

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

Trabajo de investigación

Mateo Beltrán Torres y Valentina Bueno Fonseca

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira

Ing MSc.Ingeniería Química

Codirector

Jefferson Eduardo Contreras Restrepo

Magister en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Introducción 7

1. Objetivos 8

 1.1 Objetivo General 8

 1.2 Objetivos Específicos 8

2. Estado del Arte 8

3. Metodología 11

 3.1 Definición del alcance del sistema 11

 3.1.1 *Unidad funcional* 11

 3.1.2 *Límites del sistema* 11

 3.2 Balance del sistema 12

 3.3 Optimización del proceso 13

 3.4 Inventario del ciclo de vida (ICV) 16

 3.5 Evaluación del impacto ambiental (LCIA) 17

 3.6 Interpretación de resultados 18

4. Resultados 19

 4.1 Resultados de las categorías de impacto 19

 4.1.1 *Resultados de impacto ambiental: caso base* 19

 4.1.2 *Resultados y balance de masa de la Alternativa 1 (energía renovable)* 22

4.1.3 Resultados y balance de masa de la Alternativa 2 (uso de agua residual de piscicultura)	24
4.1.4 Resultados y balance de masa de la Alternativa 3 (extracción intensificada)	26
4.2 Análisis de resultados y discusión ambiental.....	29
4.2.1 Cambio climático y uso de recursos energéticos	30
4.2.2 Nutrientes y gestión del agua.....	32
4.2.3 Toxicidad humana y ecotoxicidad asociada a insumos químicos	35
5. Conclusiones	38
6. Referencias Bibliográficas	40

Tabla de contenido

Lista de tablas

Tabla 1. Unidades de las categorías de impacto..... 17

Tabla 2. Resultados de los escenarios evaluados..... 19

Tabla 3. Balance de masa caso base..... 20

Tabla 4. Balance de masa alternativa energética 24

Tabla 5. Balance de masa alternativa buffer 26

Lista de figuras

<i>Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de ficocianina</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2. Normalización escenario base</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3. Normalización escenario energético.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4. Normalización escenario piscicultura.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5. Normalización escenario buffer</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Cambio climático de las diferentes alternativas</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7. Consumo fósil de las diferentes alternativas</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8. Consumo de agua de las diferentes alternativas</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9. Eutrofización de agua dulce en las diferentes alternativas.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 10. Eutrofización de agua marina en las diferentes alternativas.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 11. Ecotoxicidad de agua dulce y marina de las diferentes alternativas</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12. Toxicidad cancerígena humana de las diferentes alternativas.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13. Toxicidad no cancerígena de las diferentes alternativas.....</i>	<i>37</i>

Resumen

Título: Análisis de ciclo de vida del proceso fed-batch para la producción de ficocianina de grado industrial a partir de biomasa de *Photamosiphon* sp.*

Autores: Mateo Beltrán Torres, Valentina Bueno Fonseca**

Palabras clave: Cianobacterias, Impacto ambiental, Ciclo de Vida

Descripción:

Se evaluaron los impactos ambientales del proceso fed-batch para la producción de ficocianina de grado industrial a partir de biomasa de *Potamosiphon* sp, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), bajo los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14044. El estudio se estructuró en las etapas de definición de objetivos y alcance, inventario del ciclo de vida, evaluación de impactos con el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) e interpretación de resultados, considerando como unidad funcional la obtención de 1 kg de ficocianina purificada.

Los resultados evidenciaron que la electricidad utilizada en cultivo y secado constituye el principal impulsor del cambio climático y el consumo de recursos fósiles, mientras que los nutrientes del medio BG-11 representan la mayor contribución a la eutrofización y a la toxicidad. El escenario con suministro eléctrico renovable redujo hasta en un 68 % el potencial de calentamiento global y más del 90 % la dependencia de recursos fósiles. Asimismo, la sustitución parcial del medio por agua de piscicultura disminuyó en 47 % la eutrofización marina y en 8 % el consumo de agua. Finalmente, la optimización del tampón de extracción redujo hasta en un 70 % los impactos de toxicidad asociados a los insumos químicos.

En conclusión, se identificó que la descarbonización energética, la integración de corrientes secundarias y la reducción de reactivos críticos son las estrategias más efectivas para disminuir la carga ambiental del proceso, sin comprometer la productividad ni la calidad del pigmento.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector Jefferson Eduardo Contreras Restrepo.

Abstract

Title: Life Cycle Assessment of the Fed-Batch Process for the Production of Industrial-Grade Phycocyanin from *Photamosiphon* sp. Biomass

Authors: Mateo Beltrán Torres, Valentina Bueno Fonseca

Keywords: Cyanobacteria, Environmental Impact, Life Cycle

Description:

The environmental impacts of the fed-batch process for the production of industrial-grade phycocyanin from *Potamosiphon* sp. biomass were evaluated using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, following the guidelines established in ISO 14040 and ISO 14044 standards. The study was structured into the phases of goal and scope definition, life cycle inventory, impact assessment using the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method, and interpretation of results, considering the production of 1 kg of purified phycocyanin as the functional unit.

The results showed that the electricity used during cultivation and drying is the main driver of climate change and fossil resource consumption, while the nutrients in the BG-11 medium contribute most significantly to eutrophication and toxicity impacts. The scenario using renewable electricity reduced the global warming potential by up to 68% and decreased dependence on fossil resources by more than 90%. Likewise, the partial replacement of the culture medium with aquaculture wastewater reduced marine eutrophication by 47% and water consumption by 8%. Finally, the optimization of the extraction buffer reduced toxicity-related impacts associated with chemical inputs by up to 70%.

In conclusion, energy decarbonization, the integration of secondary streams, and the reduction of critical reagents were identified as the most effective strategies for decreasing the environmental burden of the process without compromising pigment productivity or quality.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector Jefferson Eduardo Contreras Restrepo.

Introducción

En la actualidad, la producción industrial de Ficocianinas (pigmentos de alto valor con aplicaciones en alimentos, cosméticos y farmacéutica) ha experimentado un gran auge aunque enfrenta un desafío clave: la falta de investigaciones ambientales integrales que cuantifiquen el impacto de su obtención desde el cultivo hasta la purificación.

El proceso fed-batch de *Potamosiphon* sp, que es prometedor por su gran rendimiento y la posibilidad de cultivo controlado en biorreactores, carece de un análisis de ciclo de vida (ACV) que permita identificar los impactos ambientales (cambio climático, eutrofización, ecotoxicidad humana, consumo energético y generación de residuos y efluentes) y así orientar hacia estrategias de mejora. Esta carencia no solo dificulta la identificación de los puntos de mayor carga ambiental, sino que también la adopción de prácticas sostenibles, el cumplimiento de normativas ambientales y la competitividad frente a procesos alternativos basados en otras microalgas o residuos agroindustriales.

De este modo, surge la siguiente pregunta de investigación, ¿De qué manera el proceso fed-batch de *Potamosiphon* sp, para la producción de Ficocianinas de grado industrial contribuye a los impactos ambientales clave y que escenarios de optimización basados en ACV pueden reducir significativamente dichos impactos sin comprometer la productividad ni la calidad del producto?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar los impactos ambientales del proceso Fed-Batch para la producción industrial de ficocianinas a partir de biomasa de *Potamosiphon* sp, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como base para la caracterización ambiental del sistema y el análisis comparativo de su desempeño.

1.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar el proceso de producción Fed-Batch de *Potamosiphon* sp. para la obtención de ficocianinas, incluyendo parámetros operacionales, consumo de recursos y generación de residuos, con base en datos experimentales y literatura especializada.
2. Realizar el inventario del ciclo de vida (ICV) del proceso, recopilando información cuantitativa sobre entradas (materias primas, energía, agua) y salidas (emisiones, efluentes, residuos) conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044.
3. Aplicar la evaluación de impacto ambiental utilizando el método ReCiPe, para cuantificar las cargas ambientales en categorías como cambio climático, eutrofización, toxicidad humana y uso de recursos.
4. Interpretar los resultados del ACV para identificar los procesos críticos y proponer estrategias de optimización, enfocadas en la reducción de impactos ambientales y mejora de la eficiencia del proceso.

2. Estado del Arte

La creciente demanda de pigmentos naturales ha posicionado a las ficocianinas como alternativas prometedoras frente a los colorantes sintéticos, impulsando el desarrollo de procesos

biotecnológicos que disminuyan los impactos ambientales en su producción sin afectar su eficiencia.

La optimización de procesos fed-batch para microorganismos productores de metabolitos de gran valor ha experimentado avances significativos en las últimas décadas. Los primeros estudios se hicieron principalmente en sistemas modelo como *Escherichia coli*, en la que se demostró que el uso de estrategias de alimentación exponencial logra incrementar el rendimiento de biomasa hasta 7 veces en comparación con cultivos en lote (Moreno-cid, JA., 2021).

El contexto colombiano ha aportado al desarrollo en el estudio de cianobacterias termófilas autóctonas. La investigación realizada en la Universidad Industrial de Santander ha caracterizado la cepa *Potamosiphon* sp. UFPS003, aislada de fuentes termales cercanas a Cúcuta, y ha determinado que bajo iluminación rojo-azul 3:1, con $283 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y con un fotoperiodo de 17,8 h alcanza concentraciones de ficocianina-C bastante competitivas para el uso industrial (Contreras, J., 2024).

Las aplicaciones de metodologías de ACV en procesos biotecnológicos han ido evolucionando, desde evaluaciones simplificadas hasta análisis comprehensivos que incluyen el impacto ambiental. Los estudios que se realizaron internacionalmente establecieron el método ReCiPe como estándar para la evaluación de bioprocesos, pues permite cuantificar los impactos en categorías como cambio climático, eutrofización, toxicidad humana y depleción de recursos fósiles. Esto ha motivado el desarrollo e implementación de estrategias de intensificación de procesos y economía circular, lo que ha promovido a la recirculación de medios de cultivo y también ha aumentado el valor de la biomasa residual.

A nivel internacional (Bentner et al., 2011) realizaron un ACV del cultivo de *spirulina plantesis* en sistemas abiertos y cerrados, encontrando que, aunque los fotobiorreactores cerrados ofrecen un mayor control sobre las condiciones de cultivo, lo que reduce su variabilidad, su huella de carbono es alta debido al elevado consumo de energía para iluminación y control térmico. Además, identificaron una disminución en el Gobl Warming Potential (GWP100) con el uso de energías renovables como lo es la fotovoltaica.

Por otro lado (Clarens et al., 2010) realizaron una compararon diversas rutas de producción de biodiesel a partir de microalgas en su ACV, usando el método ReCiPe para cuantificar factores como la eutrofización y el uso de recursos. Esta investigación difiere en el foco pues, aunque no se estudió específicamente el fed-batch, si se destacó que el uso de fuentes renovables para la iluminación y temperatura en fotobiorreactores lograría recortar el GWP sin alterar la productividad de los lípidos, esta investigación es totalmente aplicable al proceso de extracción de ficocianina en el que el control energético es crítico.

Los avances científicos tanto nacionales como internacionales han establecido bases sólidas para el desarrollo de nuevas tecnologías que sean industrialmente viables, sin embargo, hay una amplia investigación emergente en la integración sistemática de criterios ambientales mediante metodologías ACV. Hasta la fecha no existe un estudio de ACV que contenga la evaluación detallada de insumos y extracción de ficocianina de grado industrial a partir de *Potamosiphon* sp. bajo un esquema fed-batch. El aporte de este trabajo se basa en integrar un estudio completo incorporando datos primarios de laboratorio y modelado para generar recomendaciones de sostenibilidad con rigor científico.

3. Metodología

Este estudio adopta un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de tipo atribucional, conforme a los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14044. El objetivo es cuantificar las cargas ambientales asociadas a la producción de 1 kg de ficocianina (C-PC) purificada, obtenida mediante cultivo Fed-Batch de *Potamosiphon* sp, utilizando como base de referencia datos experimentales a escala laboratorio y simulación de planta a escala 25,1 m³.

El análisis se estructura en cuatro fases: definición de objetivos y alcance, construcción del inventario (ICV), evaluación de impactos (LCIA) e interpretación de resultados.

3.1 Definición del alcance del sistema

3.1.1 Unidad funcional

Se define como unidad funcional la producción de 1 kilogramo de ficocianina purificada de grado industrial, considerada en su presentación final post-extracción y purificación. Esta unidad permite estandarizar la comparación de flujos de entrada/salida en cada etapa del sistema.

3.1.2 Límites del sistema

El sistema incluye todas las etapas del proceso productivo:

- Preparación del inóculo y medio BG11. (NaNO₃, Na₃PO₄, MgSO₄, CaCl₂, Citric acid, Iron(III) chloride sol. 14% Fe, EDTA, Na₂CO₃)
- Cultivo Fed-Batch de *Potamosiphon* sp. en biorreactor de 1 m³.
- Cosecha de biomasa por centrifugación.
- Ruptura celular (homogeneizador con perlas de vidrio).
- Extracción y purificación (precipitación con sulfato de amonio).

- Liofilización y envasado.

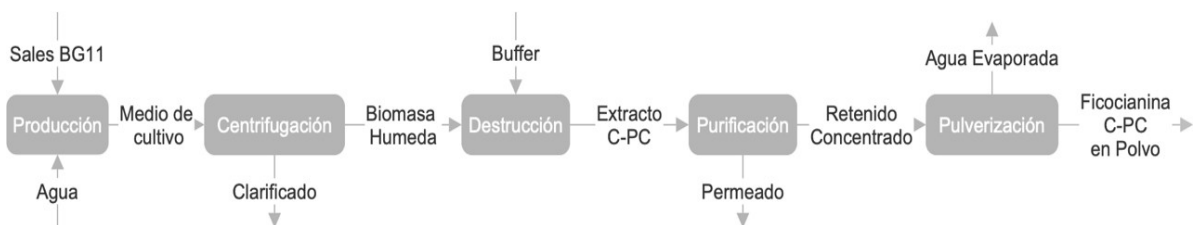
No se consideran en los límites del sistema: el transporte de insumos, la fabricación de equipos, las etapas de uso o disposición del producto final, ni servicios auxiliares administrativos.

3.2 Balance del sistema

Se representarán todas las corrientes principales de entrada y salida, desde la preparación del medio de cultivo BG-11 hasta la obtención del producto final en polvo, pasando por las etapas de cultivo, centrifugación, destrucción celular, purificación y liofilización. La Figura 1 muestra el diagrama de bloques que resume estas etapas y los flujos asociados, constituyendo la base para verificar la consistencia de los datos experimentales y para introducir las modificaciones planteadas en cada una de las alternativas evaluadas.

Figura 1.

Diagrama de bloques del proceso de producción de ficocianina



En la etapa de producción se prepara el medio de cultivo a partir de agua y sales minerales correspondientes al medio BG-11, obteniéndose una corriente homogénea que alimenta la etapa de centrifugación. En esta operación se separa el medio en un clarificado, considerado como corriente residual, y una biomasa húmeda que continúa hacia el proceso de extracción.

Posteriormente, la biomasa húmeda se somete a destrucción celular mediante su mezcla con un tampón fosfato, generándose un extracto crudo que contiene la ficocianina (C-PC) en solución. Este extracto es alimentado a la etapa de purificación donde se obtiene un retenido concentrado que contiene el pigmento de interés y un permeado que se registra como corriente de desecho.

Finalmente, el retenido concentrado se somete a un proceso de pulverización o liofilización para la remoción de agua, obteniéndose ficocianina C-PC en polvo como producto final. Las pequeñas diferencias observadas en los cierres de masa se atribuyen a redondeos y a la presencia de humedad residual en el producto seco, considerándose aceptables dentro del análisis global.

3.3 Optimización del proceso

Se plantean tres escenarios de mejora centrados en palancas tecnológicas con evidencia de alto impacto en ACV de microalgas y *Spirulina*/*Arthrospira* para C-PC: (i) suministro eléctrico, (ii) formulación del medio, y (iii) eficiencia de la etapa de extracción/purificación. Esta selección no es arbitraria: múltiples ACV reportan que (a) cultivo y secado suelen dominar el GWP y el uso de recursos fósiles, (b) la formulación del medio (nitratos/fosfatos) explica cargas relevantes en eutrofización/toxicidad, y (c) la intensidad energética del downstream (ruptura/extracción/secado) condiciona gran parte del perfil ambiental del pigmento (Badan et al., 2024; Deprá et al., 2020; Porcelli et al., 2020). Por tanto, se establecen los siguientes escenarios de mejora: la fuente energética (mezcla convencional vs. renovable), la composición del medio de cultivo (BG11 vs. medio alternativo), y la eficiencia del proceso de extracción. Esto permitirá evaluar la respuesta ambiental del sistema ante posibles mejoras tecnológicas o decisiones estratégicas.

Cada una de las etapas (cultivo Fed-Batch con medio BG-11, centrifugación, ruptura celular con bead-mill , purificación y finalmente liofilización) se configurará como un proceso independiente. En cada proceso se parametrizarán los insumos y se verificarán los balances, de modo que la suma de los flujos represente de forma fiel el comportamiento del sistema a escala del biorreactor.

En la Alternativa 1 (energética) se cambiará la fuente de electricidad utilizada en las etapas de cultivo y secado, sustituyendo la electricidad de red convencional por un flujo de electricidad renovable disponible en la base de datos. Para ello, se modificará en el software el proveedor de electricidad de las fases más calientes, de modo que refleje un escenario alimentado por energías limpias.

Con base en este ajuste, se analizará el impacto ambiental del sistema bajo la nueva matriz energética, considerando que las demás variables permanecerán constantes. El análisis permitirá identificar en qué medida se reducirá la contribución al cambio climático y al uso de recursos fósiles, al mantener iguales las cantidades de energía consumida, pero cambiar el factor de emisión asociado.

En la Alternativa 2 (medio de cultivo) se sustituirá el agua de red y parte de las sales del medio BG-11 por un flujo equivalente de efluente de piscicultura, previamente caracterizado en términos de nitrógeno y fósforo. Este cambio se implementará en el software creando un flujo de producto denominado “efluente de piscicultura (pretratado)” que reemplazará el agua de red en el proceso de cultivo. (Zuorro et al., 2023). Con el fin de ajustar los nutrientes, se calculará el aporte de N y P presentes en el efluente y se reducirá la adición de sales vírgenes (NaNO_3 y Na_3PO_4) en la cantidad correspondiente. Dicho ajuste se realizará aplicando balances estequiométricos, de manera que se garantice la misma concentración de nutrientes requerida por el cultivo. Una vez hecho este cambio, se analizan las cargas ambientales, especialmente en las categorías de eutrofización y toxicidad, debido a la reducción en el uso de fertilizantes químicos.

En la Alternativa 3 (reducción de tampón) se modificará la etapa de extracción y purificación al incrementar la concentración de biomasa en el tampón fosfato. Para ello, se reducirá el volumen de buffer utilizado de 0.196 m³ a 0.075 m³ por kilogramo de ficocianina, manteniendo la misma cantidad de biomasa tratada (Barajas-Solano, 2022). Este ajuste se implementará en el software modificando el flujo de entrada del tampón fosfato, lo que a su vez reducirá automáticamente las cantidades de sales que lo componen (MAP y DAP) y de agua asociada.

Asimismo, se reducirá de manera proporcional el consumo de energía en bead-mill, ultrafiltración/diálisis y liofilización, aplicando relaciones de escalamiento con base en el volumen tratado. Posteriormente, se llevará a cabo el análisis de impactos para determinar cómo esta reducción de volumen y energía influirá en el cambio climático, en el consumo de agua y en las toxicidades asociadas al uso de químicos.

En todos los escenarios se aplicará un control de calidad metodológico que consistirá en:

1. Revisión de balances de masa y energía para verificar cierres menores al 5%.
2. Consistencia de proveedores en la base de datos (uso de flujos de producto en lugar de elementary flows).
3. Aplicación uniforme del método ReCiPe 2016 Midpoint (H), con la misma unidad funcional y límites de sistema.

4. Análisis de sensibilidad para cada alternativa, en el cual se evaluarán cambios en los factores más inciertos (ej. concentración de nutrientes en el efluente, porcentaje de reducción de tampón, factor de emisión de la electricidad renovable).

La interpretación se centrará en identificar los “hotspots” del sistema, es decir, las etapas con mayor contribución al impacto total. Con base en estos resultados, se propondrán estrategias de optimización técnica, tales como la reducción de insumos críticos y la recirculación de flujos internos. Finalmente, los resultados se contrastarán con estudios previos en sistemas basados en *Arthrospira* y otras cianobacterias pigmentogénicas.

3.4 Inventario del ciclo de vida (ICV)

Esta etapa implica la recopilación sistemática de datos cuantitativos sobre las entradas y salidas de materia y energía que intervienen en el proceso Fed-Batch para la obtención de ficocianina (C-PC) a partir de biomasa de *Potamosiphon sp.* Para ello, se emplearán datos primarios recolectados en condiciones experimentales controladas, los cuales incluyen el consumo energético (en kWh) asociado a las operaciones de agitación, iluminación, aireación y funcionamiento de los equipos utilizados en las fases de extracción y purificación. Asimismo, se documentará el uso específico de insumos químicos como nitratos, fosfatos, carbonatos, sulfato de amonio, soluciones tampón (buffer fosfato ph 6.8 , Molaridad 0,05M , MAP 0,812 kg, DAP 0,362 kg) . De igual manera, se cuantificará el volumen de agua de proceso requerido por kilogramo de ficocianina purificada, así como las emisiones estimadas durante la fase de cultivo, tales como pérdidas de nutrientes disueltos. Finalmente, se registrarán los rendimientos obtenidos tanto en términos de producción de biomasa (kg/m^3) como de concentración de C-PC (mg/g biomasa seca), a fin de establecer los coeficientes técnicos del sistema.

Complementariamente, se utilizarán datos secundarios provenientes de la base de datos Ecoinvent v3.10, importada al software openLCA. 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.

3.5 Evaluación del impacto ambiental (LCIA)

Se utilizará el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) bajo el enfoque jerárquico, por ser robusto y ampliamente validado para procesos biotecnológicos.

Las categorías consideradas se reflejan en la Tabla 1:

Tabla 1.

Unidades de las categorías de impacto

CATEGORIA IMPACTO	UNIDAD
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq
Fossil resource scarcity	kg oil eq
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Freshwater eutrophication	kg P eq
Gobal Warming	kg CO2 eq
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB
Ionizing Radiation	kBq C0-60 eq
Land use	m ² a crop eq
Marine Ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Marine Eutrophication	kg N eq
Mineral Resource scarcity	Kg Cu eq
Ozone formation, Human health	Kg NOx eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	Kg NOx eq

Stratospheric Ozone depletion	Kg CFC11 eq
Terrestrial Acidification	kg SO2 eq
Terrestrial Ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Water Consumption	m3

No se aplicará ponderación cualitativa; los resultados se expresarán en valores absolutos y porcentuales para facilitar la identificación de contribuciones significativas por etapa.

3.6 Interpretación de resultados

Con el propósito de interpretar de manera consistente los resultados de la evaluación de impactos ambientales y facilitar la comparación entre categorías expresadas en diferentes unidades físicas y órdenes de magnitud, se aplicó la etapa de normalización incluida en el método ReCiPe 2016 Midpoint (H), utilizando el conjunto *World 2010 (H)* implementado en el software openLCA.

La normalización en ReCiPe se fundamenta en la comparación del impacto caracterizado del sistema bajo estudio con una referencia de impacto ambiental anual per cápita a escala global, estimada para el año base 2010. Matemáticamente, el impacto normalizado para cada categoría se expresa como:

$$I_{norm,i} = \frac{I_{char,i}}{I_{ref,i}} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde $I_{char,i}$ corresponde al impacto caracterizado del sistema en la categoría i y $I_{ref,i}$ representa el impacto ambiental anual promedio de una persona a nivel mundial para la misma categoría. Como resultado, los valores normalizados reflejan la contribución relativa del sistema evaluado frente a una carga ambiental global de referencia, permitiendo identificar de forma directa las categorías de mayor relevancia ambiental.

Aunque la normalización es considerada una etapa opcional según la norma ISO 14044, su aplicación resulta especialmente pertinente en estudios comparativos y análisis de sensibilidad, como el presente, dado que evita interpretaciones erróneas asociadas a la comparación directa de impactos caracterizados en unidades heterogéneas (por ejemplo, kg CO₂ eq frente a kg 1,4-DCB eq). En este trabajo, la normalización se emplea exclusivamente con fines interpretativos y de priorización, sin aplicar ponderación cualitativa de categorías.

4. Resultados

4.1 Resultados de las categorías de impacto

4.1.1 Resultados de impacto ambiental: caso base

A partir del balance de masa del caso base se construyó el inventario del ciclo de vida, el cual fue evaluado mediante el método ReCiPe. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para las 18 categorías de impacto consideradas por el software, que constituyen la referencia para la comparación con las alternativas planteadas.

Tabla 2.
Resultados de los escenarios evaluados

CATEGORIA IMPACTO	CASO BASE	ALT 1	ALT 2	ALT 1
Fine particulate matter formation	1.10523	0.32756	1.08947	0.42397
Fossil resource scarcity	1393.38339	64.84853	1389.66155	535.53551
Freshwater ecotoxicity	191.48575	141.56175	190.7059	73.59134
Freshwater eutrophication	0.17944	0.67968	0.16447	0.06885
Gobal Warming	3920.51949	441.83187	3894.5467	1506.60546
Human carcinogenic toxicity	154.216	114.99158	151.30996	59.24522
Human non-carcinogenic toxicity	1016.58137	2849.804	998.14522	390.38125
Ionizing Radiation	-4.80824	-5.95207	-4.15875	-1.84829

Land use	320.4198	-9.13487	318.57741	123.12726
Marine Ecotoxicity	272.71597	202.13424	271.28735	104.77507
Marine Eutrophication	0.01576	0.05115	0.01557	0.00605
Mineral Resource scarcity	5.06457	2.97531	5.04329	1.9462
Ozone formation, Human health	4.22433	0.51617	4.20836	1.62292
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	4.76143	0.50851	4.74453	1.82946
Stratospheric Ozone depletion	0.00344	0.00513	0.00315	0.00132
Terrestrial Acidification	2.78139	0.84901	2.73821	1.06681
Terrestrial Ecotoxicity	3.75E+04	1.65E+04	3.70E+04	1.44E+04
Water Consumption	57.67088	227.99177	32.1172	22.09735

Con el fin de contextualizar los resultados ambientales, a continuación, se presenta en la Tabla 3 el balance de masa del caso base, el cual permitió cuantificar de manera consistente las corrientes de entrada y salida del proceso y asegurar la coherencia del inventario empleado en la evaluación ambiental.

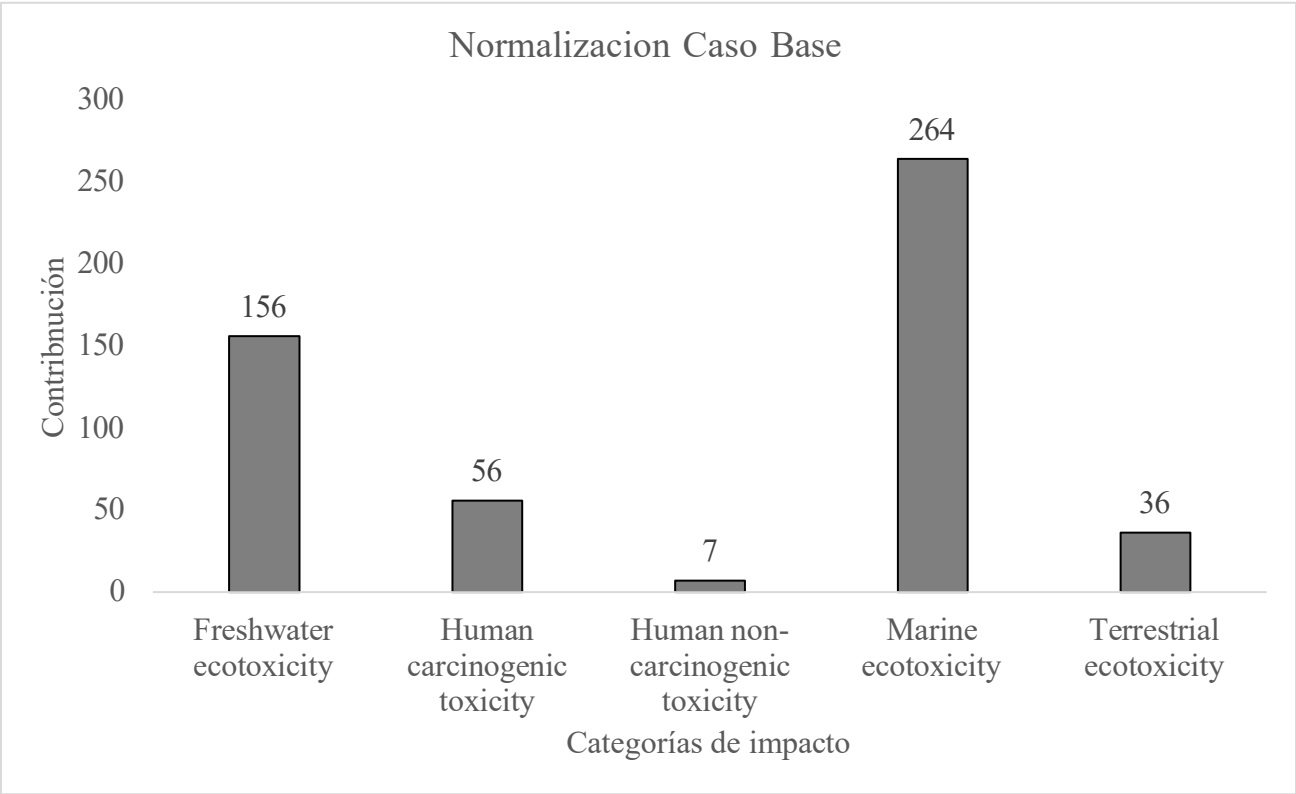
Tabla 3.

Balance de masa caso base

Etapas	Entradas	Cantidad	Unidad	Salidas	Cantidad	Unidad
Producción	Sales BG11	41.13022	Kg	Medio de Cultivo	25141.1302	Kg
	Agua	25100	Kg			
Centrifugación	Medio de Cultivo	25141.13022	Kg	Clarificado	25043.33	Kg
				Biomasa Húmeda	97.8	Kg
Destrucción	Biomasa Húmeda	97.8	Kg	Extracto C-PC	294.974	Kg
	Buffer	197.174	Kg			
Purificación	Extracto C-PC	294.974	Kg	Retenido	92	Kg
				Concentrado	202.97	Kg
Pulverización	Retenido Concentrado	92	Kg	Permeado	90.9	Kg
				Agua Evaporada	1	Kg
				Ficocianina C-PC en polvo		

Los resultados del caso base fueron posteriormente normalizados con el objetivo de identificar las categorías de impacto con mayor contribución relativa. La normalización facilita la comparación entre categorías y permite reconocer los principales focos ambientales del proceso en su configuración base, los cuales se reflejan en la Figura 2.

Figura 2.
Normalización escenario base



La ecotoxicidad marina constituye la categoría de impacto dominante, con un valor normalizado de 264, seguida por la ecotoxicidad en agua dulce y las categorías de toxicidad humana. Este patrón indica que el perfil ambiental del proceso de producción de ficocianina está fuertemente condicionado por la carga tóxica asociada a los insumos químicos, particularmente las sales minerales del medio BG-11 y los fosfatos utilizados en la etapa de extracción.

Desde una perspectiva de ACV, estos resultados sugieren que las emisiones y cargas ambientales asociadas a la producción, procesamiento y disposición de dichos insumos superan, en términos relativos globales, las contribuciones del proceso a categorías como el cambio climático o el uso de recursos energéticos. Esto es coherente con estudios previos que señalan que los fertilizantes y reactivos fosfatados arrastran impactos significativos en toxicidad y ecotoxicidad debido a la presencia de metales traza y a procesos extractivos intensivos (Huang et al., 2017; Suciu et al., 2022).

En consecuencia, el caso base permite identificar un *hotspot* claramente definido en la formulación del medio de cultivo y el downstream químico, lo cual orienta de manera directa las estrategias de mejora planteadas.

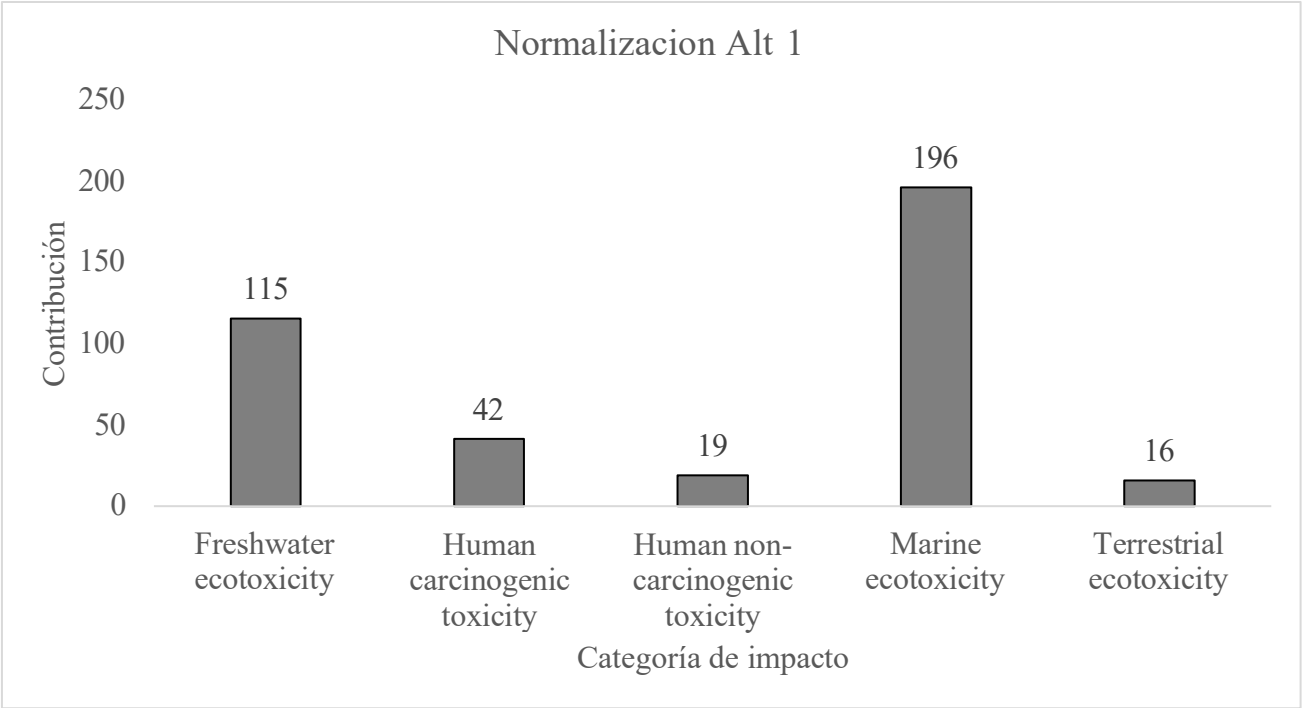
4.1.2 Resultados y balance de masa de la Alternativa 1 (energía renovable)

La Alternativa 1 se basa en la modificación de la matriz energética empleada en el proceso, manteniendo constantes las condiciones operativas y las corrientes materiales definidas en el caso base. En este escenario, la estructura del proceso y los balances de masa permanecen inalterados, lo que garantiza la coherencia del inventario material y la comparabilidad directa de los resultados entre escenarios.

El efecto de esta alternativa se refleja exclusivamente en la representación del consumo eléctrico dentro del inventario del ciclo de vida, mediante la asignación de factores de emisión correspondientes a una fuente de energía renovable. De este modo, aunque las demandas energéticas del sistema conservan la misma magnitud, su impacto ambiental se ve modificado en los resultados obtenidos con el método ReCiPe. Esta aproximación permite evaluar el efecto de la descarbonización del suministro eléctrico sobre el desempeño ambiental global del proceso, sin

introducir variaciones en su comportamiento material. A continuación, la Figura 3 refleja los resultados obtenidos de la normalización para la alternativa 1

Figura 3.
Normalización escenario energético



Se observa una reducción sustancial de los impactos asociados al cambio climático y al uso de recursos fósiles (de 1.4 a 0.06). Sin embargo, el valor normalizado de ecotoxicidad marina (196) continúa siendo el más elevado del sistema, manteniéndose como la categoría dominante.

Este comportamiento pone de manifiesto que la descarbonización energética, aunque altamente efectiva para mitigar impactos climáticos, no altera de manera significativa las cargas ambientales asociadas a los insumos químicos del proceso. Este resultado confirma que las categorías de toxicidad presentan una baja elasticidad frente a cambios en la matriz energética cuando la masa y composición de reactivos permanecen constantes.

Adicionalmente, se observa que algunas categorías de toxicidad humana pueden experimentar variaciones moderadas debido a la relocalización de impactos hacia la infraestructura asociada a tecnologías renovables, fenómeno ampliamente documentado en estudios de ACV de sistemas fotovoltaicos y eólicos. Este efecto no invalida la mejora climática, pero sí refuerza la necesidad de evaluar las estrategias de mitigación de manera multicriterio.

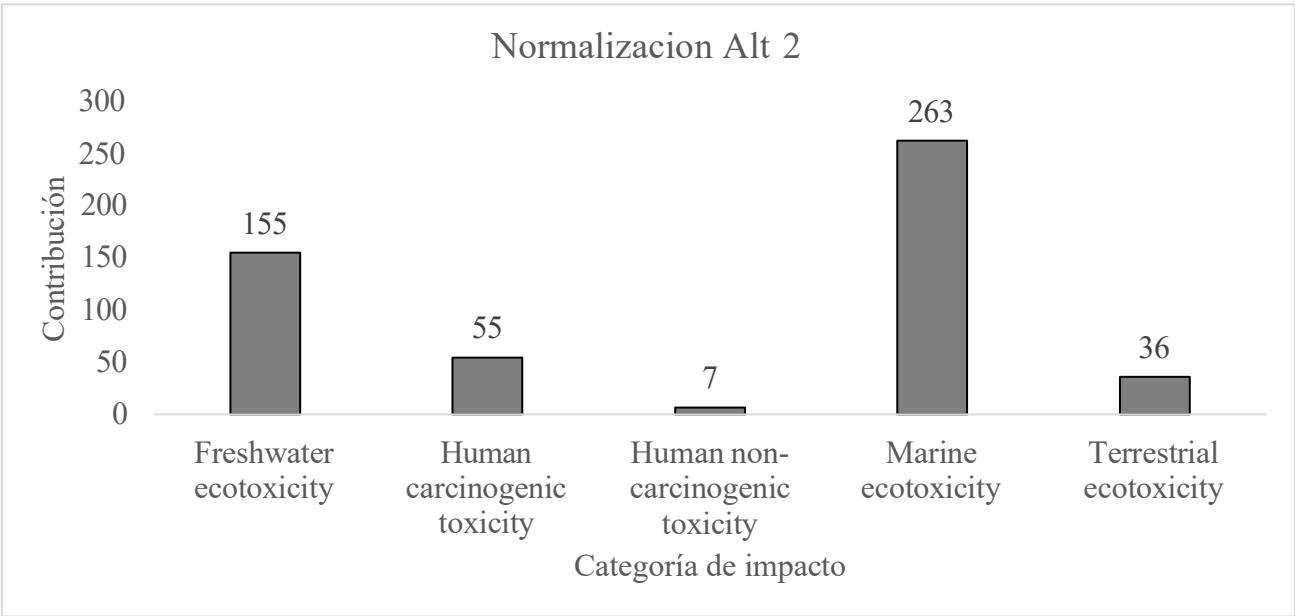
4.1.3 Resultados y balance de masa de la Alternativa 2 (uso de agua residual de piscicultura) La Alternativa 2 incorpora el uso de agua residual de piscicultura como fuente parcial de nutrientes, lo que conlleva modificaciones en la formulación del medio de cultivo y, por tanto, en el balance de masa de la etapa de producción. Las etapas posteriores conservan las magnitudes del caso base al mantenerse el rendimiento del proceso. Los flujos alterados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.
Balance de masa alternativa energética

Etapas	Entradas	Cantidad	Unidad	Salidas	Cantidad	Unidad
Producción	Sales BG11	34.37602	Kg	Medio de Cultivo	25134.376	Kg
	Agua	25100	Kg			
Centrifugacion	Medio de	25134.37602	Kg	Clarificado	25036.576	Kg
	Cultivo			Biomasa Humeda	97.8	Kg

La normalización de los impactos ambientales de la Alternativa 2 permite analizar los efectos de la sustitución de insumos vírgenes por nutrientes contenidos en el efluente, particularmente en aquellas categorías asociadas a eutrofización y toxicidad como se muestra en la Figura 4.

Figura 4.
Normalización escenario piscicultura



La alternativa 2, basada en el uso de efluente de piscicultura como fuente parcial de nutrientes, presenta un valor normalizado de ecotoxicidad marina de 263, muy cercano al caso base. Este resultado indica que, aunque se logra una reducción efectiva en las categorías de eutrofización (de 0.28 a 0.25 para agua dulce y 0.34 a 0.33 para eutrofización marina), la carga tóxica global del sistema no se ve sustancialmente modificada.

La reducción observada en la eutrofización marina y de agua dulce se explica por la disminución en el uso de fertilizantes sintéticos, particularmente compuestos nitrogenados y fosfatados, cuyo ciclo de vida está directamente asociado a emisiones eutrofizantes. Sin embargo, dado que la masa total de sales minerales del proceso no se elimina por completo, las categorías de toxicidad mantienen valores elevados.

Desde una perspectiva de sensibilidad, esta alternativa demuestra que la gestión de nutrientes es una palanca específica para impactos por eutrofización, pero presenta un alcance limitado sobre

toxicidad cuando no se acompaña de una reducción significativa en el consumo de reactivos críticos.

4.1.4 Resultados y balance de masa de la Alternativa 3 (extracción intensificada)

En la Alternativa 3 se evaluó una estrategia de intensificación del proceso mediante la reducción del volumen de tampón en la etapa de destrucción celular, lo cual modifica el balance de masa a partir de dicha etapa y reduce el volumen de corrientes líquidas tratadas en las operaciones posteriores, los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 5.

Tabla 5.
Balance de masa alternativa buffer

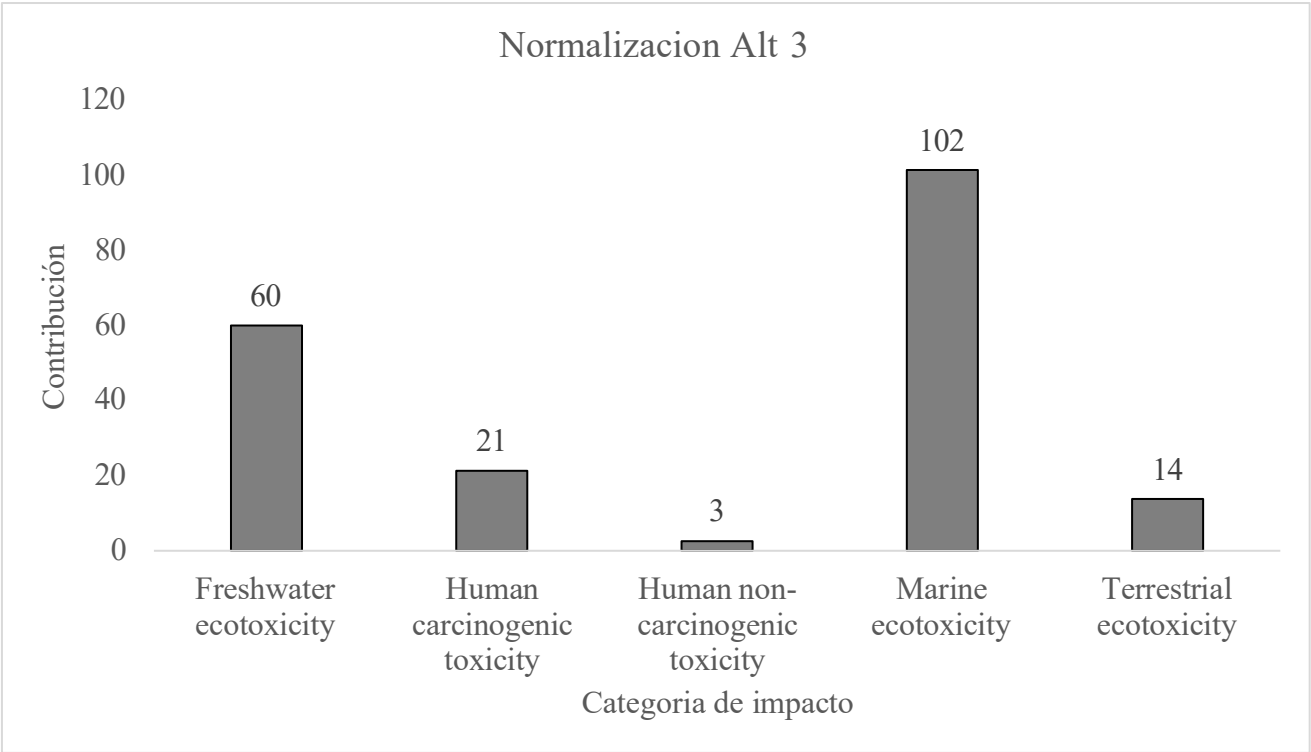
Etapa	Entradas	Cantidad	Unidad	Salidas	Cantidad	Unidad
Centrifugacion	Medio	de 25141.13022	Kg	Clarificado	25043.33	Kg
	Cultivo			Biomasa Humeda	97.8	Kg
Destruccion	Biomasa	97.8	Kg	Extracto C-PC	173.251	Kg
	Humeda					
Purificacion	Buffer	75.451	Kg			
	Extracto C-PC	173.251	Kg	Retenido	36.3	Kg
				Concentrado		
Pulverizacion				Permeado	136.951	Kg
	Retenido	36.3	Kg	Agua Evaporada	35.3	Kg
	Concentrado			Ficocianica C-PC	1	Kg
				en polvo		

Al no introducirse corrientes adicionales, la biomasa y el tampón se consideran integrados en una única corriente de salida, cuya menor carga acuosa repercute directamente en las etapas posteriores y como consecuencia en purificación se redistribuyen las corrientes de retenido y permeado para

cumplir con la conservación de la masa, reduciéndose el caudal que continúa hacia la etapa de secado. En la liofilización, esta reducción se traduce en una menor cantidad de agua evaporada, manteniéndose constante la masa del producto final. En conjunto, la alternativa permite disminuir el consumo de tampón, el volumen de corrientes líquidas y la energía asociada a su tratamiento, sin comprometer el rendimiento del proceso. La Figura 5 expone los resultados para la alternativa 3.

Figura 5.

Normalización escenario buffer



Esta presenta el mejor desempeño ambiental global entre los escenarios evaluados. El valor normalizado de ecotoxicidad marina se reduce hasta 101, lo que representa una disminución superior al 60 % respecto al caso base. Reducciones de magnitud similar se observan en las categorías de toxicidad humana, consumo de agua y uso de recursos fósiles.

Este comportamiento confirma que la optimización del downstream, mediante la reducción del volumen de tampón y la intensificación del proceso de extracción, constituye la estrategia más efectiva para mitigar los impactos ambientales dominantes del sistema. A diferencia de la alternativa energética, esta mejora actúa directamente sobre los flujos responsables de las categorías con mayor relevancia normalizada.

Esta alternativa presenta una alta robustez, ya que pequeñas variaciones en el volumen de tampón generan cambios proporcionales y predecibles en múltiples categorías de impacto, lo que la convierte en una estrategia prioritaria para el diseño sostenible del proceso.

El método ReCiPe 2016 Midpoint (H) contempla 18 categorías de impacto ambiental. Sin embargo, analizar todas las categorías con el mismo nivel de profundidad puede diluir la interpretación y dificultar la identificación de los verdaderos *hotspots* del sistema. Por esta razón, el análisis detallado se centró en seis categorías de impacto consideradas prioritarias, seleccionadas con base en los siguientes criterios técnicos:

- Dominancia en los resultados normalizados: Los resultados obtenidos muestran que categorías asociadas a toxicidad (humana y ecotoxicidad acuática), cambio climático y uso de recursos concentran los mayores valores normalizados en todos los escenarios evaluados. En contraste, categorías como radiación ionizante, agotamiento de recursos minerales, uso del suelo o agotamiento del ozono estratosférico presentan valores normalizados varios órdenes de magnitud inferiores, lo que indica una contribución marginal al perfil ambiental global del proceso.
- Consistencia con la literatura

científica: Estudios recientes de ACV aplicados a la
producción de ficocianina, Spirulina y otros

sistemas microalgales reportan de manera consistente que el consumo energético, la formulación del medio de cultivo y el uso de reactivos químicos son los principales impulsores de impacto, particularmente en las categorías de cambio climático, eutrofización, toxicidad humana y ecotoxicidad (Papadaki et al., 2017; Badan et al., 2024; Braud et al., 2025).

- Relación directa con las decisiones de diseño del proceso: Las seis categorías seleccionadas están directamente influenciadas por las alternativas de mejora evaluadas en este estudio (fuente energética, formulación del medio de cultivo y consumo de tampón en extracción), lo que permite un análisis de sensibilidad robusto y orientado a la toma de decisiones tecnológicas.

En consecuencia, las categorías priorizadas fueron:

- Cambio climático
- Eutrofización de agua dulce y marina
- Toxicidad humana (carcinogénica y no carcinogénica)
- Ecotoxicidad acuática
- Consumo de agua
- Uso de recursos fósiles

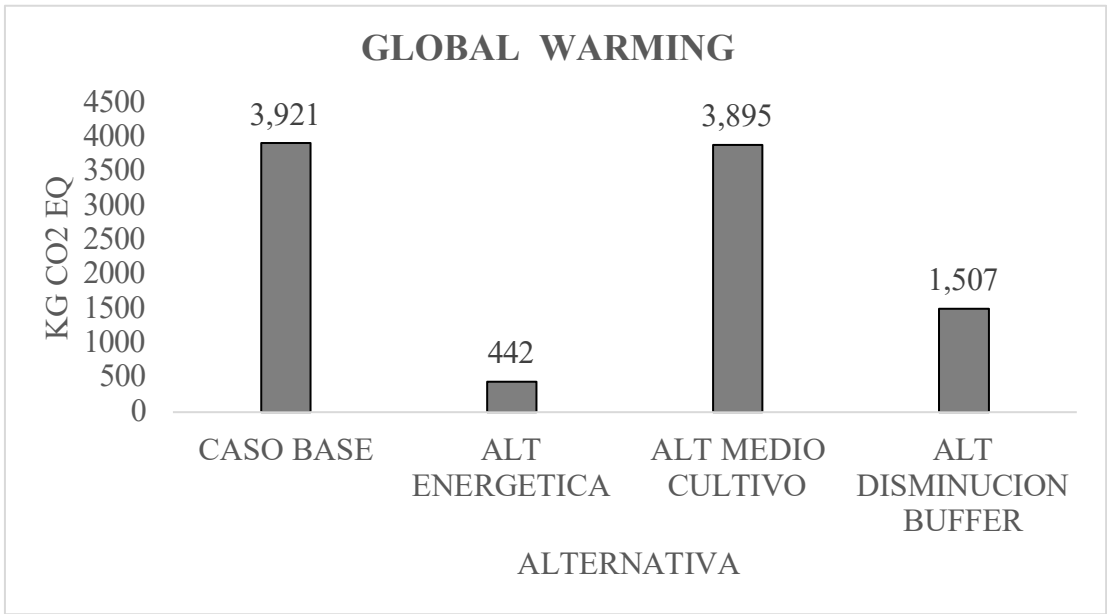
4.2 Análisis de resultados y discusión ambiental

Estas categorías permiten evaluar de manera integrada los efectos asociados al consumo energético, la gestión de nutrientes y el uso de insumos químicos a lo largo del proceso.

4.2.1 Cambio climático y uso de recursos energéticos

El balance climático y de consumo fósil del sistema, reflejado en las Figuras 6 y 7 respectivamente, está claramente gobernado por la electricidad del cultivo y del secado, por lo que actuar sobre el suministro energético ofrece el mayor apalancamiento: en el escenario con energía renovable aplicado a producción y pulverización, el GWP desciende ~68 % (1510 → 480 kg CO₂ eq) y la escasez de recursos fósiles cae >95 % (1390 → 65 kg oil eq) desplazando el hotspot fuera de la energía y confirmando que el mix convencional era el principal impulsor.

Figura 6.
Cambio climático de las diferentes alternativas



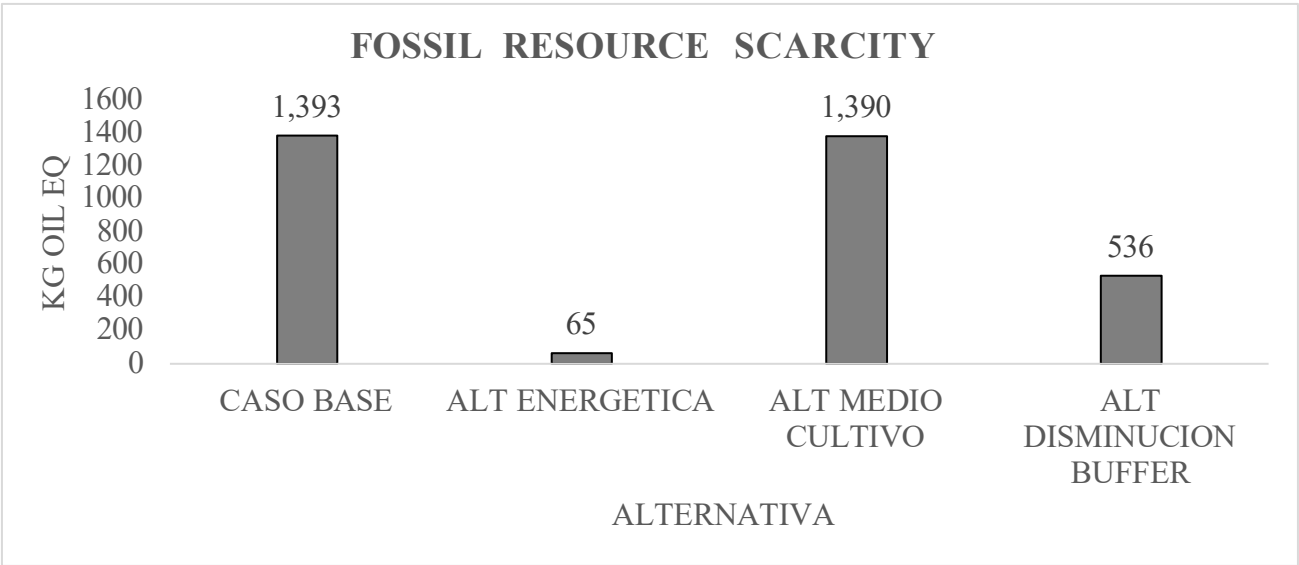
Estudios muy recientes refuerzan el mismo patrón, dichos estudios determinaron que al variar el origen de la electricidad (mezcla nacional vs. renovables) reconfigura el perfil climático de productos microalgales, con caídas profundas del GWP cuando se sustituye la implementación de la obtención de energía apartir de fósil por renovables, y con co-beneficios en categorías ligadas a calidad del aire al evitar emisiones asociadas a generación fósil (Braud et al., 2025) y con análisis

industriales de comprimidos de *Spirulina* en los que la fase intensiva en energía marca el resultado global (Ye et al., 2018).

Ahora bien, cuando no se altera la demanda eléctrica del proceso, la palanca climática permanece prácticamente intacta: cambios de medio o de corrientes de proceso que no tocan el vector energético tienden a mantener el GWP cercano al caso base, un resultado que se repite al comparar configuraciones industriales, geotermales o artesanales de *Spirulina*, donde la procedencia del sector energético explica las mayores variaciones en GEI. Por contraste, actuar “aguas arriba” sobre los insumos —por ejemplo, optimizar el tampón de extracción para reducir la carga de fosfatos y la masa de reactivos— alivia de forma marcada la presión sobre recursos fósiles (en nuestro caso, $\approx 62\%$), mientras que el alivio climático es modesto ($\approx 6\%$) si la electricidad del proceso permanece invariable; es decir, los reactivos pesan más en recursos, mientras que el clima responde con mayor sensibilidad a la energía.

Figura 7.

Consumo fósil de las diferentes alternativas



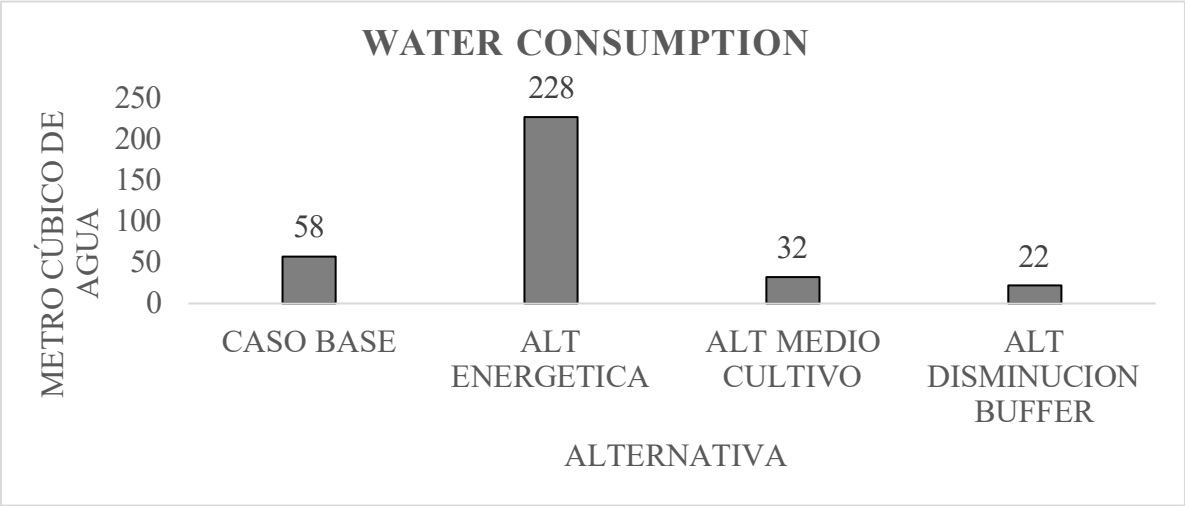
Este contraste coincide con síntesis y estudios recientes que cuantifican cómo el secado y el suministro eléctrico gobiernan el GWP en microalgas, y cómo la descarbonización del mix desplaza el hotspot fuera de la energía (Tzachor et al., 2022. & Chalermthai et al., 2024).

4.2.2 Nutrientes y gestión del agua

Las Figuras 8, 9 y 10 demuestra los impactos por nutrientes, los cuales se explican sobre todo por los fertilizantes del medio BG-11—con especial peso del fósforo en eutrofización de agua dulce y del nitrógeno en eutrofización marina—tal como se ha documentado en ACV de cultivos algales intensivos (Schneider et al., 2018) y se refleja en nuestro caso base. La métrica empleada por ReCiPe 2016 distingue P eq para eutrofización dulce y N eq para la marina, por lo que cualquier ajuste que reduzca flujos de P tenderá a aliviar la primera, mientras que las rutas de N condicionan la segunda; además, los factores de caracterización muestran sensibilidad regional, de modo que la magnitud relativa del impacto puede variar según la cuenca (actualizaciones recientes y enfoques regionalizados refuerzan esta precaución metodológica) (Bernasová et al., 2024 & Andreasi et al., 2023).

Figura 8.

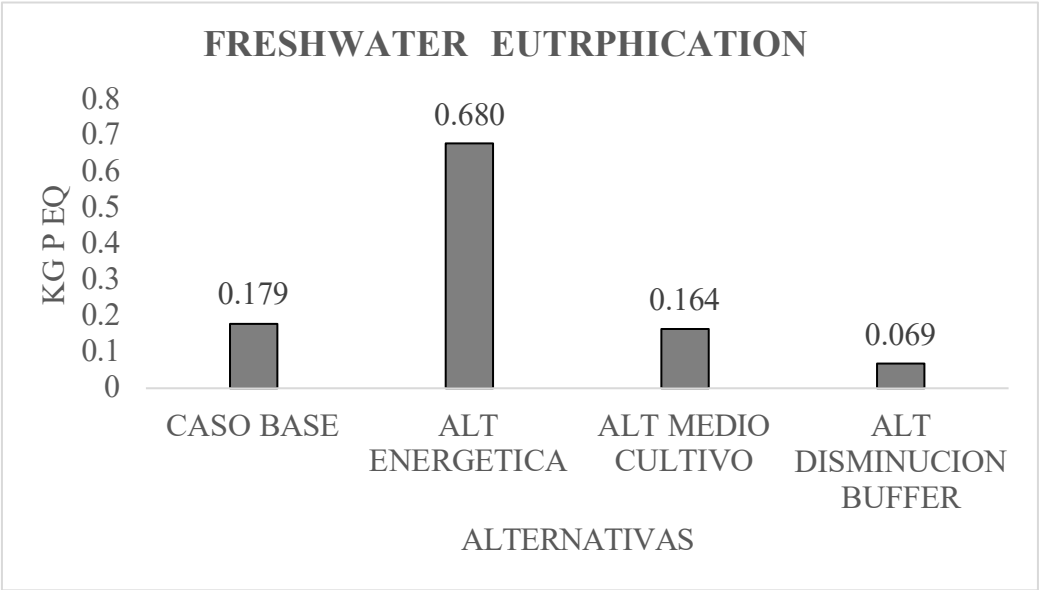
Consumo de agua de las diferentes alternativas



En consumo de agua, el valor neto depende no solo del volumen fresco incorporado, sino también de la recirculación/clarificación y de etapas de proceso con alto manejo de líquidos; varios análisis remarcan que la intensidad hídrica de sistemas autotróficos es sensible a estos balances operativos, sobre todo cuando se concentran biomasa y corrientes para minimizar lavados y enjuagues (Laurent et al., 2019; ver también evidencia reciente en bioprocesos algales) (Zhang et al., 2022).

Bajo esa lógica, el reúso parcial de agua de piscicultura—empleada como fuente de N y P—resulta la palanca más efectiva sobre nutrientes: en nuestra corrida, la eutrofización marina descende de forma marcada ($\approx 47\%$), coherente con el secuestro de nitrógeno que de otro modo presionaría cuerpos receptores; el consumo de agua también baja ($\approx 8\%$), al sustituir parte del aporte fresco por un flujo secundario.

Figura 9.
Eutrofización de agua dulce en las diferentes alternativas

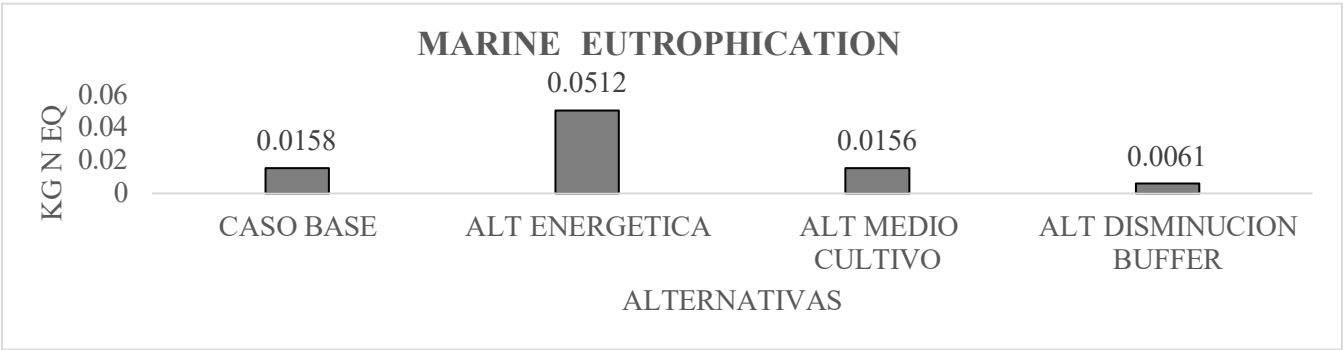


Estos patrones se han observado al integrar acuicultura–microalgas: se cierra el ciclo de nutrientes, se evita tratamiento y disposición adicionales y se reduce la fabricación de fertilizantes frescos, siempre que la asimilación sea alta y el crédito por tratamiento evitado se modele correctamente (Zuorro et al., 2023; Napolitano et al., 2022; Álvarez-González et al., 2023).

En contraste, sustituir la electricidad de red por renovables apenas modifica las eutrofizaciones si no cambian las entradas de N y P; el consumo de agua puede permanecer similar en configuraciones dominadas por recirculación interna, aunque la huella hídrica de la energía puede variar según tecnología y región, aspecto documentado en evaluaciones prospectivas de agua-energía para algas (Vasilakou et al., 2025).

Por último, optimizar el tampón de extracción reduciendo fosfatos alivia de manera directa la eutrofización dulce (en nuestro caso, $\approx 36\%$) al disminuir pérdidas de P en proceso/cadena de suministro, mientras que la eutrofización marina se mantiene cercana al valor base al no intervenir rutas de N; adicionalmente, reducir volúmenes de extracción y lavados contribuye a contener el consumo de agua cuando la intensificación disminuye enjuagues y corrientes acuosas asociadas (Schneider et al., 2018; Laurent et al., 2019).

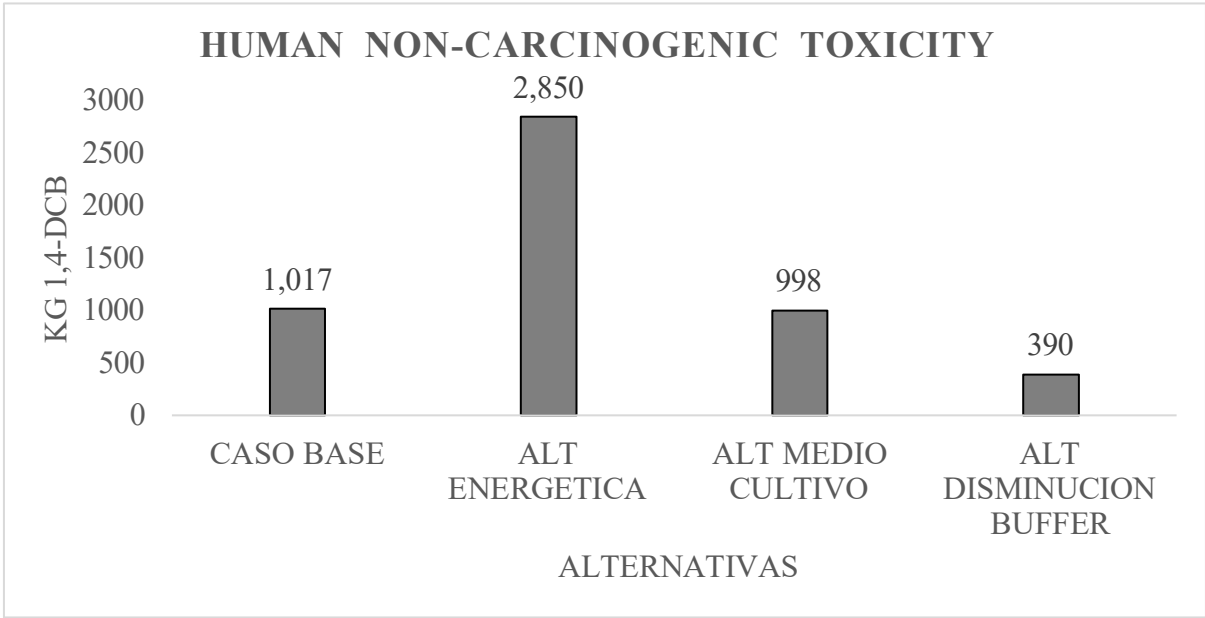
Figura 10.
Eutrofización de agua marina en las diferentes alternativas



4.2.3 Toxicidad humana y ecotoxicidad asociada a insumos químicos

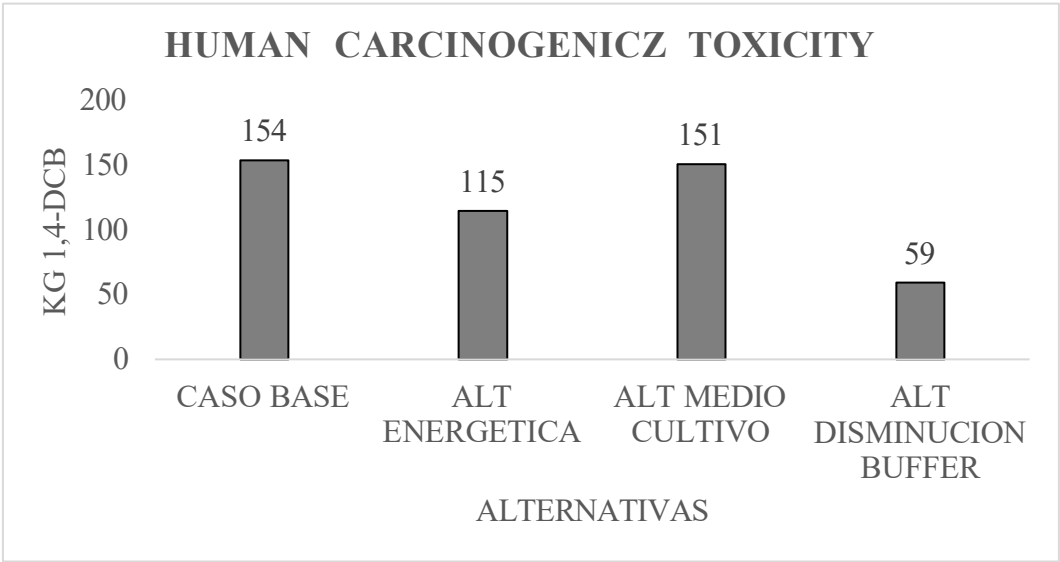
En este eje, los picos de toxicidad (humana carcinogénica y no carcinogénica) y de ecotoxicidad se explican principalmente por la síntesis y uso de reactivos minerales del proceso—sales del medio BG-11 y fosfatos del tampón de extracción—cuyas cadenas de suministro arrastran metales traza (Cd, As, Pb) y emisiones de minería/beneficio. Este patrón ya se había descrito para ficocianina/Spirulina (Badan et al., 2024; Braud et al., 2025; Ye et al., 2018; Huang et al., 2017), y se refuerza con evidencia reciente sobre cadmio en fertilizantes fosfatados y sus efectos en salud/ecosistemas: la variación en el contenido de Cd según la roca fosfática y la contribución del fertilizante a la exposición explican buena parte de las diferencias en toxicidad observadas entre lotes y proveedores, lo que justifica controles de especificación (bajo-Cd) y trazabilidad en la compra de fosfatos (Suciu et al., 2022; Tagkas et al., 2024). Los resultados de toxicidad humana y agua se presentan en las Figuras 11, 12 y 13.

Figura 11.
Toxicidad no cancerígena de las diferentes alternativas



Cuando se optimiza el tampón de extracción—reduciendo la dosis de fosfatos y elevando la relación biomasa/solvente—se alivian de forma marcada las categorías de toxicidad en nuestras corridas ($\approx 60\text{--}70\%$), en línea con la menor entrada de sales fosfatadas y, por tanto, con menos metales traza acoplados a su ciclo de vida. Esta vía “aguas arriba” puede potenciarse con tecnologías de extracción más benignas (p. ej., solventes eutécticos naturales o sistemas acuosos intensificados), que reducen el uso de solventes convencionales y acotan la peligrosidad sin penalizar rendimiento cuando se ajustan pH, fuerza iónica y selectividad (Zhuang et al., 2023)

Figura 12.
Toxicidad cancerígena humana de las diferentes alternativas

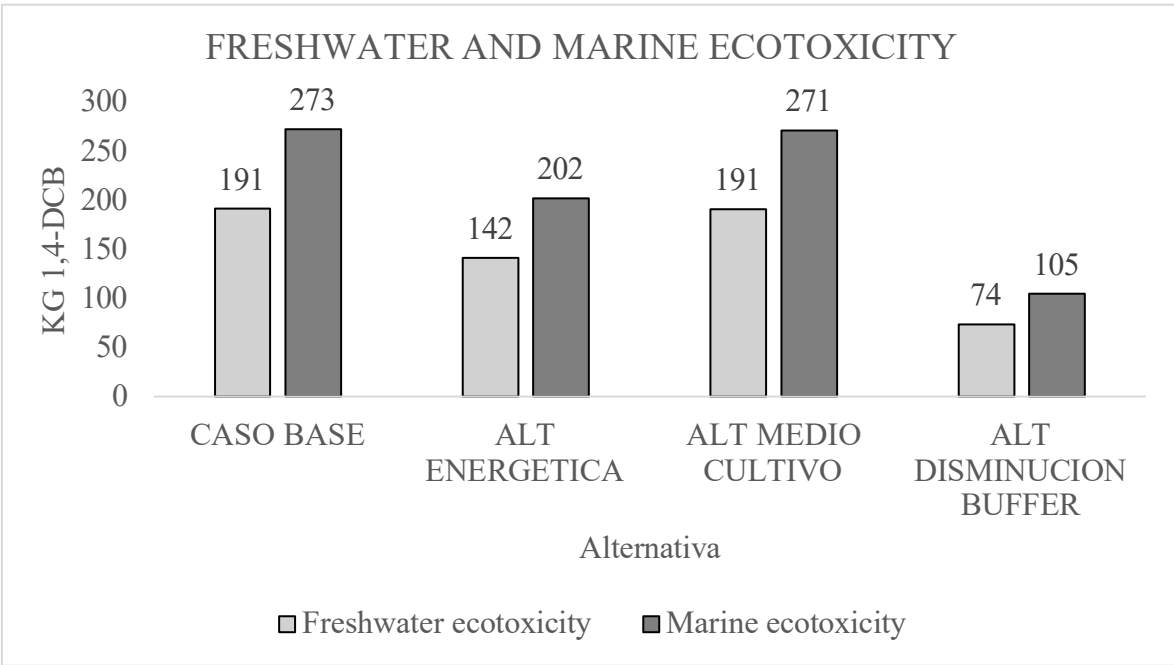


El aprovechamiento de agua de piscicultura como parte del medio tiende a ser neutro o de mejora leve en toxicidades siempre que exista pretratamiento básico y alta asimilación de nutrientes; su efecto principal se manifiesta en otros ejes del análisis, mientras la masa de reactivos minerales permanece similar. Esta neutralidad relativa en toxicidad es coherente con evaluaciones de integración acuicultura-microalgas donde la circularidad de nutrientes no altera de forma sustantiva el perfil de insumos químicos del proceso. *(Se conserva foco exclusivo en toxicidad; el*

desempeño hídrico/nutrientes se desarrolla en su apartado específico) (Badan et al., 2024; Mrotek et al., 2024).

Figura 13.

Ecotoxicidad de agua dulce y marina de las diferentes alternativas



Al modificar el suministro eléctrico hacia renovables, los indicadores de toxicidad pueden moverse en direcciones distintas: en contextos con alta participación fósil aparecen co-beneficios moderados (menores emisiones de metales y precursores), mientras que en configuraciones fotovoltaicas/eólicas pueden surgir aumentos puntuales—sobre todo en toxicidad humana no carcinogénica—por cargas de infraestructura (fabricación de módulos, baterías, balance de planta). Esta relocalización del hotspot en minería/materiales está documentada en LCA recientes de PV y mixtos renovables y, metodológicamente, requiere abastecimiento responsable (bajo contenido de metales críticos), reciclaje y inventarios regionales actualizados para evitar traslados de carga entre categorías (Cellura et al., 2023; Badza et al., 2024).

5. Conclusiones

El desempeño climático mejora únicamente cuando el origen de la electricidad realmente cambia y cuando la operación acompaña ese cambio. Si la contratación renovable no tiene trazabilidad o si la planta mantiene ineficiencias, la reducción queda en el papel. Por eso conviene empalmar la transición del suministro con control de demanda en los equipos críticos, mantenimiento predictivo que prevenga derivas energéticas y medición a nivel de subproceso que permita verificar ahorros con datos y no con supuestos. De este modo la mejora se consolida en la práctica diaria y no se diluye con variaciones en turnos, cargas o condiciones ambientales.

En segundo término, la reducción de toxicidad depende de decisiones sobre formulación y abastecimiento, no solo de balances globales. Disminuir fosfatos y masa reactiva funciona siempre que exista una política de compras con límites de metales traza por lote, verificación independiente y planes de contingencia ante desviaciones de calidad. Al mismo tiempo resulta prudente fijar ventanas de pureza del producto y disponer de etapas de pulido cuando sea necesario, ya que una mejora ambiental que degrade el desempeño técnico termina revirtiéndose en reprocesos y residuos. Con esa combinación se estabiliza el riesgo sanitario y se disminuye la presión sobre recursos minerales sin comprometer la confiabilidad del proceso.

Finalmente, el uso de agua de piscicultura aporta valor cuando se gestiona como una corriente con calidad y no como un insumo indiferenciado. Ello implica caracterizaciones periódicas de nutrientes, pretratamientos simples y balances de asimilación que eviten excedentes, junto con reglas claras para conmutar a fuentes alternativas si la calidad sale de rango. Con este enfoque, y siempre que exista un tablero de indicadores que integre metas por eje y ejercicios de sensibilidad

ante estacionalidad del efluente y variaciones del suministro eléctrico, los desvíos se detectan a tiempo y se corrigen antes de que afecten el desempeño ambiental y productivo.

6.Referencias Bibliográficas

- Águila-Carricondo, P., García-García, R., De La Roche, J. P., Galán, P. L., Bautista, L. F., Espada, J. J., & Vicente, G. (2025). *Aphanizomenon flos-aquae*: A biorefinery for health and energy—Unleashing phycocyanin’s power and biogas potential. *Marine Drugs*, 23(6), 225. <https://doi.org/10.3390/md23060225>
- Álvarez-González, A., De Moraes, E. G., Planas-Carbonell, A., & Uggetti, E. (2023). Enhancing sustainability through microalgae cultivation in urban wastewater for biostimulant production and nutrient recovery. *Science of the Total Environment*, 904, 166878. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166878>
- Andreasi Bassi, S., Biganzoli, F., Ferrara, N., Amadei, A., Valente, A., et al. (2023). Updated characterisation and normalisation factors for the environmental footprint 3.1 method. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/798894>
- Badan, I., et al. (2024). Life cycle assessment of exopolysaccharides and phycocyanin production with *Arthrospira platensis*. *Fermentation*, 10(3), 163.
- Badza, K., Sawadogo, M., & Soro, Y. M. (2024). Environmental impacts of a stand-alone photovoltaic system in Sub-Saharan Africa: A case study in Burkina Faso. *Heliyon*, 10(19), e38954. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38954>
- Barajas-Solano, A. F. (2022). Optimization of phycobiliprotein solubilization from a thermotolerant *Oscillatoria* sp. *Processes*, 10(5), 836. <https://doi.org/10.3390/pr10050836>
- Bernasová, T., Nedbal, V., Ghorbani, M., Brom, J., Amirahmadi, E., & Bernas, J. (2024). Eutrophication risk potential assessment between forest and agricultural sub-catchments using LCIA principles. *Land*, 13(8), 1150. <https://doi.org/10.3390/land13081150>
- Braud, L., McDonnell, K., & Murphy, F. (2025). Beyond phycocyanin: Environmental life cycle assessment of a European pilot scale *Spirulina* biorefinery. *Bioresource Technology Reports*, 29, 102027.

- Cellura, M., Luu, L. Q., Guarino, F., & Longo, S. (2023). A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells. *Science of the Total Environment*, 908, 168019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168019>
- Chalermthai, B., Nootong, K., Olsen, B. D., Assabumrungrat, S., & Charoensuppanimit, P. (2024). Cradle-to-gate life cycle assessment of Spirulina bioplastic produced via plasticization with glycerol. *Environmental Research*, 251, 118622. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118622>
- Huang, J., Ling, T., & Chen, F. (2017). Environmental assessment of microalgal biodiesel production with a hybrid life cycle approach. *Bioresource Technology*, 150, 486–493. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.038>
- Laurent, A., Olsen, S. I., & Hauschild, M. Z. (2019). Normalization in EDIP97 and ReCiPe: Consequences for environmental footprinting. *Journal of Cleaner Production*, 92, 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.034>
- Mrotek, E., Nervar, A., Ferrer-Ledo, N., Canziani, S., & Bravi, M. (2024). Innovative solvent-based phycocyanin extraction from *Arthrospira platensis*. *Chemical Engineering Transactions*, 110, 337–342. <https://doi.org/10.3303/CET24110057>
- Papadaki, S., Kyriakopoulou, K., Tzovenis, I., & Krokida, M. (2017). Environmental impact of phycocyanin recovery from *Spirulina platensis* cyanobacterium. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 217–223. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.02.014>
- Schneider, D., et al. (2018). Environmental impacts of microalgae cultivation in raceway ponds: Use of wastewater and energy considerations.
- Suciu, N. A., De Vivo, R., Rizzati, N., & Capri, E. (2022). Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 30, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>
- Tagkas, C. F., Rizos, E. C., Markozannes, G., Karalexi, M. A., Wairegi, L., & Ntzani, E. E. (2024). Fertilizers and human health—A systematic review of the epidemiological evidence. *Toxics*, 12(10), 694. <https://doi.org/10.3390/toxics12100694>
- Tzachor, A., Smidt-Jensen, A., Ramel, A., & Geirsdóttir, M. (2022). Environmental impacts of large-scale *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) production in Hellisheidi Geothermal Park, Iceland: Life

cycle assessment. *Marine Biotechnology*, 24(5), 991–1001. <https://doi.org/10.1007/s10126-022-10162-8>

Vasilakou, K., Nimmegeers, P., Billen, P., & Van Passel, S. (2025). Prospective water impact assessment of algal biofuels: A climate-driven spatiotemporal approach. *Journal of Environmental Management*, 392, 126796. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126796>

Ye, J., et al. (2018). Life cycle assessment of Spirulina tablets production: Environmental consequences of nutrient source and light electricity.

Zhang, D., An, S., Yao, R., Fu, W., Han, Y., Du, M., Chen, Z., Lei, A., & Wang, J. (2022). Life cycle assessment of auto-tropically cultivated economic microalgae for final products such as food, total fatty acids, and bio-oil. *Frontiers in Marine Science*, 9, 990635. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.990635>

Zhuang, D., Chew, K. W., Teoh, W. Y., Al-Maari, M. A. S., Hizaddin, H. F., Alharthi, S., Show, P. L., & Ling, T. C. (2023). Extraction of phycocyanin from Spirulina using deep eutectic solvent liquid biphasic system. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 151, 105125. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105125>

Zuorro, A., García-Martínez, J. B., Barajas-Solano, A. F., Rodríguez-Lizcano, A., & Kafarov, V. (2023). Environmental footprint of inland fisheries: Integrating LCA analysis to assess the potential of wastewater-based microalga cultivation as a promising solution for animal feed production. *Processes*, 11(11), 3255. <https://doi.org/10.3390/pr11113255>

Deprá, M. C., Severo, I. A., Santos, A. M. D., Zepka, L. Q., & Jacob-Lopes, E. (2020). Environmental impacts on commercial microalgae-based products: Sustainability metrics and indicators. *Algal Research*, 51, 102056. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102056>

Porcelli, R., Dotto, F., Pezzolesi, L., Marazza, D., Greggio, N., & Righi, S. (2020). Comparative life cycle assessment of microalgae cultivation for non-energy purposes using different carbon dioxide sources. *The Science Of The Total Environment*, 721, 137714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137714>

