

SENSIBILIDAD DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE BIORREFINERÍA ASOCIADAS AL USO REDUCIDO DE FOSFATO DE SODIO

Sensitivity of biorefinery environmental impacts associated with reduced use of sodium phosphate

Alejandra Gabriela Yáñez-Vergara¹*, Héctor Mario Poggi-Varaldo², León Felipe Cano-Arteaga³

*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.246](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.246)

Como citar este artículo: Yáñez-Vergara, A. G., Poggi-Varaldo, H. M. y Cano-Arteaga, L. F. (2026). Sensibilidad de los impactos ambientales de biorrefinería asociadas al uso reducido de fosfato de sodio. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 98-119. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.246>

Resumen

La Evaluación del Ciclo de Vida (ecv) en la biorrefinería (brf) mostró que el fosfato de sodio contribuye significativamente a la toxicidad carcinogénica humana (tch). El fosfato de sodio sirve como agente de control de pH y es una fuente de el hongo *Trichoderma reesei* utiliza como nutriente. Éste le permite producir enzimas en la etapa Z de la brf. Sin embargo, otros autores han demostrado que el hongo podría alcanzar rendimientos competitivos de enzimas en medios de cultivo sin fósforo. Por ello, en la etapa Z se reemplazó el fosfato de sodio por carbonato; este nuevo escenario se denominó brf-CanoP2. Para realizar la ecv, se utilizó el método ReCiPe (H) midpoint 2016, software SimaPro. Se aplicó un nuevo sistema de indicadores de sustentabilidad ambiental (sa), conocido como conjunto α , ∂ y π . Los potenciales impactos ambientales normalizados (pian) disminuyeron de 40.7 a 28.6 (persona*año)/ unidad funcional (uf). La tch disminuyó de 13 933 a 6 356 (persona*año) / uf. En conclusión, la reducción de fosfato de sodio y su reemplazo por carbonato de sodio y bicarbonato de sodio mejoraron la sa de la brf-CanoP2.

1 Ingeniera Química. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1185-9738>. Correo electrónico: alejandra.yanez@cinvestav.mx

2 Doctor en Ciencias. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) Departamento de Biotecnología y Bioingeniería. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-5448>. Correo electrónico: hpoggi@cinvestav.mx

3 Ingeniero Bioquímico. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) Departamento de Biotecnología y Bioingeniería. Correo electrónico: leon.canoa@cinvestav.mx

Recibido: 17/01/2026 | Aceptado: 02/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Palabras clave: Evaluación del ciclo de vida, índices, métricas, sustentabilidad ambiental.

Abstract

A Life Cycle Assessment (LCA) of the biorefinery (BRF) showed that sodium phosphate significantly contributed to human carcinogenic toxicity (HCT). The sodium phosphate used serves as a pH control agent and phosphorus nutrient source for the fungus *Trichoderma reesei* to produce enzymes in the Z stage of the BRF. However, other authors have demonstrated that the fungus could achieve competitive enzyme yields in phosphorus-free culture media. Therefore, sodium phosphate in the Z stage was replaced with carbonate; this new scenario was named BRF-Canop2. The ReCiPe (H) midpoint 2016 method was used for the LCA in SimaPro. A new system of environmental sustainability (ES) indicators, known as the ∂ , $\ddot{o}$, and π set, was applied. The potential normalized environmental impacts (PIAN) decreased from 40.7 to 28.6 (person*years)/functional unit (FU). The total human consumption (THC) decreased from 13,933 to 6,356 (person*years)/FU. In conclusion, reducing sodium phosphate use and replacing it with sodium carbonate and sodium bicarbonate improved the environmental performance of the BRF-Canop2.

Keywords: environmental sustainability, indices, life cycle assessment, environmental metrics

Introducción

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) reporta que se generan alrededor de 44×10^6 toneladas de residuos sólidos urbanos (rsu) al año (Semarnat, 2020), mientras que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (inecc) indicó que la eliminación de estos residuos libera, aproximadamente, 29 029 Gg de CO₂e (inecc, 2020). Los rso están compuestos por 43.91% de cartón y 9.62% de papel (Semarnat, 2020). La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (forsu) rara vez es aprovechada. A ello responde, la inadecuada disposición de los residuos, que contribuye a la contaminación de los ecosistemas (Victorino y Velázquez, 2018).

En este sentido, los rso tienen potencial para generar biogás u otros productos de valor (López et al., 2025). Es importante destacar la factibilidad económica inherente a la relación costo-beneficio derivada de la implementación

de tecnologías de procesamiento de residuos (Mendoza et al., 2023). Resulta indispensable generar conciencia ambiental, posibilitar la conectividad con las problemáticas ambientales para construir redes que permitan mejorar el ecosistema (Ávalos et al., 2025).

La BRF es una tecnología alternativa que permite el aprovechamiento de la FORSU; dicha tecnología pone en marcha varios procesos biotecnológicos para transformar los desechos orgánicos en múltiples productos con valor agregado, a la vez que se alinea al principio de sustentabilidad ambiental (SA) (Escamilla-Alvarado et al., 2017; Fava et al., 2017).

La literatura da cuenta de múltiples configuraciones y conceptos de la BRF. Un modelo mexicano de BRF es el esquema H-M-E-Z-S-NN generado por el Grupo de Biotecnología Ambiental y Energías Renovables (GBAER). Este esquema de BRF comprende seis etapas principales que originan bioproductos y bioenergías a partir de la FORSU: H produce biohidrógeno; M produce biogás; E extrae ácidos orgánicos; Z produce un concentrado enzimático celulítico; S produce licores sacarificados para otros bioprocesos, mientras que NN genera nanopartículas naturales para usar en distintos tratamientos.

La SA de la BRF H-M-E-Z-S-NN ha sido evaluada en comparación con otras tecnologías de procesamiento de RSO, como la incineración con recuperación de energía, utilizando herramientas de análisis estandarizadas como la ECV (ISO 14040 y 14044, 2006) y respaldadas por métodos de evaluación de impacto de ciclo de vida, como el método ReCiPe 2016 y los indicadores de sustentabilidad ambiental GBAER (Yáñez-Vergara et al., 2025).

En trabajos previos se ha señalado que el uso de Na_3PO_4 en el medio de crecimiento utilizado en la etapa Z de la BRF H-M-E-Z-S-NN contribuye hasta en 60% a los impactos de toxicidad carcinogénica humana, lo que representa el PIAN más alto, con 13.93 (persona*año) / UF. Esto último responde al uso de fosfatos en la formulación del medio de cultivo en la etapa Z, lo cual está relacionado con el impacto ambiental causado por los residuos del tratamiento con H_3PO_4 (Yáñez-Vergara et al. 2025). El tratamiento de residuos de purificación de H_3PO_4 , usado en la producción del Na_3PO_4 , lleva emisiones de As, Al, Mg y Zn al agua (Tayibi et al., 2009; Rutherford et al., 1994). Por ello se recomendó buscar un material que sustituyera al Na_3PO_4 , de manera que el Na_3PO_4 añadido fuera reducido y sólo reemplazara el fósforo necesario para el crecimiento y el título enzimático necesarios. Esto reduciría los potenciales

impactos asociados a la toxicidad y ecotoxicidad en la BRF H-M-E-Z-S-NN (Yáñez-Vergara et al. 2025).

En la etapa Z de la BRF, el Na_3PO_4 es usado como agente de control de pH y fuente de nutriente de fósforo para el hongo *Trichoderma reesei*, a fin de que produzca enzimas en esta etapa. Sin embargo, algunos autores han demostrado que el hongo podría alcanzar rendimientos competitivos de enzimas en medios de cultivo sin fósforo (Callow et al., 2016). Por ello, el objetivo de este trabajo fue realizar la ECV de la BRF H-M-S-Z-NN con reducción de Na_3PO_4 en dos casos alternativos propuestos: BRF Cano-P1 y Cano-P2, con el propósito de aumentar la SA de la BRF H-M-S-Z-NN.

Metodología

El diseño experimental se centró en la comparación paralela de la ECV de las BRF Cano-P1 y Cano-P2 con respecto a la BRF H-M-E-Z-S-NN (caso basal), utilizando métodos y métricas basados o alineados con la ECV y las normas ISO 14040 e ISO 14041 (2006). Para las métricas se destacan los nuevos índices de sustentabilidad ∂ , δ y π utilizados para determinar la sustentabilidad ambiental en ambos casos.

1.1. Descripción del sistema de biorrefinería

Yáñez-Vergara et al. (2025) realizan la descripción completa de la BRF H-M-E-Z-S-NN basal. A partir del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de la configuración basal de la BRF se proponen dos casos modificados:

La BRF Cano-P1 se sustentó en la relación empírica carbón / fósforo = $50 \text{ g}_c / \text{g}_p$, que es común para el crecimiento de hongos filamentosos como *T. reesei* (Chen et al., 2022).

La BRF Cano-P2 se basó en la investigación publicada por Callow et al. (2016), que reporta una cuasi-independencia de la producción enzimática de celulasas por *T. reesei* y el contenido de fósforo en el medio de cultivo. Para evitar la ausencia total de fósforo en la etapa Z, se eligió una proporción carbón/ fósforo = $1,000 \text{ g}_c / \text{g}_p$.

1.1.1. Cálculo de sales de fosfatos

Para determinar las cantidades requeridas de sales de fosfato, es necesario conocer el contenido de carbono provisto por los sólidos fermentados y la peptona a la entrada en la etapa Z. Para ello se usaron las ecuaciones [1-6]. Como primer paso se calculó el contenido de carbono con la ecuación [1]:

$$m_C = (m_{FW,db} * X_{C/FW,db}) + (m_{Peptone} * X_{C/Peptone}) \quad [1]$$

donde:

m_C Masa de carbono en el caldo de cultivo de la etapa Z, kg_C

$m_{FW,db}$ Masa de residuos fermentados que ingresan a la etapa Z, kg_{FW,db}.

$X_{C/FW,db}$ Fracción de carbono contenida en los residuos fermentados en base seca, kg_C / kg_{FW,db}.

$m_{Peptone}$ Masa de peptona en el caldo de cultivo de la etapa Z, kgPeptona.

$X_{C/Peptone}$ Fracción de carbono contenida en la peptona, kgC/ kgPeptona.

Posteriormente, se usó la ecuación [2] para calcular la masa de fósforo que ingresa a la etapa Z en el caso basal:

$$m_P = \frac{m_{Na_3PO_4}}{X_{Na_3PO_4/P}} \quad [2]$$

donde:

m_P Masa de fósforo en el caldo de cultivo de la etapa Z, kg_P.

$m_{Na_3PO_4}$ Masa de Na₃PO₄ que ingresa a la etapa Z, kg_{Na₃PO₄}.

$X_{Na_3PO_4/P}$ Coeficiente estequiométrico de contenido de fósforo en Na₃PO₄, kg_{Na₃PO₄} / kg_P.

La masa de fósforo requerida en los casos Cano-P1 y Cano-P2 se calculó con la ecuación [3]:

$$m_{P,i} = \frac{m_C}{C/P_i} \quad [3]$$

donde:

$m_{P,i}$ Masa de fósforo en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kgC.

m_C Masa de carbono en el caldo de cultivo de la etapa Z, kgC.

C / P_i Relación másica de carbono y fósforo en la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_C/kg_P.

La masa de Na₃PO₄ requerida para Cano-P1 y Cano-P2 se calculó con la ecuación [4]:

$$m_{Na_3PO_4,i} = m_{P,i} * X_{Na_3PO_4/P} \quad [4]$$

donde:

$m_{Na_3PO_4,i}$ Masa de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{Na3PO4}.

$m_{P,i}$ Masa de fósforo que ingresa a la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_P.

$X_{Na_3PO_4/P}$ Coeficiente estequiométrico de contenido de fósforo en Na₃PO₄, kg_{Na3PO4} / kg_P.

La concentración de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo se calculó con la ecuación [5]:

$$[Na_3PO_4]_i = \frac{m_{Na_3PO_4,i}}{V} \quad [5]$$

donde:

$[Na_3PO_4]_i$ Concentración de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo de la etapa Z (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{Na₃PO₄} / L.

$m_{Na_3PO_4,i}$ Masa de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{Na₃PO₄}.

V Volumen del sistema de la etapa Z, 11 000 L.

En el caso Cano-P2 es necesario introducir un sistema de sales de carbonato para proveer la alcalinidad requerida en la etapa Z. Para este cálculo se utilizaron las ecuaciones [6-8]. Las consideraciones y el proceso de cálculo se presentan en la sección 3.1.

La alcalinidad, expresada en concentración equivalente de CaCO₃, en los casos Cano-P1 y Cano-P2, se calculó con la ecuación [6]:

$$[CaCO_3]_{eq,i} = \frac{[Na_3PO_4]_i \cdot m_{CaCO_3,eq}}{m_{Na_3PO_4,eq}} \quad [6]$$

donde:

$[CaCO_3]_{eq,i}$ Concentración de CaCO₃ equivalente en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{CaCO₃}/L.

$[Na_3PO_4]_i$ Concentración de Na₃PO₄ en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{Na₃PO₄}/L.

$m_{CaCO_3,eq}$ Masa de CaCO₃ por equivalente de alcalinidad, 50 mg_{CaCO₃}/eq.

$m_{Na_3PO_4,eq}$ Masa de Na₃PO₄ por equivalente de alcalinidad, 54.647 mg_{Na₃PO₄}/eq.

La ecuación [7] se usó para calcular el valor mínimo de alcalinidad equivalente requerida.

$$[CaCO_3]_{eq,Req,i} = [CaCO_3]_{eq,min} - [CaCO_3]_{eq,i} \quad [7]$$

donde:

$[CaCO_3]_{eq,Req,i}$ Concentración de $CaCO_3$ equivalente que se requiere suplir en el caldo de cultivo de la etapa Z (Base, Cano-P1o Cano-P2) para alcanzar la concentración mínima requerida de alcalinidad, kg_{CaCO_3}/L .

$[CaCO_3]_{eq,min}$ Concentración de $CaCO_3$ equivalente mínima requerida en el caldo de cultivo de la etapa Z, kg_{CaCO_3}/L .

$[CaCO_3]_{eq,i}$ Concentración de $CaCO_3$ equivalente en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), kg_{CaCO_3}/L .

Las masas de sales agregadas según la alcalinidad requerida del sistema de BRF se calcularon con la ecuación [8]:

$$m_{sal,i} = \frac{[CaCO_3]_{eq,Req,i} * m_{sal\ eq} * V}{m_{CaCO_3\ eq}} \quad [8]$$

donde:

$m_{Sal,i}$ Masa de sal en el caldo de cultivo de la etapa Z de la BRF i (Base, Cano-P1 o Cano-P2), $kg_{Na_2CO_3}$ o kg_{NaHCO_3} .

$[CaCO_3]_{eq,Req,i}$ Concentración de $CaCO_3$ equivalente que se requiere suplir en el caldo de cultivo de la etapa Z (Base, Cano-P1 o Cano-P2) para alcanzar la concentración mínima requerida de alcalinidad, kg_{CaCO_3}/L .

$m_{sal\ eq}$ Masa de sal por equivalente de alcalinidad, $kg_{Na_2CO_3}/eq$ o kg_{NaHCO_3}/eq .

$m_{CaCO_3\ eq}$ Masa de $CaCO_3$ por equivalente de alcalinidad, $50\ mg_{CaCO_3}/eq$.

1.2. Evaluación de Ciclo de Vida

1.2.1. Objetivo, alcance y limitaciones

El objetivo de la ECV es valorar los potenciales impactos ambientales (PIA) de dos casos (Cano-P1 y Cano-P2) que requieren menor cantidad de fosfatos en la etapa Z de la BRF H-M-E-Z-S-NN basal. La unidad funcional (UF) de los tres casos es 1 000 kilogramos de FORSU, cuya composición de esta corriente es 40% papel y cartón, y 60% desechos de comida; también posee 35% de humedad. El alcance de este estudio abarca desde la recepción de la FORSU en las instalaciones de la BRF hasta su disposición final.

1.2.2 Inventario de Ciclo de Vida

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de la BRF basal se sustenta en el publicado por Yáñez-Vergara et al. (2025), que consideró como unidad funcional 1 000 kilogramos de FORSU. La etapa Z recibe como input una fracción de los sólidos fermentados en la etapa H de la BRF. En los ICV de Cano-P1 y Cano-P2 se calcularon las cantidades de sal removidas y añadidas con las ecuaciones mostradas en la sección 2.1.1.

La relación $\text{kg}_c / \text{kg}_p$ del input a la entrada de la etapa Z es igual a la masa de carbono de los sólidos fermentados y la peptona añadida dividida entre la masa de fósforo de las sales de fosfato. Los sólidos fermentados en base seca poseen una composición de carbono de $0.46 \text{ kg}_c / \text{kg}_{\text{FW,db}}$ (Fermented Waste, dry base) y la peptona derivada de la leche de $0.44 \text{ kg}_c / \text{kg}_{\text{Peptona}}$ (Moreira et al., 2020).

1.2.3 Evaluación de Impacto Ambiental

La ECV fue realizada siguiendo las normas ISO 14040 e ISO 14041 (2006). El software utilizado fue SimaPro versión 9.0.0.35 y el método con que se obtuvieron los PIA fue ReCiPe 2016 punto intermedio jerárquico v.1.03. Se evaluaron 18 impactos ambientales. A partir de los valores caracterizados de PIA, pueden obtenerse los potenciales impactos ambientales normalizados (PIAN). Los PIAN emplean las mismas unidades (persona*año / UF), de manera que es posible determinar la proporción relativa de cada categoría de impacto y / o comparar las magnitudes de las ECV de diferentes procesos o tecnologías (considerando

que la UF en las ECV sea la misma). Esta homogeneidad de unidades permite generar nuevos índices de SA, como los indicadores GBAER (Yáñez-Vergara et al., 2025).

1.2.4. Comparación de sustentabilidad ambiental de los casos de BRF usando métricas de sustentabilidad ambiental GBAER

Para comparar diferentes tecnologías y determinar sus SA, se desarrollaron los índices de sustentabilidad ambiental α , θ y π . Estas métricas pueden consultarse en Yáñez-Vergara et al. (2025). Las métricas de SA permiten analizar los resultados obtenidos por medio del software SimaPro y posicionar las tecnologías en un plano θ - π para facilitar su comparación (Yáñez-Vergara, 2022; Sierra-Gachuz et al., 2022); el índice α permite obtener la SA total de una tecnología. La ecuación [9] representa el impacto ambiental potencial normalizado; j es el subíndice que representa el j -ésimo impacto. Por lo tanto, cuando α es mayor, la sustentabilidad es menor.

$$\alpha = \sum_{j=1}^{18} \text{PIAN}_j \quad [9]$$

donde:

PIAN = Potencial impacto ambiental normalizado

El plano θ - π mostrado en Yáñez-Vergara et al. (2025) permite ubicar las variables θ y π como un punto P dentro del plano y comparar diferentes tecnologías para determinar su SA según la posición P.

Resultados

En la tabla 1 se muestran los resultados de las cantidades de fosfato, Na_3PO_4 y sales de carbonato requeridas para la BRF: basal, Cano-P1 y Cano-P2. La cantidad de carbono a la entrada de la etapa Z se calculó con la ecuación [1]. Considerando la UF de 1 000 kilogramos de FORSU que ingresan a la BRF, 215.41 $\text{kg}_{\text{FW,db}}$ y 10 479 $\text{kg}_{\text{Peptona}}$ se incorporan a la etapa Z, y corresponden a 103.7 kg_C . La relación C / P del caso basal se calculó con la ecuación [2]. Los valores de cantidad de sales y alcalinidad se obtuvieron usando las ecuaciones [3-6] para Cano-P1 y las ecuaciones [3-8] para Cano-P2.

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 1, la cantidad de Na_3PO_4 se redujo significativamente para la BRF Cano-P2 con respecto al caso base y se sustituyó por un sistema de sales de carbonato.

Tabla 1.

Fosfato de sodio y sales de carbonato requerido

Biorrefinería	C/ P (kgC/ kgP)	mNa_3PO_4 (kg Na_3PO_4)	mNa_2CO_3 (kg Na_2CO_3)	mNaHCO_3 (kg NaHCO_3)
Base	26.19	20 958	0	0
Cano-P1	50	10. 973	0	0
Cano-P2	1 000	0.549	2 654	4 208

Sistema de carbonatos requerido en la biorrefinería Cano-P2

De acuerdo con Callow et al. (2016), la reducción de fosfato en la etapa Z no afectará su papel como nutriente. Sin embargo, tendrá influencia en el nivel de alcalinidad y en el pH del reactor. Por ello, se decidió compensarlo con un sistema de sales de carbonato, que además de ser una fuente de alcalinidad empleada en estudios de cultivos sumergidos, también es económico (Tyagi et al., 2023). Se calculó la alcalinidad del bicarbonato y el carbonato de sodio necesarios para reemplazar el fosfato requerido. Se estableció una concentración de alcalinidad de 500 mg / L de CaCO_3 equivalente en el biorreactor. La alcalinidad proporcionada por el sistema de carbonatos debe de alcanzar dicha concentración. Para convertir la concentración a miligramos de CaCO_3 equivalentes / L se realizó el cálculo con la ecuación [6], obteniéndose 45.665 miligramos de CaCO_3 / L. Esta cantidad es inferior al requerimiento mínimo de alcalinidad, por lo cual la alcalinidad faltante se reemplazó con un sistema de carbonato/ bicarbonato de sodio. De acuerdo con la ecuación [7] se obtuvieron 455.335 miligramos de CaCO_3 / L. Para Na_2CO_3 y NaHCO_3 son necesarios 227.668 miligramos de CaCO_3 / L, respectivamente. La ecuación [8] se utilizó para convertir estas cantidades en masa para carbonato y bicarbonato de sodio. Para el carbonato de sodio se obtuvieron 2 654 kilogramos de Na_2CO_3 y 4 208 para NaHCO_3 . Estas cantidades se sustituyeron en el ICV y se realizó el ECV para Cano-P1 y Cano-P2.

Evaluación ambiental de las BRF Cano-P1 y Cano-P2

Los valores totales de PIA en todas las categorías de impacto de la BRF Cano-P1 presentan una reducción con respecto al caso base. En la figura 1 se muestran las contribuciones de los potenciales impactos ambientales caracterizados de impactos selectos de la BRF base, Cano-P1 y Cano-P2. Las categorías de impacto que presentan las mayores reducciones porcentuales fueron toxicidad humana carcinogénica (se redujo de 38.60 a 28.23 kilogramos 1,4-DCB eq), escasez de recursos minerales (de 1.78 a 1.01 kilogramos Cu eq) y consumo de agua (de 9.16 a 7.48 metros cúbicos), lo que equivale a reducciones de alrededor de 26, 43 y 18 puntos porcentuales, respectivamente.

La reducción generalizada de los PIA con respecto a la BRF base indica que el uso de Na_3PO_4 involucra una contribución importante en todas las etapas de la BRF. La producción y refinamiento de sales de fosfato contribuye a la escasez de recursos minerales, puesto que compromete sustancias como el ácido sulfúrico y la liberación de metales pesados tóxicos, que abonan al deterioro de la salud humana y requieren una gran cantidad de agua para su tratamiento posterior (Rachid et al., 2025; Tayibi et al., 2009).

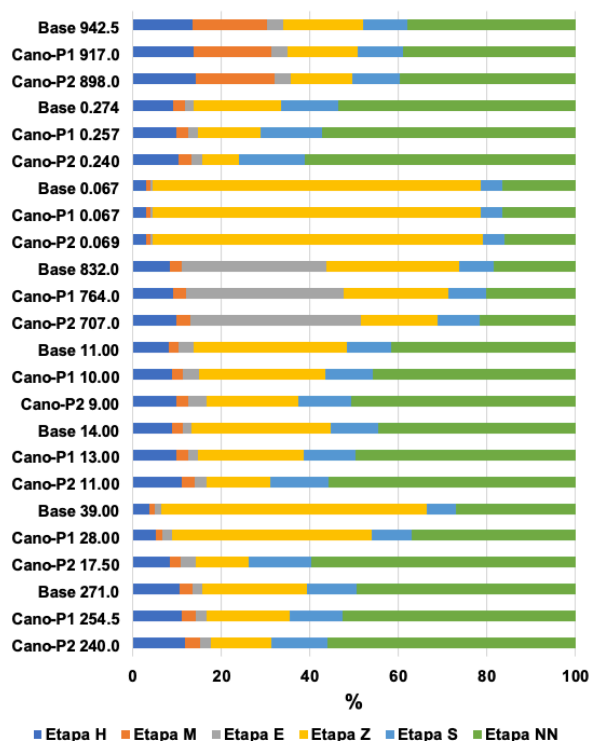
Diecisiete PIA muestran reducciones importantes con respecto al caso base. La toxicidad humana carcinogénica disminuyó de 38.60 a 17.54 kilogramos 1,4-DCB eq, la escasez de recursos minerales de 1.78 a 0.20 kilogramos Cu eq y el consumo de agua de 9.16 a 5.97 metros cúbicos.

Por su parte, la categoría de eutrofización marina incrementó el PIA en 2.7% con respecto a la BRF base. Este incremento está relacionado con el proceso de producción de carbonato de sodio (Solvay modificado dual o de Hou [Modified Solvay Process], Hou's Process, UPR, Ecoinvent 3.6, Allocation, APOS | GLAD, s. f.; Rahimpour et al., 2024).

Figura 1.

Contribución de los potenciales impactos ambientales caracterizados de impactos selectos de la BRF base, Cano-P1 y Cano-P2

Calentamiento global (kg CO2 eq)
Eutrofización de agua dulce (kg P eq)
Eutrofización marina (kg N eq)
Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DCB eq)
Ecotoxicidad de agua dulce (kg 1,4-DCB eq)
Ecotoxicidad marina (kg 1,4-DCB eq)
Toxicidad carcinogénica humana (kg 1,4-DCB eq)



Dado que la producción de carbonato de sodio resulta en un coproducto al cloruro de amonio (puede ser utilizado como fertilizante), lleva emisiones de nitrógeno a los cuerpos de agua marina (Rahimpour et al., 2024), por lo que puede explicar el aumento de la eutrofización marina para la BRF Cano-P2.

Comparación de la sustentabilidad global de los casos de biorrefinería base

En la tabla 2 se muestran los valores PIAN (valores alfa) de las BRF: base, Cano-P1 y Cano-P2.

Tabla 2.

Potenciales impactos ambientales normalizados BRF: base, Cano-P1, Cano P2

Categoría de impacto	pian (persona*año / uf)		
	brf Base	brf Cano-P1	brf Cano-P2
Calentamiento global	0.118	0.115	0.112
Agotamiento del ozono estratosférico	0.039	0.039	0.039
Radiación ionizante	0.043	0.042	0.041
Formación de ozono, Salud humana	0.133	0.131	0.129
Formación de partículas finas	0.130	0.127	0.125
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	0.196	0.193	0.191
Acidificación terrestre	0.465	0.460	0.456
Eutrofización de agua dulce	0.422	0.395	0.370
Eutrofización marina	0.015	0.015	0.015
Ecotoxicidad terrestre	0.803	0.738	0.683
Ecotoxicidad de agua dulce	8.756	7.981	7.232
Ecotoxicidad marina	13.604	12.233	10.906
Toxicidad carcinogénica humana	13.933	10.192	6.333
Toxicidad no carcinogénica humana	1.819	1.708	1.608
Uso de tierra	0.007	0.006	0.006

Escasez de recursos minerales	0.000	0.000	0.000
Escasez de recursos fósiles	0.207	0.201	0.196
Consumo de agua	0.034	0.028	0.022
Índice ∂	40.725	34.602	28.463

Es importante notar que los PIAN de los casos Cano-P1 y Cano-P2 se redujeron con respecto al caso base en la mayoría de las categorías y la toxicidad humana carcinogénica disminuyó más de la mitad para Cano-P2. En la tabla 2 se observa que el alfa del caso base es más alto que los de Cano-P1 y Cano-P2, que son 15% y 30% más sustentables, respectivamente, que el caso base.

Tabla 3.

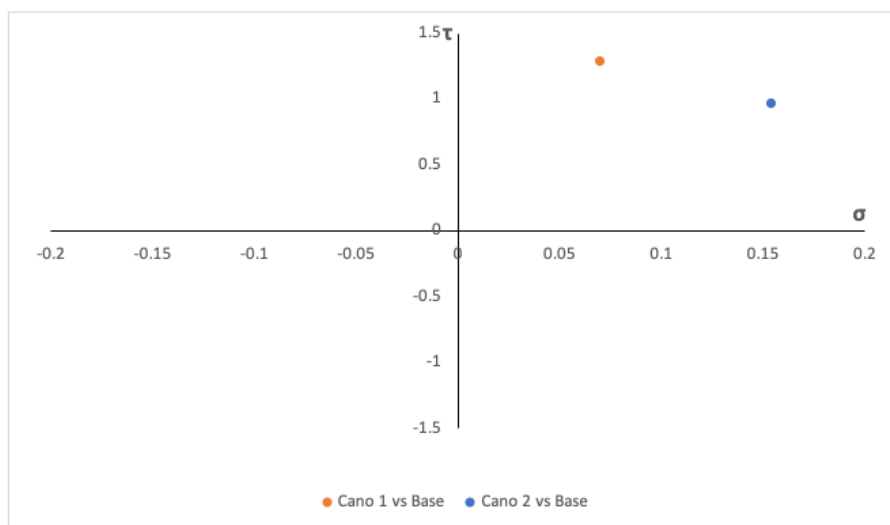
Indicadores de sustentabilidad ambiental GBAER, BRF Cano-P1, BRF Cano-P2, con respecto al caso base

Caso	A	Σ	N_{EVT}	N_{RFT}	T
Base	40.725	-	-	-	-
Cano-P1	34.60	0.0708	18	0	1.2788
Cano-P2	28.46	0.156	17	1	0.9542

En la tabla 3 se muestran los indicadores de sustentabilidad ambiental ∂ , ∂_y y π GBAER de la BRF Cano-P1 y BRF Cano-P2 con respecto al caso base. Estos indicadores se ubicaron en el plano ∂ - π (figura 2) para determinar la sustentabilidad global de las BRF Cano-P1 y Cano-P2. Se observó que el punto que representa la comparación del caso Cano-P1 con el caso base se encuentra en el cuadrante 1, lo cual representa una mejora estricta o dominante del caso Cano-P1 sobre el caso base. Por su parte, la posición del punto que representa la comparación de la BRF Cano-P2 con el caso base indica que la BRF Cano-P2 es más sostenible ambientalmente que el caso base.

Figura 2.

Plano δ - π : BRF base versus Cano-P1 y Cano-P2



Conclusiones

La ECV y los indicadores GBAER muestran que la sustitución de fosfato en las BRF Cano-P1 y Cano-P2 mejoró la SA con respecto a la BRF base: el índice ∂ se redujo 30% (40.7 a 28.5) para la BRF Cano-P2 respecto al de la BRF basal. Mientras que la BRF Cano-P1 redujo su índice ∂ de 40.7 a 34.6, lo que equivale a una reducción total de 15%. La ECV muestra que la BRF Cano-P2 fue la que más redujo sus PIAN en la etapa Z, en 74%; en tanto la BRF Cano P1 disminuyó en 37% con respecto a la BRF basal.

La BRF Cano-P2 presenta un valor menor del indicador de SA ∂ que los otros dos casos analizados. La BRF Cano-P2 posee mayor impacto en la categoría de eutrofización marina; sin embargo, se considera que este hecho no afecta la superioridad de la BRF Cano-P2 sobre las BRF basal y Cano-P1. Por su parte, la etapa NN contribuye de manera significativa a la toxicidad humana carcinogénica para la BRF.

Los PIA que más se redujeron con respecto de la BRF base fueron las categorías ecotoxicidad marina y toxicidad humana carcinogénica, con 19.83% y 54.55%, respectivamente, para la BRF Cano-P2. Por su parte la BRF Cano-P1 disminuyó en 10% y 26.85%, respectivamente, para las mismas categorías.

En la BRF Cano-P2 las categorías eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua dulce y toxicidad humana no carcinogénica disminuyeron en más de 10% en sus respectivos impactos caracterizados. Esta reducción también se refleja de manera proporcional en los PIAN.

Referencias

- Ávalos-Rodríguez, M. L., Díaz-Abrego, M. y Rangel-Vargas, J. M. (2025). La sostenibilidad en los posgrados. Creación de contenidos ambientales en el Doctorado en Innovación UVEG. Sustainability in postgraduate studies. Creation of environmental contents in the UVEG Innovation Doctorate [La sostenibilidad en los posgrados. Creación de contenidos ambientales en el Doctorado en Innovación UVEG]. *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía*, 9(16), 128–144. <https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog25.06091606>
- Callow, N. V., Ray, C. S., Kelbly, M. A. y Ju, L. K. (2016). Control de nutrientes para la producción de celulasa en fase estacionaria en *Trichoderma reesei* Rut C-30 [Nutrient control for stationary phase cellulase production in *Trichoderma reesei* Rut C-30]. *Enzyme and Microbial Technology*, 82, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2015.08.012>
- Chen, W., Zhan, Y., Zhang, X., Shi, X., Wang, Z., Xu, S., Chang, Y., Ding, G., Li, J. y Wei, Y. (2022). Influencia de las relaciones carbono:fósforo en la transformación de fracciones de fósforo y la sucesión de la comunidad bacteriana en compostaje con exceso de fósforo [Influence of carbon-to-phosphorus ratios on phosphorus fractions transformation and bacterial community succession in phosphorus-enriched composting]. *Bioresource Technology*, 362, 127786. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127786>
- Escamilla-Alvarado, C. (2014). Integración de un proceso modelo de biorrefinería para la obtención de hidrógeno, metano, enzimas y sacarificados a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos [Integration of a model biorefinery process for obtaining hydrogen, methane, enzymes and saccharides from the organic fraction of municipal solid waste] [Tesis de doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional].
- Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M. y Ponce-Noyola, M. T. (2017). Bioenergía y bioproductos de residuos orgánicos municipales como alternativa al vertedero: una evaluación comparativa de ciclo de vida con aplicación prospectiva a México [Bioenergy and bioproducts from municipal organic waste as alternative to landfilling: A comparative life cycle assessment with prospective application to Mexico]. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 25602–25617. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6939-z>

- Fava, F., Totaro, G., Diels, L., Reis, M., Duarte, J., Carioca, O. B., Poggi-Varaldo, H. M. y Ferreira, B. S. (2015). Biorrefinería de biopasos en Europa: oportunidades y necesidades de investigación y desarrollo [Biowaste biorefinery in Europe: Opportunities and research & development needs]. *New Biotechnology*, 32, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.11.003>
- Global LCA Data Access Network. (s. f.). Modified Solvay process, Hou's process, upr, ecoinvent 3.6, Allocation, apos [Proceso Solvay modificado, proceso de Hou, upr, ecoinvent 3.6, asignación, apos]. Recuperado el 10 de julio de 2025 de <https://www.globalldataaccess.org/modified-solvay-process-hous-process-upr-ecoinvent-36-allocation-apos>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, 1990–2019 [National inventory of greenhouse gas and compounds emissions, 1990–2019]. <https://www.gob.mx/inecc>
- International Organization for Standardization. (2006). Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework (ISO 14040) [Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Principios y esquema].
- International Organization for Standardization. (2006). Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines (ISO 14044) [Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Requisitos y guías].
- López-Hernández, V., Limón-Hernández, R. y Morales-Moguel, O. (2025). Diagnóstico de la generación de residuos en municipios del norte de Veracruz [Diagnosis of waste generation in municipalities of northern Veracruz]. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, 16(1), 136–158. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.251601.06>
- Mendoza Rossano, J. A., Cruz Hernández, J. y Herrera Pérez, L. (2023). Determinación de parámetros físicos y químicos de digeridos de bagazo de agave (*Agave angustifolia* Haw.) obtenidos con pacas biodigestoras [Determination of physical and chemical parameters of digested agave bagasse (*Agave angustifolia* Haw.) obtained with biodigester bales]. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(2), 1–8. <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.10>

- Moreira, J. V., Silva, S. C. M. y Cremasco, M. A. (2020). Evaluación de la relación carbono:nitrógeno en medio de cultivo semidefinido para la biosíntesis de tacrolimus por *Streptomyces tsukubaensis* y el efecto sobre el crecimiento bacteriano [Evaluation of carbon:nitrogen ratio in semi-defined culture medium to tacrolimus biosynthesis by *Streptomyces tsukubaensis* and the effect on bacterial growth]. *Biotechnology Reports*, 26, e00440. <https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2020.E00440>
- Rachid, S., Taha, Y., Muller, E. y Benzaazoua, M. (2025). Evaluación del ciclo de vida de la minería y beneficiación de fosfato en Marruecos: evaluación de desempeño [Life cycle assessment of phosphate mining and beneficiation in Morocco: Performance evaluation]. *Journal of Environmental Management*, 373, 123453. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.123453>
- Rahimpour, H., Fahmi, A. y Zinatloo-Ajabshir, S. (2024). Hacia la producción sostenible de sosa cáustica: una revisión crítica sobre impactos eco, modificaciones y enfoques innovadores [Toward sustainable soda ash production: A critical review on eco-impacts, modifications, and innovative approaches]. *Results in Engineering*, 23, 102399. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102399>
- Ritchie, E., Boyd, P., Lawson-Halasz, A., Hawari, J., Saucier, S., Scroggins, R. y Princz, J. (2017). Ecotoxicidad del zinc y sustancias que contienen zinc en suelo con consideración de enfoques de modalidad metal y complejos organometálicos [The ecotoxicity of zinc and zinc-containing substances in soil with consideration of metal-moiety approaches and organometal complexes]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(12), 3324–3332. <https://doi.org/10.1002/ETC.3910>
- Rutherford, P. M., Dudas, M. J. y Samek, R. A. (1994). Impactos ambientales del fosfogypsum [Environmental impacts of phosphogypsum]. *Science of The Total Environment*, 149(1–2), 1–38. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90002-7)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos [Basic diagnosis for integral waste management]. <https://www.gob.mx/inecc>

- Sierra-Gachuz, H., Poggi-Varaldo, H. M., Sotelo-Navarro, P. X., Escamilla-Alvarado, C., Sojo-Benítez, A., Barrera-Cortés, J. y González-Cardoso, G. (2022). Evaluación de la sostenibilidad ambiental de las biorrefinerías de la familia H-M-Z-S [Evaluation of environmental sustainability of H-M-Z-S family bio-refineries]. En P. Sotelo-Navarro et al. (Eds.), *Ambiente y bioenergía. Perspectivas y avances de la sostenibilidad* (pp. 2–12). ABIAER A. C.
- Tayibi, H., Choura, M., López, F. A., Alguacil, F. J. y López-Delgado, A. (2009). Impacto ambiental y gestión del fosfogypsum [Environmental impact and management of phosphogypsum]. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2377–2386. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2009.03.007>
- Tyagi, S., Mani, S., Tyagi, S. y Mani, S. (2023). Preparación de medios y buffers para cultivo de células [Media and buffer preparation for cell culture]. En *Basic Cell Culture Protocols* (pp. 77–88). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19485-6_5
- Victorino Ramírez, L. y Velázquez Cigarroa, E. (2018). Educación ambiental, cambio climático y sustentabilidad: Saberes locales y multidisciplinarios para el desarrollo [Environmental education, climate change and sustainability: Local and multidisciplinary knowledge for development]. Universidad Autónoma Chapingo. ISBN: 978-607-12-0495-0
- Yáñez-Vergara, A. G. (2022). Análisis de sustentabilidad de dos escenarios de gestión de residuos urbanos: biorrefinería que genera bioenergías, enzimas y nanobiopartículas (H-M-Z-S-NN) e incineración con recuperación de energía [Sustainability analysis of two urban waste management scenarios: biorefinery generating bioenergies, enzymes and nanobioparticles (H-M-Z-S-NN) and incineration with energy recovery] [Tesis de maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional].
- Yáñez-Vergara, A., Poggi-Varaldo, H. M., Pérez-Morales, G., Sotelo-Navarro, P. X., Padilla-Viveros, A., Matsumoto-Kuwahara, Y., Ponce-Noyola, T. y Sánchez-Pérez, R. (2025). Evaluación de la sostenibilidad ambiental de biorrefinería e incineración con recuperación de energía basada en evaluación de ciclo de vida [Evaluation of environmental sustainability of biorefinery and incineration with energy recovery based on life cycle assessment]. *Fermentation*, 11(4), 232. <https://doi.org/10.3390/fermentation11040232>

Derechos de Autor© 2026 Yáñez-Vergara, Alejandra Gabriela; Poggi-Varaldo, Héctor Mario; Cano-Arteaga, León Felipe



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.