

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DE BIORREFINERÍA CON SUSTITUCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Sensitivity analysis of the environmental sustainability of a biorefinery with activated carbon substitution

Alejandra Gabriela Yáñez-Vergara^{1*}, Héctor Mario Poggi-Varaldo², América Padilla-Viveros³

**Autor de correspondencia*

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.247](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.247)

Como citar este artículo: Yáñez-Vergara, A. G., Poggi-Varaldo, H. M. y Padilla-Viveros, A. (2026). Análisis de sensibilidad de la sustentabilidad ambiental de biorrefinería con sustitución de carbón activado. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 120-138. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.247>

Resumen

Mediante la evaluación del ciclo de vida (ECV) de una biorrefinería (BRF) se determinó que el carbón activado fósil (CAF) usado en la producción de bio-nanobiopartículas tiene un alto impacto en la ecotoxicidad y la toxicidad. Este trabajo propone mejoras a la sustentabilidad ambiental (SA) de la BRF y, por primera vez, muestra un análisis cuantitativo de la SA dirigido a reducir los impactos ambientales. El objetivo fue evaluar la sustentabilidad ambiental tras sustituir CAF por CAV en la BRF (H-M-Z-S-NN), usando la ECV y las métricas de sustentabilidad ambiental para determinar si se registraban reducciones en los potenciales impactos ambientales. El inventario del ciclo de vida (ICV) se obtuvo con el proxy de SimaPro “Activated carbon, granular {RoW} activated carbon production |Cut-off, U” y se comparó con un ICV de CAV tomado de la literatura. La ECV se realizó con el método ReCiPe (H) midpoint 2016. Los resultados muestran que la BRF-CAV registró mayores disminuciones principalmente en eutrofización del agua dulce (48.3%), toxicidad no carcinogénica humana (44.9%), ecotoxicidad del agua dulce (37.9%) y el agua marina (40.5%).

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: alejandrayanez@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/0000-0003-3222-9945>. Correo electrónico: hpoggi@cinvestav.mx

³ Doctora en Ciencias Químico-Biológicas. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav)-Programa Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3438-4463>. Correo electrónico: aviveros@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.

Esta última fue la reducción más significativa, de 14 a 8 (persona*año) / unidad funcional (UF). Los potenciales impactos ambientales normalizados totales de la BRF en la que se sustituyó CAF por CAV se redujeron de 41 a 27 (persona*año) / UF, lo cual indica que el uso de CAV mejoró significativamente la sustentabilidad ambiental de la BRF.

Palabras clave: carbón activado vegetal, evaluación del ciclo de vida, índices de sustentabilidad ambiental.

Abstract

The Life Cycle Assessment (LCA) of a biorefinery (BRF) determined that using fossil activated carbon (FAC) in the bionanobioparticles production stage carries a high impact in terms of ecotoxicity and toxicity. This work proposes improvements to the environmental sustainability of the BRF and, for the first time, presents a quantitative analysis of ES to reduce its environmental impacts. The objective was to evaluate the environmental sustainability of replacing FAC with activated carbon (AC) in the GBAER (HMZS-NN) BRF using LCA and environmental sustainability metrics, and to determine whether the potential environmental impacts decreased. The life cycle inventory (LCI) was based on the SimaPro proxy “Activated carbon, granular {RoW} | activated carbon production | Cut-off, U”. It was compared with an LCI of AC taken from the literature. Environmental impacts were assessed using the ReCiPe(H) midpoint 2016 method. The results show that most significant reduction in environmental impacts was for the BRF-CAV system, primarily for freshwater eutrophication (48.3%), non-carcinogenic toxicity to humans (44.9%), freshwater ecotoxicity (37.9%), and marine ecotoxicity (40.5%). The latter was the most significant reduction, from 14 to 8 person-years per functional unit (FU). The total normalized potential environmental impacts of the BRF system with CAF substitution for CAV were reduced from 41 to 27 person-years per FU, indicating that the use of CAV significantly improved the sustainability of the BRF system.

Keywords: environmental sustainability indices, life cycle assessment, plant-based activated carbon

Introducción

La generación de residuos, aunada a las deficiencias en la recolección, el tratamiento y la inadecuada disposición, es fuente de impactos ambientales negativos y contribuye al deterioro de los ecosistemas (Victorino y Velázquez, 2018). En este estudio se utilizó la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), pues éstos poseen potencial para generar bioenergía y productos con valor agregado (López et al., 2025).

El Grupo de Biotecnología Ambiental y de Energías Renovables (GBAER) ha estudiado modelos de BRF que procesan residuos sólidos orgánicos para producir bioenergía y bioproductos. El GBAER desarrolló la BRF H-M-S-Z-NN, la cual procesa FORSU y posee seis etapas: hidrógeno (H), metano (M), ácidos orgánicos (E), licores sacarificados (S), enzimas industriales (Z) y bionanobio-partículas (NN). En Sotelo-Navarro et al. (2022) y Yáñez-Vergara et al. (2022) pueden consultarse las etapas y procesos detallados de la BRF H-M-E-Z-S-NN.

En trabajos previos, Yáñez-Vergara et al. (2024) analizaron el desempeño ambiental de la BRF mediante la ECV y los resultados mostraron que la etapa NN fue crítica para el calentamiento global, la eutrofización del agua dulce, la toxicidad humana no carcinogénica, la ecotoxicidad del agua marina y el agua dulce. Se verificó que en esta etapa se realizó la mayor contribución, aportando 49.5% a la toxicidad humana no carcinogénica, lo que probablemente se relaciona con el uso de CAF. Este último se utiliza para producir bionanobio-partículas y está asociado al tratamiento de residuos de minería y carbón fósil.

La ECV es una herramienta iterativa y es clave para la determinación de la sustentabilidad ambiental; además, permite evaluar una amplia y completa variedad de impactos ambientales mediante un conjunto de protocolos y metodologías (ISO 14040 y 14044, 2006).

Dado que la ECV es iterativa, conviene considerar la sustitución del CAF por CAV, de manera que, si se encuentra un beneficio, podrían reducirse los impactos de las etapas, procesos y clave de la BRF. Lo anterior permitiría reducir los NPEI y mejorar la sustentabilidad de la BRF. Yáñez-Vergara et al. (2024) sugirieron que sería conveniente determinar el efecto de un cambio de material, es decir, la sustitución del CAF por otro adsorbente como el CAV, sobre el perfil de impactos ambientales producidos por la contribución del material en la etapa de NN.

El coco es un material biomásico con alto contenido de carbono, bajo contenido en ceniza y sus residuos pueden emplearse como combustible. El coco es un alimento, es producido en más de 90 países y posee distintas aplicaciones en las industrias alimentaria y cosmética (Sagarpa, 2022).

México se encuentra en el octavo lugar a nivel mundial en la producción de coco. En 2020 produjo 234 976 toneladas de coco en 17 483 hectáreas, con un rendimiento de 13.4 toneladas por hectárea (Sagarpa, 2022). Los estados con mayor producción fueron Jalisco con 63 658 toneladas (27.1%), Sinaloa, 40, 072 toneladas (17.1%) y Quintana Roo, 34 608 toneladas (14.7%) (Sagarpa, 2022). Dada la abundancia de cáscara de coco en México y su bajo costo, se utilizó para producir CAV.

En este sentido Ávalos et al. (2025) remarcan la importancia de generar conciencia ambiental y posibilitar la conectividad con las problemáticas ambientales, así como de lograr un impacto positivo en la sociedad. Este estudio es relevante para la sociedad, puesto que la ECV de la gestión y procesamiento sustentable de residuos por medio de la tecnología de BRF impactará significativamente en su calidad de vida.

También es importante mencionar que la implementación de tecnologías de procesamiento de residuos se encuentra en función de la relación costo-beneficio (Mendoza et al., 2023). Es en este sentido que la BRF plantea la generación de bioenergías y productos con valor agregado, por lo cual se espera que este trabajo también tenga impacto económico y en la creación de políticas públicas en México.

El objetivo de este análisis fue evaluar la sustentabilidad ambiental derivada de la sustitución de CA de origen fósil por CA de origen vegetal en la BRF (H-M-Z-S-NN) empleando la ECV y métricas de sustentabilidad ambiental, para determinar si se registraban reducciones en los potenciales impactos ambientales.

Materiales y métodos

Se desarrolló un análisis de sensibilidad para la BRF H-M-S-Z-NN descrita en Sotelo-Navarro et al. (2022) y en Yáñez-Vergara et al. (2022), utilizando carbón activado de origen fósil y vegetal y empleando la ECV. El inventario del ciclo de vida (ICV) para el CAF se elaboró a partir de la variable proxy “Carbón activado, granular {RdM} | Producción de carbón activado | Valor de corte, U”. El ICV para el CAV fue reportado por Arena et al. (2016).

1.1. Descripción del sistema

El objetivo fue evaluar la sustentabilidad ambiental de la BRF GBAER (H-M-Z-S-NN) con uso de CA de origen fósil y vegetal para determinar los potenciales impactos ambientales (PIA). La UF y el flujo de referencia implicaron el procesamiento de 1, 000 kilogramos de FORSU, la cual tiene una humedad de 35% y está conformada en 60% por cartón y papel, en tanto el restante 40% corresponde a residuos de alimentos. El análisis comprende desde la recepción de los residuos a la entrada de la BRF hasta la disposición final de los mismos.

1.2. Biorrefinería GBAER con uso de carbón activado vegetal

Como primer paso, la FORSU es recibida en la entrada de la planta y posteriormente acondicionada con agua residual (o de efluentes internos) para incrementar su humedad, mientras que su alcalinidad-pH es estabilizada con fosfato. Las corrientes de salida son enviadas al relleno sanitario y están compuestas principalmente por sólidos del proceso de sacarificación, digestatos anaeróbicos filtrados y sólidos refermentados en la etapa Z. La activación química del carbón se realizó a 950°C durante tres horas.

La BRF H-M-Z-S-NN es autosuficiente. Genera aproximadamente 600 MJ netos, equivalentes a 167 kWh de energía de alto y bajo voltaje. La electricidad fue producida mediante cogeneración (metano) y por medio de celdas de combustible (biohidrógeno). La BRF es 100% autosuficiente en energía eléctrica y en 60% de la energía térmica requerida, de manera que el excedente de energía eléctrica puede ser usado para suplir el déficit de energía térmica (40%).

1.3. Biorrefinería GBAER con uso de carbón activado de origen fósil

La BRF con uso de CA de origen fósil y la BRF con uso de CA de origen vegetal poseen las mismas seis etapas H-M-S-Z-NN descritas en Sotelo-Navarro et al. (2022) y en Yáñez-Vergara et al. (2022). La diferencia radica en el uso de CAF en la producción de bionanobiopartículas en la etapa NN.

1.4. Inventario de ciclo de vida

El ICV de la BRF con uso de carbón activado de origen fósil y vegetal se obtuvo a partir de los datos reportados sobre balances de masa y energía de los diversos procesos e información experimental obtenida por el GBAER (Escamilla-Alvarado et al., 2013, 2014, 2015, 2017; Romero-Cedillo et al., 2018).

La BRF-CAF utilizó carbón activado de origen fósil en la etapa NN y se obtuvo a partir de la información contenida en el proxy SimaPro “Activated carbon, granular {RoW}| activated carbon production, granular from hard coal | Cut-off, U” tomado de la base de datos Ecoinvent (PRé Sustainability, 2019). El ICV de la BRF con uso de CA de origen vegetal se utilizó siguiendo lo reportado por Arena et al. (2016) (tabla 1, escenario 2).

1.5. Evaluación de impacto ambiental

La ECV se realizó de acuerdo con la metodología descrita en las normas ISO (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Se utilizaron el software SimaPro, Analyst y el método ReCiPe 2016 Hierarchical mip-point. Las emisiones se clasificaron según los 18 PIA: radiación ionizante, formación de ozono en ecosistemas terrestres y en salud humana, escasez de recursos fósiles, calentamiento global, deterioro de la capa de ozono, toxicidad humana carcinogénica y no carcinogénica, ecotoxicidad marina, acidificación terrestre, ecotoxicidad del agua dulce, uso de suelo, eutrofización del agua dulce y el agua marina, ecotoxicidad terrestre, escasez de recursos minerales, consumo de agua y formación de partículas finas.

Se determinaron los potenciales impactos ambientales normalizados (PIAN). La normalización permite comparar las magnitudes de los 18 PIAN empleando la ECV para una determinada tecnología o proceso, como también comparar la magnitud de una categoría de impacto entre ECV realizadas por diferentes

tecnologías (esto último siempre que la UF sea equivalente en todos los casos) (PRé Sustainability, 2019a).

1.6. Métricas de sustentabilidad ambiental basadas en impactos ambientales potenciales normalizados. Índices de sustentabilidad ambiental del GBAER

Se desarrollaron los índices de SA GBAER ∂ , δ y π (ecuaciones [1-3]) con el objetivo de comparar diferentes tecnologías y determinar su sustentabilidad ambiental. Estos índices permiten analizar los resultados obtenidos empleando el software SimaPro y posicionar las tecnologías en un plano δ - π (figura 1), para facilitar su comparación (Yáñez-Vergara, 2022; Sierra-Gachuz et al., 2022). Índices de sustentabilidad ambiental de GBAER ∂ , δ y π (ecuaciones [1-3]).

La ecuación [1] muestra el π_{ANj} y representa los potenciales impactos normalizados; j alude al j -ésimo impacto. Si ∂ es mayor, la sustentabilidad disminuye. La suma de los π_{AN} permite comparar los impactos ambientales obtenidos con diferentes tecnologías. A partir de este concepto se generaron los índices de sustentabilidad ambiental GBAER. Es obligatorio emplear un UF igual o armonizado.

$$A = \sum_{j=1}^{i=18} \pi_{ANj} \quad [1]$$

donde

π_{AN} = potencial impacto ambiental normalizado

Supongamos que se busca comparar la SA de una tecnología convencional existente, (tecnología de referencia, REFT), con una tecnología en evaluación (EVT).

Es conveniente definir la variable s como se indica a continuación.

$$\sigma = \log \left[\frac{(\alpha_{REFT})}{(\alpha_{EVT})} \right] \quad [2]$$

donde

REFT = tecnología de referencia

EVT = tecnología evaluada

$\alpha_{\text{REFT}} = \alpha$ de la REFT

$\alpha_{\text{EVT}} = \alpha$ de la EVT

La variable τ es definida a continuación

$$\tau = \log \left[\frac{(N_{\text{EVT}} + 1)}{(N_{\text{REFT}} + 1)} \right]$$

[3]

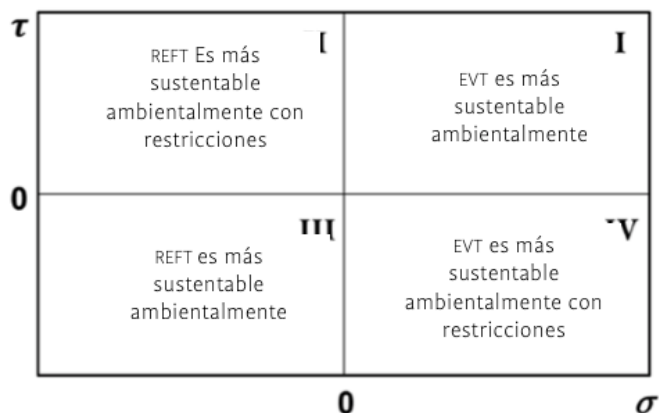
donde

NEVT: N° de NPEI en REFT mayor que EVT, o equivalentemente, número de PIAN en EVT menor que el PIAN correspondiente en REFT.

NREFT: N.º de PIAN en EVT mayor que REFT, o equivalentemente, número de PIAN en REFT menor que el NPEI correspondiente en EVT.

El plano δ - π mostrado en la figura 1 permite ubicar las variables δ y π como un punto P dentro del plano y comparar diferentes tecnologías para determinar su sustentabilidad ambiental según la posición P; (I) la tecnología evaluada es ambientalmente más sustentable; (II) la tecnología de referencia es ambientalmente más sustentable con restricciones; (III) la tecnología de referencia es ambientalmente más sustentable; y (IV) la tecnología evaluada es ambientalmente más sustentable con restricciones.

Figura 1.
Plano σ - τ



Resultados y discusión

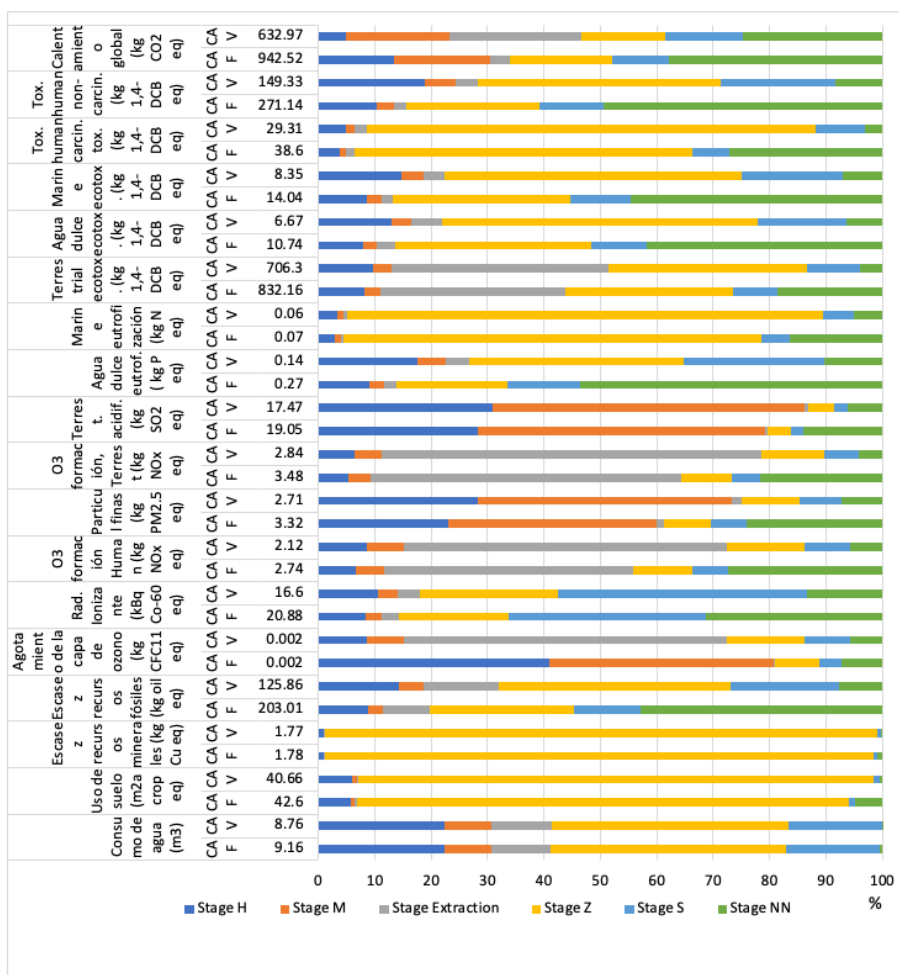
Evaluación de la sustentabilidad ambiental de impactos ambientales de la biorrefinería con uso de carbón activado de origen fósil y vegetal

En la figura 2 se muestra la caracterización de los PIA de ambas biorrefinerías, BRF-CAF y BRF-CAV. A continuación, se exponen las principales tendencias. La figura muestra que 17 PIA de la BRF-CAV fueron inferiores a los de la BRF-CAF, existiendo un empate para la categoría agotamiento de ozono. Las mayores disminuciones porcentuales se registraron para los PIA: eutrofización del agua dulce (48.31%), toxicidad humana no carcinogénica (44.93%), ecotoxicidad del agua marina (40.50%), escasez de recursos fósiles (38.00%) y ecotoxicidad del agua dulce (37.91%).

En este sentido se observa que todas las contribuciones relativas (en porcentaje) a los PIA en la etapa NN de BRF-VAC fueron menores que las de BRF-FAC.

Figura 2.

Potenciales impactos ambientales caracterizados en la BRF



En consecuencia, las contribuciones absolutas (en unidades de PIA) de la etapa NN a los impactos de BRF-CAV fueron menores que las de los impactos de BRF-CAF.

Se observa que la etapa NN realiza contribuciones más fuertes en: calentamiento global (38.0%), eutrofización del agua dulce (53.0%), ecotoxicidad del agua dulce (41.7%), ecotoxicidad del agua marina (44.6) y toxicidad humana

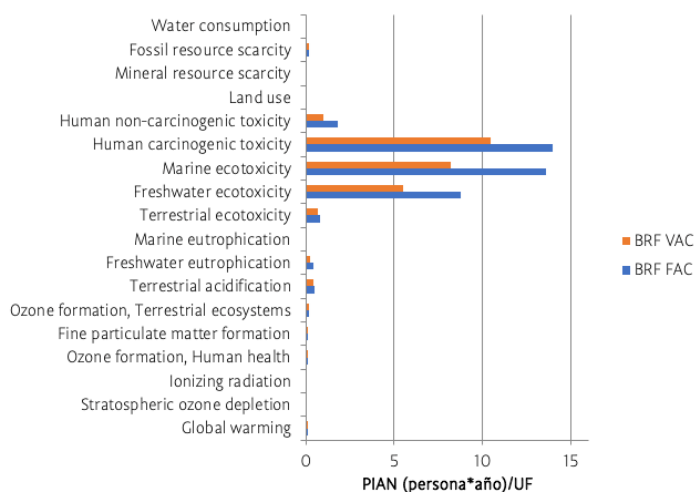
no carcinogénica (49.5%). Es importante resaltar que los PIA correspondientes al calentamiento global disminuyeron de 357.4 a 170.3 kilogramos de CO₂e.

El análisis de los PIAN de ambas BRF confirmó los hallazgos mostrados en la figura 2, mostrando los 18 PIAN de las BRF-CAF y BRF-CAV. Diecisiete impactos ambientales redujeron sus PIAN para la BRF-CAV. Las disminuciones más notables correspondieron a un PIAN de alto valor relacionado con la ecotoxicidad y las repercusiones en la salud humana.

El tratamiento relacionado con los desechos de la minería del carbón y la fabricación de CAF requiere 1.8 kWh / kg de carbón activado (PRé Sustainability, 2019b), lo que provoca la liberación de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂ (5.3 kilogramos de CO₂ por kilogramo de carbón activado). Por lo que se puede inferir que el uso de CAF es responsable de emisiones que influyen de manera importante en el calentamiento global, la toxicidad humana no carcinogénica, la eutrofización del agua dulce y la ecotoxicidad del agua dulce y el agua marina.

Figura 3.

Potenciales impactos ambientales normalizados de la biorrefinería con carbón activado de origen fósil y vegetal



Notas: brf-fac significa biorrefinería con carbón activado de origen fósil; brf-vac significa biorrefinería con carbón activado de origen vegetal.

Comparación de la sustentabilidad ambiental entre las biorrefinerías con carbón activado de origen fósil y vegetal

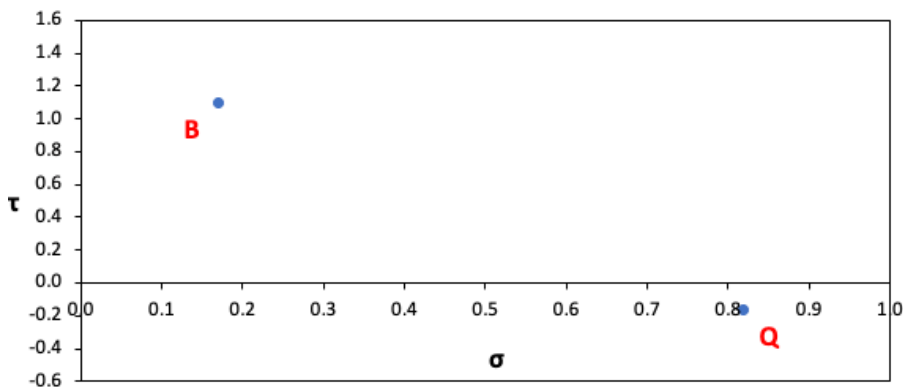
Siguiendo las ecuaciones [1-3], el indicador a para la BRF-CAV fue significativamente menor que el de la BRF-CAF, puesto que el índice a disminuyó al reemplazar carbón activado de origen fósil por el de origen vegetal en la BRF de 40.73 a 27,041 (persona*año/ UF) (-40.13%) y representó una reducción de 13.42 (persona*año/ UF). Al realizar los cálculos para los valores de los otros dos indicadores fueron $s = 0,178$ y $t = 1,091$, de tal manera que podemos ubicar el punto B y comparar la sustentabilidad ambiental de ambas BRF en el plano s - t . Para este caso, el punto B que compara la BRF con carbón activado de origen fósil con el de origen vegetal se ubica en el cuadrante 1, lo que significa que: (i) la tecnología evaluada es ambientalmente más sustentable y que el BRF que utilizó CAV fue más sostenible ambientalmente que el BRF que utilizó CAF con dominancia (figura 4).

La SA de la BRF CAV es mayor, debido a que la manufactura del carbón activado de origen fósil demanda el uso de energía de 1.8 kWh / kg de CA, lo cual implica emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono (5.3 kilogramos de CO₂ por kilogramo de CA). Por lo que las principales contribuciones a los impactos ambientales para CAF son las emisiones atmosféricas producto de la activación, carbonización y consumo de electricidad (Vilén et al., 2022). Aunado a esto, el uso de carbón activado y el tratamiento de residuos de minería de carbón es responsable de altas emisiones en las categorías de toxicidad humana no carcinogénica, calentamiento global, ecotoxicidad del agua marina y eutrofización del agua dulce (PRé Sustainability, 2019b).

Además, el uso de CAF produce emisiones de Zn (II) y As (V) que van al agua, por lo que realiza una contribución importante a los PIA de ecotoxicidad del agua marina y el agua dulce. En este sentido las emisiones al agua por kilogramo señaladas por proxy de Ecoinvent 'treated Spoil from hard coal mining' (desechos tratados de la minería de carbón duro) fueron de 6.25E-7 kilogramos de As y 1.90E-5 kilogramos de Zn, respectivamente (PRé Sustainability, 2019).

Figura 4.

Posiciones de los puntos B y Q que representan la comparación de sustentabilidad ambiental de ambas biorrefinerías con uso de CAF y CAF en el plano s-t



Conclusión

Este trabajo propone mejoras a la SA de un tipo de BRF y muestra, por primera vez, un análisis cuantitativo de SA cuyo propósito es reducir los PIA por medio de la sustitución de CAF en la BRF. El uso de CAV en la BRF redujo de manera importante todos los PIA y los PIAN. Las mayores disminuciones porcentuales se observaron para los PIA: eutrofización del agua dulce (48.31%), toxicidad humana no carcinogénica (44.93%), ecotoxicidad del agua marina (40.50%), escasez de recursos fósiles (38.00%) y ecotoxicidad del agua dulce (37.91%).

La disminución total de los PIA Alpha al sustituir el carbón activado fue de 40.7 a 27.3 (persona*año/ UF). Los índices de sustentabilidad ambiental a, s y t mostraron que la sustitución del CA de origen fósil por vegetal en la BRF mejoró significativamente su sustentabilidad ambiental y aumentó su superioridad.

Los PIAN mostraron la mayor reducción en la toxicidad humana carcinogénica de 13.93 a 10.47 (persona*año) / UF), mientras que la ecotoxicidad marina disminuyó de 13.60 a 8.19 (persona*año) / UF). El calentamiento global tuvo una contribución de 38% con uso de CA de origen fósil y de 15% con el uso de CA de origen vegetal, equivalente a una reducción de 357 a 170 kilogramos de CO₂e.

Este análisis se limitó al uso de proxys para conformar los ICV. Es recomendable explorar otros escenarios de uso de cáscara de coco, como la incineración con recuperación de energía para el aprovechamiento térmico en el proceso de la BRF.

Referencias

- Arena, N., Lee, J. y Clift, R. (2016). Evaluación de ciclo de vida de la producción de carbono activado de conchas de coco [Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells]. *Journal of Cleaner Production*, 125, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.073>
- 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]. *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía*, 9(16), 128–144. <https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog25.06091606>
- 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(33), 25602–25617. <https://doi.org/10.1007/S11356-016-6939-Z>
- Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M., Ponce-Noyola, T., Ríos-Leal, E., Robles-Gonzalez, I. y Rinderknecht-Seijas, N. (2015). Sacarificación de residuos fermentados como parte integral en una biorrefinería conceptual de producción de hidrógeno [Saccharification of fermented residues as integral part in a conceptual hydrogen-producing biorefinery]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(48), 17200–17211. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.164>
- Escamilla-Alvarado, C., Ponce-Noyola, M. T., Poggi-Varaldo, H. M., Ríos-Leal, E., García-Mena, J. y Rinderknecht-Seijas, N. (2014). Análisis energético de la producción en serie de biohidrógeno y metano de residuos orgánicos [Energy analysis of in-series biohydrogen and methane production from organic wastes]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(29), 16587–16594. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.077>
- Escamilla-Alvarado, C., Ponce-Noyola, T., Ríos-Leal, E. y Poggi-Varaldo, H. M. (2013). Evaluación multivariable de la producción de biohidrógeno por fer-

mentación de sustrato sólido de residuos municipales orgánicos en operación semicontinua y por tongadas [A multivariable evaluation of biohydrogen production by solid substrate fermentation of organic municipal wastes in semi-continuous and batch operation]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(28), 12527–12538. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.124>

ISO 14040. (2006). Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Principios y esquema [Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework]. Organización Internacional de Normalización.

ISO 14044. (2006). Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Requisitos y guías [Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines]. Organización Internacional de Normalización.

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>

Romero-Cedillo, L., Poggi-Varaldo, H. M., Breton-Deval, L. y Robles-González, V. S. (2018). Síntesis biológica de nanopartículas de hierro [Biological synthesis of iron nanoparticles]. 6th International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering.

SAGARPA. (2022, 9 de marzo). Producción de coco y copra en México [Coconut and copra production in Mexico]. Gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/produccion-de-copra-y-coco-en-mexico>

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 fami-

lia H-M-Z-S [Evaluation of environmental sustainability of H-M-Z-S family biorefineries]. En P. Sotelo-Navarro, A. L. Tecorralco-Bobadilla, C. Escamilla-Alvarado, G. Hernández-Flores, I. Nava-Bravo, J. A. López-Díaz y H. Poggi-Varaldo (Eds.), *Ambiente y bioenergía. Perspectivas y avances de la sostenibilidad* (pp. 2–12). ABIAER A. C.

Sotelo-Navarro, P. X., Poggi-Varaldo, H. M., Chargoy-Amador, J. P., Sojo-Benítez, A., Pérez-Angón, M. Á. y Sánchez-Pérez, R. (2022). Impactos ambientales de una biorrefinería HMEZS [Environmental impacts of an HMEZS biorefinery]. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 48–57. <https://doi.org/10.20937/RICA.54332>

PRé Sustainability. (2019). Activated carbon, granular {RoW}| activated carbon production, granular from hard coal | Cut-off, U [Carbono activado, granular {RoW}| producción de carbono activado, granular de carbón duro | Cut-off, U]. En *Ecoinvent v. 9.0.0.35*. PRé Sustainability.

PRé Sustainability. (2019a). SimaPro database manual methods library. Report (v. 9.0.0.35) [Manual de la base de datos SimaPro. Biblioteca de métodos. Informe]. PRé Sustainability.

PRé Sustainability. (2019b). Spoil from hard coal mining {GLO}| treatment of, in surface landfill | Cut-off, U [Residuos de la minería de carbón duro {GLO}| tratamiento en vertedero superficial | Cut-off, U]. En *Ecoinvent v. 9.0.0.35*. PRé Sustainability

Vilén, A., Laurell, P. y Vahala, R. (2022). Evaluación comparativa de ciclo de vida de la producción de carbono activado de diversos materiales/raw materials [Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials]. *Journal of Environmental Management*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116356>

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]. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Yáñez-Vergara, A. G., Morales-López, C. E., Poggi-Varaldo, H. M., Sotelo-Navarro, P. X., Padilla-Viveros, A. y Matsumoto-Kuwabara, Y. (2024, 13 de noviembre). Influencia del carbón activado usado en una biorrefinería tipo GBAER que produce biocombustibles, enzimas y bionanobiopartículas [Influence of spent activated carbon in a GBAER-type biorefinery producing biofuels, enzymes and bionanobioparticles]. Simposio Ambiente y Bioenergía, Veracruz, México. Presentación oral.

Derechos de Autor© 2026 Yáñez-Vergara, Alejandra Gabriela; Poggi-Varaldo, Héctor Mario, Padilla-Viveros, América.



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.