

(04-019) - Assessment of the environmental interest of the reuse of biological waste by pyrolysis.

Cases Valbuena, Lucía ¹; Díaz Piloñeta, Marina ¹; Pérez Oliva, Lucía ¹; Solis Gallego, Irene ²; Murias Torrecilla, Juan ³

¹ Universidad de Oviedo, ² Arcelor Mittal, ³ Energy Green Gas Tineo

Global industry, especially in Europe, faces the key challenge of decarbonization. Processes, mostly dependent on fossil fuels, must rapidly transform towards carbon neutrality, with the increasing profitability of options such as electricity or green hydrogen, it becomes essential to adopt carbons from zero-footprint sources.

This study focuses on valorizing biowaste: industrial wood, horse compost, digestate from the fifth container and bovine digestate. The objective is to reintegrate them into the production cycle, avoiding their disposal in landfills. For this purpose, a pyrolysis process is carried out, obtaining biochar, a solid with a high carbon content, able to replace fossil fuels. This alternative involves environmental impacts that are quantified by life cycle analysis, an iterative process in accordance with ISO 14040 that examines all stages of the process.

It is concluded that, although the process has environmental impacts, using wood as raw material is the most sustainable option (0.13 kg CO₂eq / kg of treated wood). The use of bovine digestate is also considered viable, although with lower biochar quality. These results provide a solid basis for future decisions, contributing to the search for sustainable alternatives in biowaste management.

Keywords: Life cycle analysis; circular economy; waste; biochar; pyrolysis.

Valoración del interés ambiental del tratamiento de residuos biológicos mediante pirólisis.

La industria mundial, especialmente la europea, afronta el desafío clave de descarbonización. Los procesos, mayormente dependientes de combustibles fósiles, deben transformarse rápidamente hacia la neutralidad de carbono, con la rentabilidad creciente de opciones como la electricidad o el hidrógeno verde, se vuelve esencial adoptar carbonos de fuentes sin huella.

Este estudio se centra en valorizar residuos biológicos: madera industrial, compost de caballo, digestato del quinto contenedor y de vacuno. El objetivo es reintegrarlos al ciclo productivo, evitando su disposición en vertederos. Para ello se lleva a cabo un proceso de pirólisis, obteniendo biochar, un sólido con alto contenido en carbono, capaz de reemplazar los combustibles fósiles. Esta alternativa conlleva impactos ambientales cuantificados mediante un análisis de ciclo de vida, un proceso iterativo conforme a la norma ISO 14040 que examina todas las fases del proceso.

Se concluye que, aunque el proceso tiene impactos ambientales, utilizar madera como materia prima es la opción más sostenible (0,13 kg de CO₂eq / kg de madera tratada). También es viable, aunque con menor calidad de biochar, el uso de digestato de vacuno. Estos resultados ofrecen una base sólida para decisiones futuras, contribuyendo a la búsqueda de alternativas sostenibles en la gestión de residuos biológicos

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida; economía circular; residuos; biochar; pirólisis.

Correspondencia: caseslucia@uniovi.es



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La creciente actividad humana amenaza la preservación del medioambiente tal como lo conocemos. El cambio climático, causado principalmente por la creciente emisión de gases efecto invernadero (GEI) debido al empleo de recursos fósiles, así como el agotamiento de los recursos naturales, provocan una situación que en muchos foros se califica de crítica actualidad (DNV, 2022). El sector industrial es uno de los grandes implicados en ambos problemas, cuyas emisiones, tanto atmosféricas como a la biosfera, así como el uso intensivo de materiales no renovables, genera una indudable preocupación en la sociedad actual (Gutowski et al., 2013). Las actividades presentes no pueden cesar, pero deben avanzar hacia un modelo respetuoso con el medio ambiente revelando la necesidad de explorar fuentes de energía más sostenibles y eficientes (*BP Statistical Review of World Energy. Coal*, 2019).

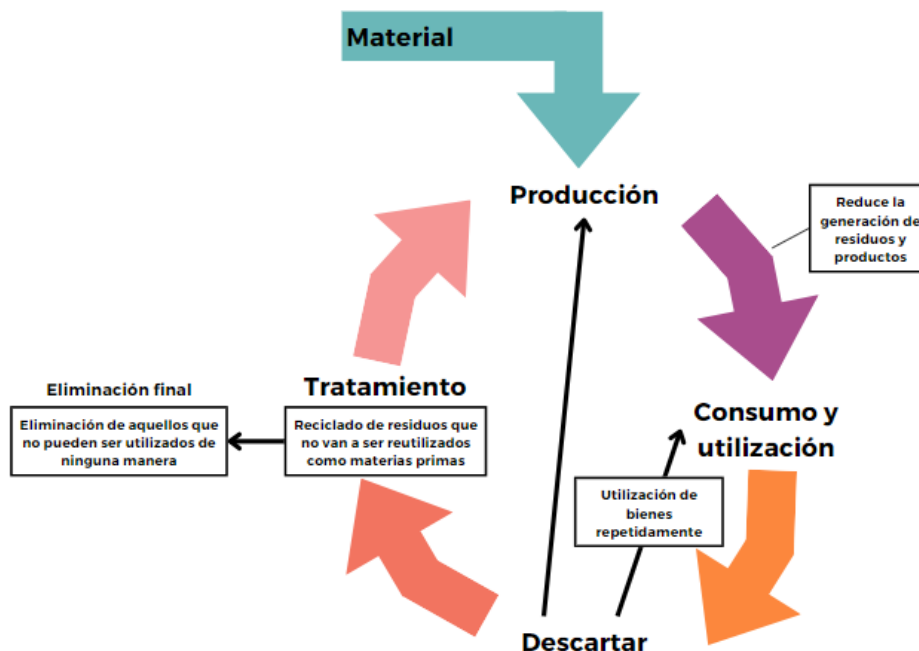
La respuesta más urgente a la problemática medioambiental citada es la descarbonización de la industria, la utilización eficiente de los recursos y el tratamiento de residuos. Se persigue la transición hacia una economía más circular, donde la utilidad de productos, materiales y recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, reduciendo al mismo tiempo la cantidad de residuos vertidos (Figura 1). Entre las alternativas más estudiadas se encuentra la utilización de residuos para producir materiales y productos químicos que puedan ser empleados como insumos en otras industrias, promoviendo la creación de cadenas de suministro sostenibles para establecer políticas de economía circular.

En esta línea, cada vez se comienza a analizar más el potencial de los recursos biomásicos (p. ej., gas de síntesis, bioaceite y biocarbón) con un enfoque de aplicación industrial en sustitución de los combustibles fósiles (Safarian et al., 2020). La producción de biocarbón o *biochar* a partir de residuos se presenta como una posible alternativa tecnológica para obtener un balance de carbono negativo debido a su buena inflamabilidad y capacidad de reducción (Wijayanta et al., 2014).

El presente estudio examina la valorización de cuatro residuos biológicos: madera industrial (residuo de origen forestal procedente de pallets en desuso), compost de caballo (residuo orgánico generado a partir de estiércol de caballos y materia orgánica), digestato del quinto contenedor (residuo orgánico obtenido del tratamiento de residuos domésticos) y digestato de vacuno (residuo orgánico producido por el tratamiento de estiércol de vacas). Para valorizar estos residuos existen diferentes rutas, siendo los tratamientos termoquímicos los más empleados actualmente, especialmente la pirolisis, debido a sus múltiples ventajas como la capacidad de manejar una amplia variedad de materias primas, una gran eficiencia de conversión y tiempos de reacción más cortos que otros tratamientos como los biológicos (Okolie et al., 2020). Pero la viabilidad técnica de los procesos y productos obtenidos no

garantiza necesariamente su sostenibilidad a nivel medioambiental ni en la práctica industrial, por lo que es fundamental evaluar su impacto desde diferentes dimensiones. No se puede considerar como un proceso holístico, sino que es necesario asegurar la ganancia en todos sus puntos intermedios.

Figura 1: Circularidad de los materiales.



El propósito fundamental de este estudio es llevar a cabo una evaluación comparativa del impacto ambiental originado durante el proceso de generación de *biochar* a partir de los residuos biológicos específicos seleccionados. La investigación se centrará en analizar y comparar las diferentes huellas ambientales asociadas con la producción de *biochar* a partir de estos residuos, considerando variables clave como las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de recursos naturales y otros indicadores ambientales relevantes. Este enfoque permitirá identificar y destacar las posibles ventajas y desventajas ambientales de la producción de *biochar* a partir de distintos tipos de residuos biológicos, contribuyendo así a una toma de decisiones más informada en el ámbito de la gestión de residuos y la producción sostenible de *biochar*.

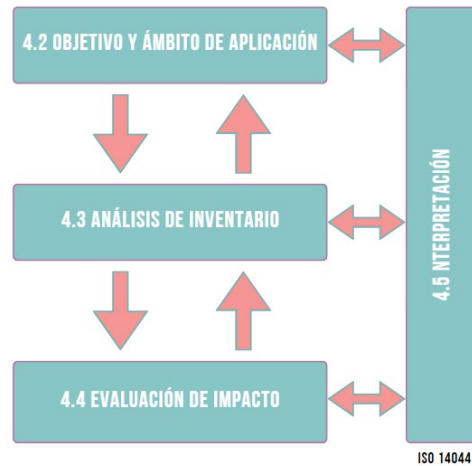
2. Metodología

El enfoque adecuado para evaluar la viabilidad ambiental de la producción del *biochar* mediante pirólisis a partir de diferentes tipologías de residuos, es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) también conocido por sus siglas en inglés LCA (Life Cycle Assessment), es un proceso analítico e iterativo que se utiliza para evaluar el consumo de recursos, el impacto ambiental y la generación de residuos asociados a un producto, proceso o actividad durante todas las fases de su ciclo de vida.

Aunque es posible elegir categorías de impacto personalizadas, es más conveniente utilizar una metodología normalizada para que los resultados sean más comparables y coherentes. En este caso, la metodología seguida para el análisis se basa en las recomendaciones de la norma ISO 14040 (2006), la cual define los principios y el marco de trabajo; las fases de su desarrollo y sus limitaciones y la norma ISO 14044 que incluye los requisitos y directrices y el marco de trabajo abarcando el ámbito de aplicación, la definición de objetivos, un análisis del inventario, la evaluación del impacto y una fase de interpretación (Figura 2). Según esta

norma ISO, esta metodología consta de cuatro fases (*ISO - International Organization for Standardization, 1946*).

Figura 2: Etapas de la metodología del ACV.



La primera etapa consiste en definir el objetivo y el alcance, proporciona una descripción detallada del proyecto y del producto. La segunda etapa es el análisis de inventario, en esta se identifican los procesos incluidos en el sistema analizado y se recopilan datos relativos a las entradas (recursos, materiales o productos) y a las salidas (productos, emisiones o residuos) en cada etapa del ciclo de vida del producto. La evaluación del impacto es la siguiente fase y consiste en interpretar estos datos en términos de impactos medioambientales. Por último, estos resultados se interpretan de acuerdo con la definición de objetivos y el alcance cumpliendo la fase de interpretación.

En este caso el análisis se realiza de la cuna a la puerta, es decir, sin tener en cuenta los procesos en los que se puede introducir como materia prima el *biochar* generado, puesto que lo que se pretende analizar es la viabilidad ambiental del tratamiento. Además, es un análisis de tipo comparativo, puesto que evalúa y compara el impacto ambiental de los diferentes productos, identificando oportunidades de mejora y posibilitando el desarrollo de estrategias para minimizar el impacto ambiental en las etapas clave del ciclo de vida. Además, se centra únicamente en el proceso de fabricación, sin tener en cuenta la eliminación de las materias primas y la construcción de la central de tratamiento.

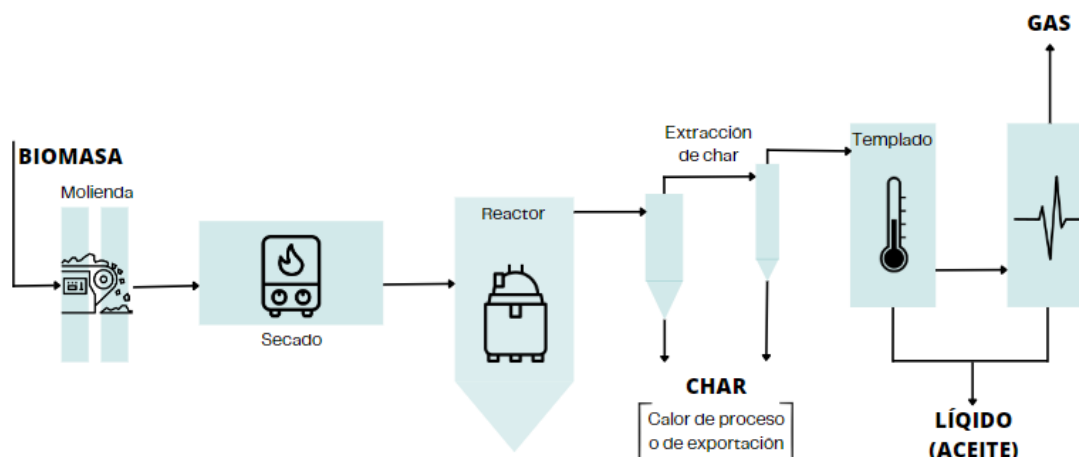
Para realizar la evaluación de impacto se utiliza el modelo de ACV de Simapro 8.4, un software de análisis utilizado para medir la huella ambiental de productos y servicios de forma objetiva y muy transparente, proporcionando información valiosa sobre su impacto en el medio ambiente (*SimaPro | LCA Software for Informed Changemakers, s. f.*).

Los datos que se introducen en el software son, en su mayoría, datos primarios que se recopilaron directamente de las instalaciones donde se realizaron mediciones in situ. También se utiliza la base de datos Ecoinvent (*EcoQuery - Ecoinvent, s. f.*) para complementar y enriquecer los datos primarios. Esta base de datos proporciona información detallada sobre los flujos de materiales y energía asociados con la producción, uso y eliminación de productos y servicios. Es una herramienta importante en el análisis de ciclo de vida y ayuda a identificar áreas de mejora para tomar decisiones más sostenibles en términos de impacto ambiental. Por último, se recurre a publicaciones científicas, informes técnicos y estudios previos para obtener datos adicionales o complementarios en aquellos casos donde los datos primarios y la base de datos Ecoinvent no eran suficientes. Este enfoque permite validar los datos y asegurar la calidad y confiabilidad de la información empleada en el estudio.

2.1 Objetivo y ámbito de aplicación

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición de la materia orgánica bajo la influencia del calor en un ambiente libre de oxígeno (Figura 3), lo que permite aumentar el contenido de carbono en los materiales y los hace competitivos como agentes reductores con los combustibles fósiles convencionales.

Figura 3. Esquema proceso de pirólisis.



Todas las materias primas se tuvieron que someter, en mayor o menor medida, a algún tipo de tratamiento previo a su introducción en el reactor de pirólisis para la obtención del *biochar*. El material pasa por una tolva de alimentación que alimenta un tornillo sin fin, encargado de transportar el material hasta el horno de pirólisis garantizando un flujo constante y controlado al reactor. En el reactor el material se somete a altas temperaturas, lo que provoca la descomposición térmica del residuo. Cada muestra fue sometida a tres temperaturas diferentes en un rango de 500 a 800°C (Tabla 1) con un tiempo de residencia de 30 minutos con la finalidad de poder analizar la variación de las características del producto resultante según diferentes condiciones de proceso. Las temperaturas fueron fijadas para cada material en función de los mejores resultados analizados en estudios previos recopilados de la literatura.

Tabla 1. Temperaturas analizadas en cada materia prima de origen.

Materia prima	Temperatura máxima (T1) [°C]	Temperatura intermedia (T2) [°C]	Temperatura mínima (T3) [°C]
Madera industrial	700	650	600
Digestato 5º Contenedor	800	750	700
Compost	750	600	500
Digestato de vacuno	750	600	500

A continuación, se presentan los cuatro escenarios a comparar. Cada uno de ellos incluye el transporte del material a la planta de pirólisis, así como su acondicionamiento previo en caso de que fuera necesario para cada uno de los tipos de materiales analizados.

- Escenario 1: *Biochar* obtenido a partir de madera industrial
- Escenario 2: *Biochar* obtenido a partir de compost de caballo






- Escenario 3: *Biochar* obtenido a partir de digestato del quinto contenedor
- Escenario 4: *Biochar* obtenido a partir de digestato de vacuno

Con el propósito de mejorar la presentación de los datos, la unidad funcional se ha expresado como "Cantidad (kg) de *biochar* necesaria para reemplazar 100 kg de coque con un contenido de carbono del 80%". El coque, un subproducto de la destilación del carbón, es ampliamente utilizado en diversas industrias debido a su alto contenido de carbono y su capacidad para generar calor (*Metallurgical Coke*, s. f.). El contenido de carbono en el coque del 80%, está basado en datos previos obtenidos de la literatura científica que sugieren que este material tiende a presentar un alto porcentaje de carbono en su composición (Niesler et al., 2021).

2.2 Análisis de Inventario

El Inventario del Ciclo de Vida (ICV) desempeña un papel fundamental en la obtención de información exhaustiva sobre las entradas y salidas ambientales de todas las partes del sistema que participan en el ACV. Este proceso implica la creación de un modelo del sistema de producto, recopilación de datos y la verificación de las entradas y salidas de las partes involucradas. En la siguiente Tabla 2 se puede observar de manera esquemática los datos que se consideran en el ICV:

Tabla 2. Inventario Proceso de Pirólisis.

 Producción	 Transporte	 Reducción de tamaño	 Secado	 Pirólisis
Compost	Distancia: 20km 100 kg residuo	Madera: molino de martillos	< 200 °C	Tª antorcha: 850 °C
		Consumo: 3 kWh	Secador de lecho fluido vibratorio	Tiempo residencia: 30 minutos
		Digestatos: cámara de compactación y cámara de trituración	Consumo: 15,9 kWh	Consumos: Eléctrico: 8,045 kWh Gas: 52 m ³ /h
		Consumo: 0,45 kWh		

La primera fase examinada es la producción, aplicable exclusivamente al escenario 2, donde el *biochar* se obtiene a partir de compost de caballo y esta materia prima se considera producto en lugar de un residuo. La consideración de esta fase es esencial debido a que el proceso de obtención del compost ya implica un impacto ambiental asociado. En contraste, en los demás escenarios donde se manejan residuos en lugar de compost, se tendrá un impacto ambiental positivo, ya que se evita que los residuos sean enviados a vertederos. En relación a las emisiones asociadas al transporte, se tiene en cuenta una distancia media de 20 km y se utiliza la base de datos disponible en Ecoinvent para modelar esta situación.

El pretratamiento consta de dos fases, cuya finalidad es acondicionar la materia prima para obtener un *biochar* de calidad y mejorar la eficiencia del proceso. La primera fase es la reducción de tamaño, cuya finalidad es aumentar la superficie específica de la materia prima, facilitando una mayor reactividad y una transferencia de calor más eficiente durante la pirólisis y la segunda fase es el secado, en el que se reduce el contenido de humedad. Por último, se produce el propio proceso de pirólisis en el que se obtiene *biochar* a partir de los residuos pretratados y de un consumo eléctrico y de gas.

3. Resultados

En el Manual del Sistema Internacional de Referencia de Datos sobre el Ciclo de Vida (ILCD) (Hauschild et al., 2012), el Instituto para el Medio Ambiente y la Sostenibilidad ofrece recomendaciones sobre los modelos y factores de caracterización que deberían utilizarse para la evaluación del impacto en aplicaciones como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Existen varias metodologías de ACV, y se están realizando algunos esfuerzos para su armonización.

Para elegir las categorías de impacto y la metodología de evaluación del impacto del ciclo de vida más adecuada, hay que tener en cuenta diversos factores, como la relevancia del estudio, las características específicas del sistema analizado y los objetivos de la investigación.

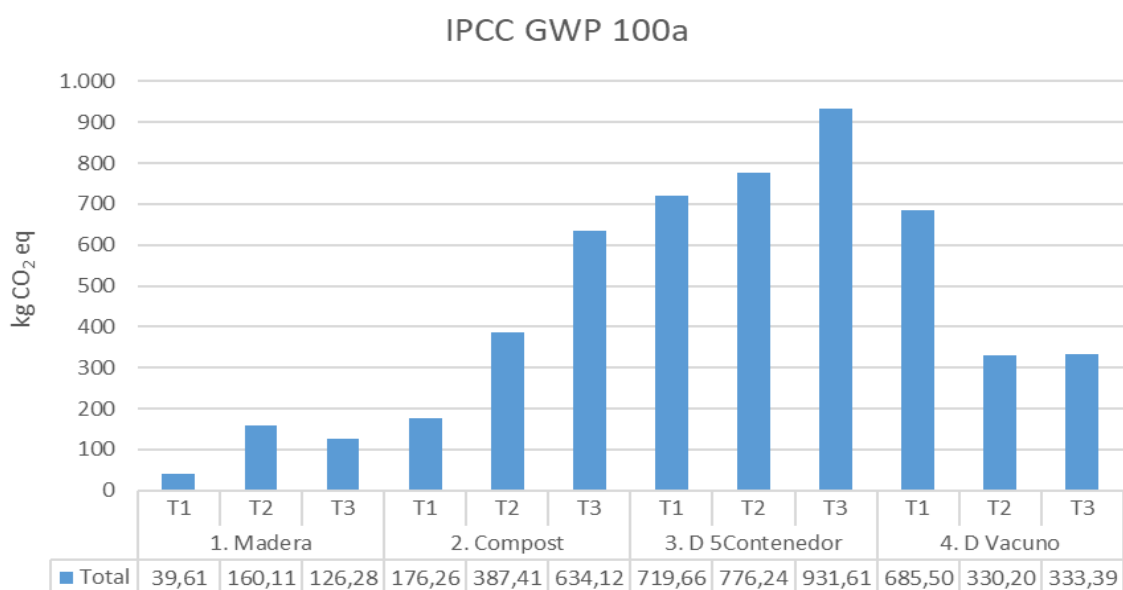
En este contexto, al buscar realizar una comparación del impacto ambiental vinculado a distintos tipos de residuos, se empleará el método IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) y el método ReCiPe ya que, al combinar ambos enfoques, se obtiene una perspectiva más completa y detallada del impacto ambiental de los residuos, lo que facilita la toma de decisiones informada, mientras el IPCC se enfoca principalmente en evaluar el impacto del cambio climático, el método ReCiPe ofrece una evaluación más integral que considera aspectos como el uso de recursos naturales.

3.1 Evaluación de la huella de carbono

La huella de carbono es un indicador crucial utilizado en la evaluación del impacto ambiental de productos y procesos, basado en las directrices proporcionadas por la metodología IPCC. Se ha utilizado esta metodología reconocida internacionalmente para medir y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con la producción, consumo y disposición de productos y servicios. Estos incluyen gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), que son los principales contribuyentes al calentamiento global.

La Figura 4 muestra una comparación de todos los residuos utilizando el indicador de potencial de calentamiento global (GWP) a 100 años.

Figura 4. Comparativa huella de carbono.



Según los resultados del análisis, se observa que el digestato del quinto contenedor tiene el mayor impacto ambiental, mientras que la madera como residuo muestra el menor impacto. Esta evidencia sugiere que la madera tiene una capacidad inferior para contribuir al calentamiento global en comparación con otros tipos de residuos.

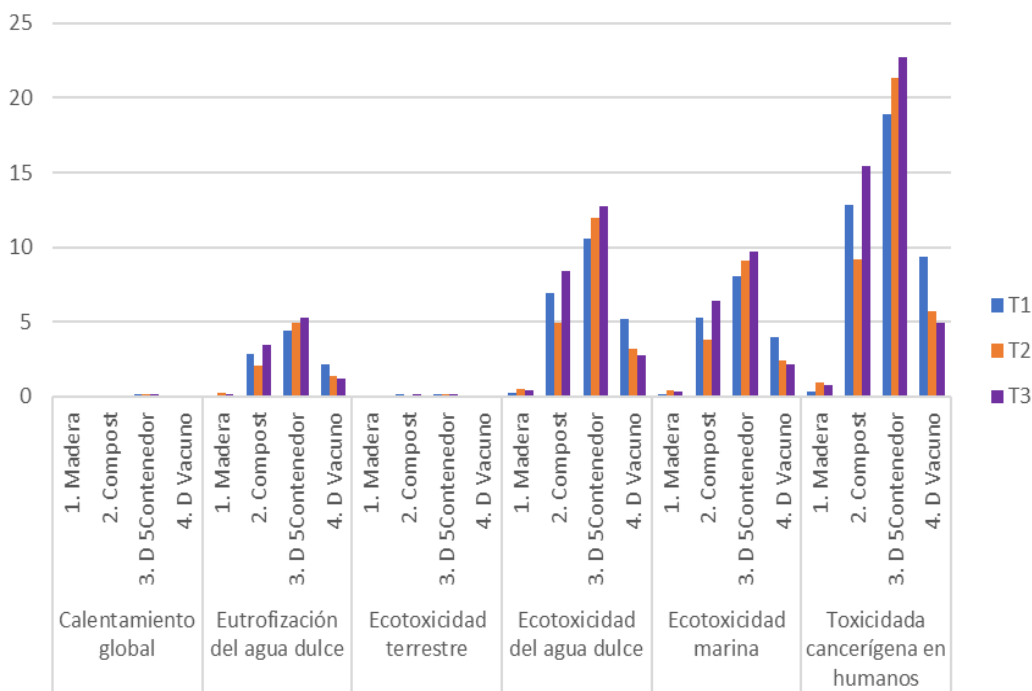
En cuanto a los escenarios 2 y 3, se aprecia un aumento en las emisiones a medida que la temperatura disminuye. Esta relación podría deberse a una disminución en la producción de *biochar* además de la calidad del mismo aunque es esencial examinar más detalladamente los factores que influyen en este fenómeno para obtener una comprensión más precisa de cómo la temperatura y la producción de *biochar* afectan las emisiones.

3.2 Evaluación de puntos medios con ReCiPe

Este enfoque permite modelar y caracterizar los impactos ambientales en 18 categorías que ofrecen una visión detallada de los impactos en etapas intermedias del ciclo de vida, lo que proporciona información valiosa para comprender y gestionar mejor los aspectos ambientales de los productos y procesos evaluados. Este enfoque integral permite identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas en términos de sostenibilidad ambiental.

Tras normalizar los datos obtenidos en SimaPro, se realiza una comparativa relativa entre todas las categorías de impacto que han sido objeto de estudio. En la Figura 5, se presentan las categorías más significativas, incluyendo ecotoxicidad en agua dulce, eutrofización de agua dulce, calentamiento global, toxicidad cancerígena en humanos, ecotoxicidad marina y ecotoxicidad terrestre.

Figura 5. Comparativa puntos medios.

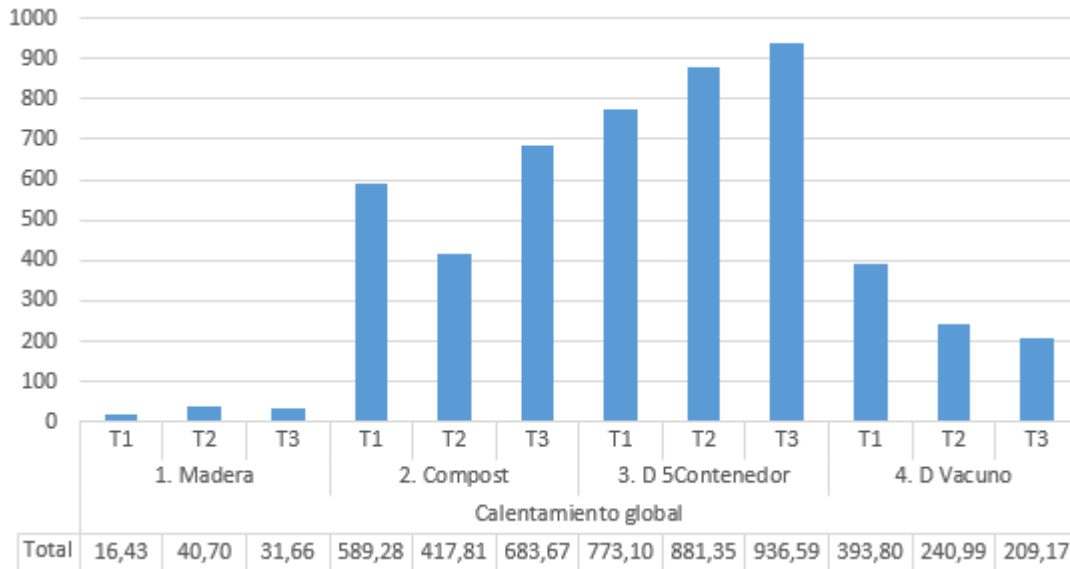


En el contexto del uso de la madera como materia prima, los datos normalizados muestran un impacto prácticamente insignificante, lo cual refleja que este escenario presenta un menor impacto ambiental en comparación con los demás escenarios analizados. Sin embargo, es importante destacar que el escenario 3 sobresale por encima de los demás en

todas las categorías de impacto y en todos los procesos, especialmente para la temperatura T3 (700°C).

A continuación, en la Figura 6 se observa en profundidad el punto medio de calentamiento global, en el que se tienen en cuenta las emisiones de diversos gases de efecto invernadero que contribuyen al aumento de la temperatura media del planeta.

Figura 6. Punto medio: Calentamiento global.



Se puede observar que el escenario de la madera es el que menor impacto conlleva y, por tanto, el que menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en términos del potencial de calentamiento global tiene. Se puede concluir que el proceso de producción de *biochar* a partir de madera como materia prima parece ser más sostenible y menos perjudicial para el medio ambiente en comparación con los otros escenarios analizados.

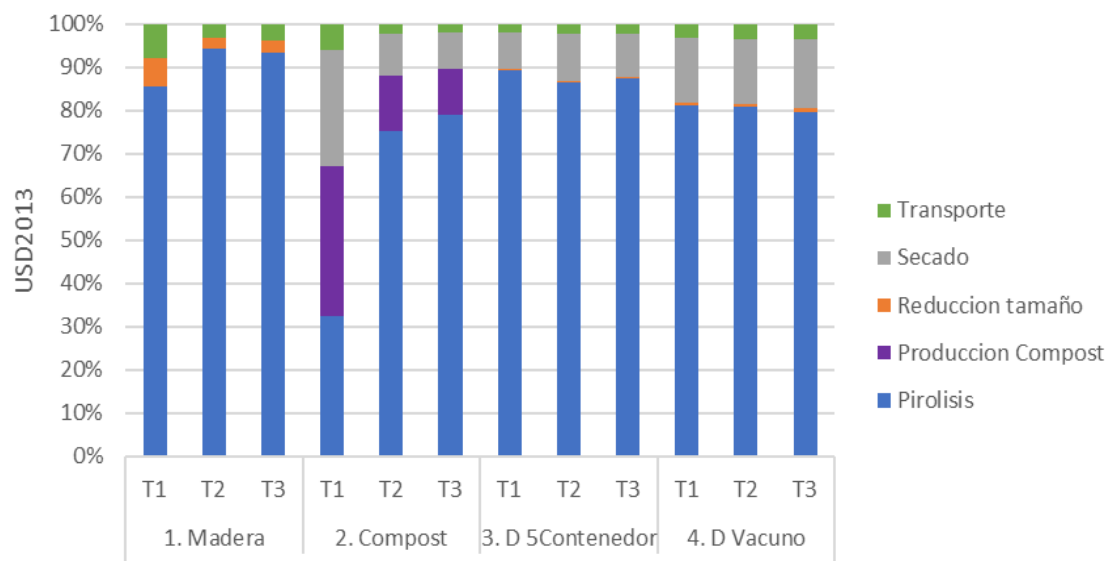
3.3 Evaluación de puntos finales con ReCiPe

Este indicador se centra en los resultados finales de los impactos ambientales y permite evaluar los efectos en la salud humana, los ecosistemas y la disponibilidad de recursos. Al considerar estos aspectos críticos, se obtiene una perspectiva más completa y se pueden identificar las implicaciones a largo plazo de los productos y procesos evaluados.

Como el impacto ambiental asociado al efecto en la salud humana y al efecto en los ecosistemas es insignificante, a continuación, se representa únicamente la categoría disponibilidad de recursos, que cuantifica el agotamiento o la escasez de recursos naturales, y se mide en términos monetarios (\$).

El mayor impacto ambiental se deriva del consumo de combustibles fósiles (Figura 6). Este resultado se debe principalmente al proceso de pirólisis empleado para la producción de *biochar*. Es relevante destacar que la producción de compost también sobresale, y esto puede atribuirse al enfoque de considerarlo como un producto en lugar de un residuo, lo que posiblemente incrementa el agotamiento o la escasez de recursos naturales.

Figura 7. Punto final: Disponibilidad de recursos.



4. Conclusiones y líneas futuras

Las conclusiones extraídas de esta investigación señalan que el proceso de producción de *biochar* a partir de diversos tipos de residuos produce impactos ambientales significativos. Es esencial destacar que la simple sustitución de un material por un residuo no siempre conlleva una mejora medioambiental.

La evaluación de los diferentes escenarios estudiados reveló que la utilización de madera como materia prima para la producción de *biochar* (Escenario 1) resultó ser la opción más sostenible y favorable en términos del proceso. A una temperatura de 700°C, se registró una emisión de 0,13 kg de CO₂eq por cada kilogramo de madera tratada, mientras que, en el escenario menos favorable, a una temperatura de 650°C, se generaron 0,32 kg de CO₂eq. Estos resultados ofrecen una base sólida para la toma de decisiones en futuros proyectos.

Por otro lado, los escenarios que implicaron el uso de compost de caballo (Escenario 2), digestato del quinto contenedor (Escenario 3) y digestato de vacuno (Escenario 4) mostraron mayores impactos ambientales en comparación con el primer escenario mencionado.

Dada la complejidad de evaluar el impacto ambiental, es fundamental utilizar diferentes metodologías para obtener una visión más completa y precisa. En este estudio, se han calculado los kilogramos de CO₂ equivalente utilizando tanto la metodología del IPCC como la de ReCiPe. La comparación entre ambas reveló ciertas diferencias, lo que subraya la necesidad de emplear múltiples enfoques en la evaluación ambiental. Esta práctica no solo permite abordar diversas perspectivas sobre los impactos, sino que también ayuda a mitigar posibles sesgos y mejorar la fiabilidad de los resultados.

Estas conclusiones resaltan la importancia de considerar detenidamente las particularidades de cada tipo de residuo y sus procesos asociados al evaluar su viabilidad como materia prima para la producción de *biochar* con el objetivo de lograr un procesamiento y una transformación más eficientes y menos perjudiciales para el medio ambiente.

Además de estos resultados, se plantean los siguientes pasos futuros:

- Comparar los datos obtenidos en el proceso de producción de *biochar* con el proceso tradicional de obtención de coque empleado en la industria siderúrgica. Evaluar y

comparar ambos procesos permitiría comprender mejor las implicaciones ambientales y energéticas de cada opción, identificando posibles ventajas o desafíos asociados con la sustitución del coque por *biochar* en la producción de acero.

- Ampliar el alcance del análisis: Si bien este estudio se enfocó en la fase de producción de *biochar*, se sugiere considerar una perspectiva más amplia que abarque todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la obtención de las materias primas hasta la generación de energía a partir del *biochar* y su posterior eliminación o reutilización.
- Examinar las implicaciones derivadas del empleo de fuentes de energía alternativas al biogás para el suministro energético del proceso, así como evaluar el impacto en la huella de carbono del sistema al considerar diversas combinaciones de mix energético.

5. Referencias

BP Statistical Review of World Energy. Coal (pp. 42-47). (2019). BP.

DNV. (2022). *Energy transition outlook 2022. A global and regional forecast to 2050*. <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html>

EcoQuery—Ecoinvent. (s. f.). <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/search>

Gutowski, T. G., Allwood, J. M., Herrmann, C., & Sahni, S. (2013). A Global Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling. *Annual Review of Environment and Resources*, 38(1), 81-106. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-041112-110510>

Hauschild, M., Goedkoop, M., Guinee, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M., & De, S. A. (2012, agosto 7). *Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context—Based on existing environmental impact assessment models and factors (International Reference Life Cycle Data System—ILCD handbook)*. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2788/33030>

ISO - *International Organization for Standardization*. (1946). ISO. <https://www.iso.org/home.html>

Metallurgical Coke. (s. f.). <https://www.sciencedirect.com>

Niesler, M., Stecko, J., Stelmach, S., & Kwieceńska-Mydlak, A. (2021). *Biochars in Iron Ores Sintering Process: Effect on Sinter Quality and Emission*. *Energies*, 14(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en14133749>

Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., Berruti, F., & Kozinski, J. A. (2020). A review on subcritical and supercritical water gasification of biogenic, polymeric and petroleum wastes to hydrogen-rich synthesis gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109546. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109546>

Safarian, S., Unnthorsson, R., & Richter, C. (2020). Simulation of small-scale waste biomass gasification integrated power production: A comparative performance analysis for timber and wood waste. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.11591/ijape.v9.i2.pp147-152>

SimaPro | LCA software for informed changemakers. (s. f.). SimaPro. <https://simapro.com/>

Wijayanta, A. T., Alam, Md. S., Nakaso, K., Fukai, J., Kunitomo, K., & Shimizu, M. (2014). Combustibility of *biochar* injected into the raceway of a blast furnace. *Fuel Processing Technology*, 117, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.01.012>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

