valor de $1.91 m^3$, muy superior al observado en los escenarios con lixiviados $0.33m^3$ escenario 1 y $0.17 m^3$ Escenario 2. Esta evidencia refuerza la necesidad de implementar estrategias que mitiguen este impacto, entre ellas el aprovechamiento de agua lluvia. La incorporación de agua lluvia en el modelo reduce significativamente la carga hídrica de 0.13, 0.044, $0.30 m^3$ para los Escenarios 1,2 y 3 respectivamente.

De esta manera, los escenarios que implementan el lixiviado como medio de cultivo se beneficiarían al complementar su bajo consumo energético con una gestión hídrica más sostenible, y de esta manera se configurarían los Escenarios 1 y 2 como alternativas más sostenibles frente al escenario Bold Basal. De esta manera, los escenarios que implementan el lixiviado como medio de cultivo se beneficiarían al complementar su bajo consumo energético con una gestión hídrica más sostenible, y de esta manera se configurarían los Escenarios 1 y 2 como alternativas más sostenibles frente al escenario Bold Basal.

6. Conclusiones

Mediante la modelación del proceso batch de producción de AIA con *Chlorella* sp., en openLCA, se cuantificaron los impactos ambientales del sistema y se identificaron los parámetros responsables de la mayor carga ambiental, los resultados mostraron impactos relevantes en categorías como el calentamiento global y escasez de recursos fósiles, mientras que, de manera contrastante, se observó un impacto positivo en la eutrofización atribuible al aprovechamiento de lixiviado como medio de cultivo, este enfoque no solo contribuyo a reducir la carga contaminante, sino que además mejoro la productividad del sistema.

Al comparar los tres escenarios evaluados, se determinó que el Escenario 1 (lixiviado con radiación artificial) representa la opción más viable desde una perspectiva ambiental y productiva. Este escenario combina las ventajas del uso de lixiviados y si bien el enfoque implica un mayor consumo energético, la implementación de energías renovables surge como estrategia de mejora, permitiendo mitigar significativamente los impactos asociados al 83.24 Kg de CO_2 eq en calentamiento global, 26.74 kg oil eq en escasez de recursos fósiles y una carga hídrica de $0.13m^3$, de este modo, integra eficiencia productiva y responsabilidad ambiental.

El análisis de sensibilidad permitió identificar factores críticos del sistema como el consumo energético y el uso de agua, los cuales representan las principales contribuciones a la carga ambiental en la producción de fitohormonas (AIA), por lo que surge la necesidad de enfocar estrategias de sostenibilidad en las etapas de cultivo y cosecha, por ello se propone la implementación de energía solar para disminuir la dependencia de la matriz eléctrica y el aprovechamiento de agua lluvia como medida de reducción del gasto hídrico, y a su vez se está generando un producto de valor agregado contribuyendo a los principios de economía circular y eficiencia ambiental

7. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se recomienda la implementación del Escenario 1 (lixiviado con radiación artificial) como alternativa prioritaria, dado que garantiza un medio de cultivo con fotoperiodos más estables y controlados, permitiendo tener una mejor eficiencia en términos de productividad de AIA. No obstante, para disminuir la carga ambiental identificada por el consumo energético y el uso de agua, se sugiere integrar fuentes de energía renovable en la matriz eléctrica y sistemas de aprovechamiento de agua lluvia como insumo hídrico. La adopción de estas estrategias contribuye a maximizar el desempeño ambiental del proceso y garantizar su viabilidad técnica, integrándose de manera coherente a los principios de economía circular.

Referencias Bibliográficas

- Alba, C., Universidad, Q., Valle, D., De Ingenierías, F., De, E., & Química, I. (2013). *EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS A PARTIR DE LA MICROALGA Chlorella vulgaris*.
- Andres olivera, stella cristobal, carlos saizar. (2016). *Vista de Análisis de ciclo de vida ambiental, económico y social. Una herramienta para la evaluación de impactos y soporte para la toma de decisiones*. https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEK-Gestion/article/view/364/pdf_1
- Angulo, E., Bula, L., Mercado, I., Montañó, A., & Cubillán, N. (2018). Bioremediation of Cephalexin with non-living Chlorella sp., biomass after lipid extraction. *Bioresource Technology*, 257, 17–22. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.02.079>
- Arias, A. (2016). *FUNDACIÓN IBÉRICA PARA LA SEGURIDAD ALIMENTARIA*. https://www.academia.edu/25921074/FUNDACION_IBERICA_PARA_LA_SEGURIDAD_ALIMENTARIA
- Astros, I. R., Navarro, M. C., & Páez, A. I. (2014). Evaluación del cambio en la concentración de dióxido de carbono en una corriente de gas mediante el uso de Chlorella vulgaris. *Elementos*, ISSN-e 2248-5252, Vol. 4, N°. 4, 2014 (Ejemplar Dedicado a: Elementos), Págs. 113-121, 4(4), 113–121. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5085373&info=resumen&idioma=ENG>
- Banguera Obando Daniel Varela Santiago, J., & Ortiz, S. (2021). *Estudios de Chlorella spp en Colombia Revisión sistemática: Métodos de cultivo y sus aplicaciones*.
- Bashan, Y., & de-Bashan, L. E. (2010). How the Plant Growth-Promoting Bacterium Azospirillum Promotes Plant Growth—A Critical Assessment. *Advances in Agronomy*, 108(C), 77–136. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8)

- Bisinella, V., Conradsen, K., Christensen, T. H., & Astrup, T. F. (2016). A global approach for sparse representation of uncertainty in Life Cycle Assessments of waste management systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(3), 378–394. <https://doi.org/10.1007/S11367-015-1014-4/METRICS>
- Bradley, T., Rajaeifar, M. A., Kenny, A., Hainsworth, C., del Pino, V., del Valle Inclán, Y., Povoia, I., Mendonça, P., Brown, L., Smallbone, A., Roskilly, A. P., Joyce, S., & Heidrich, O. (2023). Life cycle assessment of microalgae-derived biodiesel. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(5), 590–609. <https://doi.org/10.1007/S11367-023-02140-6/TABLES/4>
- Castillo, G., Altuna, B., Michelena, G., Sánchez-Bravo, J., Acosta, M., & Acosta, C. M. (2005). Cuantificación del contenido de ácido indolacético (AIA) en un caldo de fermentación microbiana. *Anales de Biología*, 27, 137–142.
- Claudia, M., & Herrera Herrera, P. (2018). *Evaluación de la operación de reactores UASB en condiciones ambiente para la reducción de DBO y DQO en aguas residuales domésticas en Barranquilla*.
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J. S., Hospido, A., Larsen, H. F., Morera, S., & Shaw, A. (2013). *Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.049>
- Dey, P., & Ray, S. (2022). Environmental impacts of biofuels and their blends: a case study on waste vegetable oil-derived biofuel blends. *Biofuels and Bioenergy: A Techno-Economic Approach*, 755–770. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90040-9.00017-5>
- Espinoza H, A., & Espinoza H, A. (2023). ECONOMÍA CIRCULAR: UNA APROXIMACIÓN A SU ORIGEN, EVOLUCIÓN E IMPORTANCIA COMO MODELO DE DESARROLLO

- SOSTENIBLE. *Revista de Economía Institucional*, 25(49), 109–134.
<https://doi.org/10.18601/01245996.V25N49.06>
- Fazal, T., Rehman, M. S. U., Javed, F., Akhtar, M., Mushtaq, A., Hafeez, A., Alaud Din, A., Iqbal, J., Rashid, N., & Rehman, F. (2021). Integrating bioremediation of textile wastewater with biodiesel production using microalgae (*Chlorella vulgaris*). *Chemosphere*, 281, 130758.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130758>
- Ferreira, A., Melkonyan, L., Carapinha, S., Ribeiro, B., Figueiredo, D., Avetisova, G., & Gouveia, L. (2021). Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. *Environmental Advances*, 4, 100062.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2021.100062>
- GreenDelta. (n.d.). *Parameters - openLCA 2 manual*. Retrieved September 3, 2025, from <https://greendelta.github.io/openLCA2manual/parameters/index.html>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/S11367-016-1246-Y/TABLES/2>
- Ilmasari, D., Kamyab, H., Yuzir, A., Riyadi, F. A., Khademi, T., Al-Qaim, F. F., Kirpichnikova, I., & Krishnan, S. (2022). A review of the biological treatment of leachate: Available technologies and future requirements for the circular economy implementation. *Biochemical Engineering Journal*, 187, 108605. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2022.108605>
- ISO 14040:2006(es), *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*. (n.d.). Retrieved August 20, 2025, from <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

ISO 14044:2006(es), Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices.

(n.d.). Retrieved August 20, 2025, from <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>

Kapoores, R. V., Wood, E. E., & Llewellyn, C. A. (2021a). Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances*, 49, 107754. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2021.107754>

Kapoores, R. V., Wood, E. E., & Llewellyn, C. A. (2021b). Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances*, 49, 107754. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2021.107754>

Kurt Eduardo Ziegler Rodriguez. (n.d.). *Evaluación ambiental por medio del Análisis de Ciclo de Vida del relleno sanitario de distrito de Nauta, en Loreto.*

Life Cycle Assessment & the EF methods - European Commission. (n.d.-a). Retrieved August 29, 2025, from https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/environmental-footprint-methods/life-cycle-assessment-ef-methods_en

Life Cycle Assessment & the EF methods - European Commission. (n.d.-b). Retrieved August 29, 2025, from https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/environmental-footprint-methods/life-cycle-assessment-ef-methods_en

Mclvor, L. (2025, June). *Indoleacetic Acid (IAA) - A Level Biology Revision Notes.* <https://www.savemyexams.com/a-level/biology/aqa/17/revision-notes/6-organisms-respond-to-changes-in-their-environments-a-level-only/6-1-response-to-stimuli-a-level-only/6-1-3-indoleacetic-acid-iaa/>

Mixquititla-Casbis, G., & Villegas-Torres, Ó. G. (2016). *Importancia de los fosfatos y fosfitos en la nutrición de cultivos.* <https://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/57>

- Naveen, B. P., Mahapatra, D. M., Sitharam, T. G., Sivapullaiah, P. V., & Ramachandra, T. V. (2017). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. *Environmental Pollution*, 220, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.09.002>
- Nawaz, T., Rahman, A., Pan, S., Dixon, K., Petri, B., & Selvaratnam, T. (2020). A Review of Landfill Leachate Treatment by Microalgae: Current Status and Future Directions. *Processes* 2020, Vol. 8, Page 384, 8(4), 384. <https://doi.org/10.3390/PR8040384>
- Olarte Gómez, E. A., & Valencia Giraldo, M. J. (2016). *Evaluación del uso de la microalga Chlorella vulgaris en el tratamiento de aguas residuales industriales (Vinazas)* [Universidad Nacional abierta y a distancia]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/5882/91535665.pdf?sequence=3>
- Ortiz, M. (2023). *Transformación de lixiviados del Parque Tecnológico Ambiental Guayabal (Veolia Aseo Cúcuta S.A.E.S.P) en productos de valor agregado mediante el uso de microalgas y cianobacterias* [Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/1bc356c7-8e97-4fc2-9637-0449ffdf7bad/content>
- Pablo, A., & Arena, A. P. (2017). *Guía metodológica: Análisis de ciclo de vida*.
- Paiva, A. L. P., Gonçalves da Fonseca Silva, D., & Couto, E. (2021). Recycling of landfill leachate nutrients from microalgae and potential applications for biomass valorization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105952. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105952>
- Pinpatthanapong, K., Khetkorn, W., Honda, R., Phattarapattamawong, S., Treesubuntorn, C., Panasan, N., Boonmawat, P., Tianthong, Y., Lipiloet, S., Sorn, S., Jutakanoke, R.,

- Prachanurak, P., & Boonnorat, J. (2022). Effects of high-strength landfill leachate effluent on stress-induced microalgae lipid production and post-treatment micropollutant degradation. *Journal of Environmental Management*, 324, 116367. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.116367>
- 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>
- Press, C. M., Wilson, M., Tuzun, S., & Kloepper, J. W. (1997). Salicylic acid produced by *Serratia marcescens* 90-166 is not the primary determinant of induced systemic resistance in cucumber or tobacco. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 10(6), 761–768. <https://doi.org/10.1094/MPMI.1997.10.6.761>
- Relleno sanitario | Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos -UAESP-*. (n.d.). Retrieved July 10, 2025, from <https://www.uaesp.gov.co/transparencia/informacion-interes/glosario/relleno-sanitario>
- Ríos, L., & Saavedra, L. (2023). *Construcción de escenarios para el análisis de procesos de fitorremediación mediante análisis de ciclo de vida* [Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/776bb02f-b54a-4f68-ae29-3173cb76f126/content>
- Rodríguez, A. M. (n.d.). *I. FITOHORMONAS Marco conceptual*. Retrieved July 15, 2025, from https://www.academia.edu/16302307/I_FITOHORMONAS_Marco_conceptual
- Smith, V. H. (2003). Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: A global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(2), 126–139. <https://doi.org/10.1065/ESPR2002.12.142/METRICS>

- Tebbutt, T. H. Y. (1983). *Principles of Water Quality Control - T.H.Y. Tebbutt - Google Libros*.
<https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=IEcvBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ot#v=onepage&q&f=false>
- Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research*, 203, 117525.
<https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.117525>
- Tighiri, H. O., & Er Kurt, E. A. (2019). Biotreatment of landfill leachate by microalgae-bacteria consortium in sequencing batch mode and product utilization. *Bioresource Technology*, 286, 121396. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121396>
- Vacca-Jimeno, V. A., Angulo-Mercado, E. R., Puentes-Ballesteros, D. M., Torres-Yépez, J. G., Plaza-Vega, M. E., Vacca-Jimeno, V. A., Angulo-Mercado, E. R., Puentes-Ballesteros, D. M., Torres-Yépez, J. G., & Plaza-Vega, M. E. (2017). Uso de la microalga *Chlorella* sp. viva en suspensión en la decoloración del agua residual de una empresa textil. *Prospectiva*, 15(1), 93–99. <https://doi.org/10.15665/RP.V15I1.829>
- Valenzuela C, Muñoz, ;, & Gomes, ; (2019). Diseño de un Sistema de Aprovechamiento de Agua Lluvia bajo criterios de Eficiencia Hídrica en Edificios. Caso de estudio: Edificio de Clases y Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central. *INGENIO*, 2(2), 25–37.
<https://doi.org/10.29166/INGENIO.V2I2.1700>
- Venkata Mohan, S., Rohit, M. V., Chiranjeevi, P., Chandra, R., & Navaneeth, B. (2015). Heterotrophic microalgae cultivation to synergize biodiesel production with waste remediation: Progress and perspectives. *Bioresource Technology*, 184, 169–178.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.10.056>

- Wu, J. Y., Lay, C. H., Chiong, M. C., Chew, K. W., Chen, C. C., Wu, S. Y., Zhou, D., Kumar, G., & Show, P. L. (2020). Immobilized *Chlorella* species mixotrophic cultivation at various textile wastewater concentrations. *Journal of Water Process Engineering*, *38*, 101609. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101609>
- Yan, C., Zhu, L., & Wang, Y. (2016). Photosynthetic CO₂ uptake by microalgae for biogas upgrading and simultaneously biogas slurry decontamination by using of microalgae photobioreactor under various light wavelengths, light intensities, and photoperiods. *Applied Energy*, *178*, 9–18. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.06.012>
- Zarza, L. (2023). ¿Qué son las aguas residuales? | *iAguas*. <https://www.iagua.es/respuestas/queson-aguas-residuales>
- Zhou, W., Wang, Z., Xu, J., & Ma, L. (2018). Cultivation of microalgae *Chlorella zofingiensis* on municipal wastewater and biogas slurry towards bioenergy. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *126*(5), 644–648. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.05.006>