



PUBLICACIÓN:

“TRANSFORMAR RESIDUOS PLÁSTICOS EN MATERIALES DE CARBONO: UNA APUESTA INNOVADORA HACIA LA ECONOMÍA CIRCULAR.”

CÁTEDRA FUNDACIÓN REPSOL DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA
EN LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO SOBRE ECONOMÍA
CIRCULAR

Autor: Carlos Daniel Bayá, Estudiante del Aula de la Universidad del País Vasco

Autor: Erlantz Lizundi, Profesor del Aula de la Universidad del País Vasco

Resumen de la Publicación:

Transformando los residuos plásticos en materiales de carbono para impulsar la economía circular y reducir su impacto ambiental.

Introducción

La crisis global del plástico no deja de agravarse: cada año se generan más de 400 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales apenas un 10 % se recicla de manera efectiva. Frente a este escenario, urge explorar soluciones innovadoras que permitan transformar este problema ambiental en una oportunidad sostenible.

En esta línea, el proyecto desarrollado en el marco del Aula de Transición Energética Fundación Repsol investiga una alternativa prometedora: la carbonización térmica de residuos plásticos. A través de este proceso, plásticos convencionales como el tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) pueden convertirse en materiales carbonosos con propiedades funcionales que tienen un gran potencial aplicación en áreas estratégicas como almacenamiento energético, captura de CO₂ o tratamiento de aguas contaminadas.

Mediante ensayos experimentales, se estudió cómo afectan diferentes variables —como el tipo de plástico, el tiempo de tratamiento o la adición de un catalizador (ferroceno)— al rendimiento del proceso de carbonización y a la estructura de los productos obtenidos. Los resultados muestran que el PET ofrece los mayores rendimientos en carbono, especialmente cuando se combina con ferroceno, mientras que el PP genera menos residuo sólido.

Además, se realizó un análisis del ciclo de vida para medir el impacto climático del proceso. Se comprobó que las condiciones más sostenibles —con menores emisiones de CO₂— se dan cuando se trabaja con PET, durante tiempos cortos (3 h) y con catalizador, lo que posiciona esta vía como una alternativa más limpia frente a la incineración o el vertido.

Esta investigación sienta las bases para desarrollar tecnologías de upcycling viables y escalables, capaces de dar una nueva vida a los residuos plásticos, alineándose con los principios de circularidad, innovación y sostenibilidad.

Revalorización de plásticos convencionales mediante pirolisis para desarrollar materiales basados en carbono renovable

Resumen Ejecutivo

Transformar residuos plásticos en materiales de carbono: una apuesta innovadora hacia la economía circular

La crisis global del plástico no deja de agravarse: cada año se generan más de 400 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales apenas un 10 % se recicla de manera efectiva. Frente a este escenario, urge explorar soluciones innovadoras que permitan transformar este problema ambiental en una oportunidad sostenible.

En esta línea, el proyecto desarrollado en el marco del Aula de Transición Energética Fundación Repsol investiga una alternativa prometedora: la carbonización térmica de residuos plásticos. A través de este proceso, plásticos convencionales como el tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) pueden convertirse en materiales carbonosos con propiedades funcionales que tienen un gran potencial aplicación en áreas estratégicas como almacenamiento energético, captura de CO₂ o tratamiento de aguas contaminadas.

Mediante ensayos experimentales, se estudió cómo afectan diferentes variables —como el tipo de plástico, el tiempo de tratamiento o la adición de un catalizador (ferroceno)— al rendimiento del proceso de carbonización y a la estructura de los productos obtenidos. Los resultados muestran que el PET ofrece los mayores rendimientos en carbono, especialmente cuando se combina con ferroceno, mientras que el PP genera menos residuo sólido.

Además, se realizó un análisis del ciclo de vida para medir el impacto climático del proceso. Se comprobó que las condiciones más sostenibles —con menores emisiones de CO₂— se dan cuando se trabaja con PET, durante tiempos cortos (3 h) y con catalizador, lo que posiciona esta vía como una alternativa más limpia frente a la incineración o el vertido.

Esta investigación sienta las bases para desarrollar tecnologías de upcycling viables y escalables, capaces de dar una nueva vida a los residuos plásticos, alineándose con los principios de circularidad, innovación y sostenibilidad.

Revalorización de plásticos convencionales mediante pirolisis para desarrollar materiales basados en carbono renovable

Contexto divulgativo

La contaminación por plásticos representa uno de los mayores desafíos medioambientales de nuestra era. La producción global de plásticos sigue en aumento, mientras que las tasas de reciclaje efectivo se mantienen por debajo del 10%. La acumulación de residuos plásticos en vertederos y ecosistemas naturales, junto con la dependencia de recursos fósiles para su producción, exige soluciones innovadoras que permitan integrar este tipo de materiales en un modelo de economía circular.

Este trabajo se inscribe en esta búsqueda, explorando la carbonización térmica de residuos plásticos como una vía para su revalorización en materiales que contengan carbono renovable (carbono que se origina de la biomasa, captura de CO₂, o reciclado), y que además sean funcionales para ser aplicados en diversas áreas. En lugar de tratar los plásticos al final de su vida útil como residuos sin valor, se propone transformarlos en productos útiles y con potencial aplicación en campos como la energía (a modo de electrodo en supercondensadores), la captura de CO₂ (gracias a su alta porosidad) o la adsorción de contaminantes (por ejemplo, para contaminantes emergentes).

Para ello se han estudiado experimentalmente las condiciones de carbonización (proceso derivado de la pirólisis) en un reactor a presión (Parr 4740) aplicadas a tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP) y una mezcla de ambos plásticos. Con el objetivo de maximizar el rendimiento carbonoso y mejorar la estructura del producto obtenido, se han investigado variables como el tiempo de residencia (3 y 8 horas) y el uso de ferroceno como catalizador en concentraciones del 0%, 0,2 % y 5,0 % en masa, entre otras.

Los resultados mostraron que el PET presentó los mayores rendimientos a carbono, seguido por la mezcla PET/PP y, finalmente, el PP. La presencia de ferroceno a concentraciones del 5,0 % tuvo un efecto positivo tanto en el rendimiento en masa como en la morfología estructural del residuo sólido carbonoso, favoreciendo la formación de fases amorfas según los análisis de difracción de rayos X (XRD). Por el contrario, el uso del 0,2 % de catalizador no presentó mejores significativas respecto a la condición no catalítica, y en algunos casos incluso fue menos efectivo.

De forma complementaria, se ha llevado a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) para evaluar el impacto ambiental de los diferentes escenarios de carbonización de materiales plásticos. El estudio se centró en el impacto del cambio climático (Global Warming Potential, GWP) y reveló que las emisiones asociadas al tratamiento oscilan entre 0,6 y 2,2 kg de CO₂ equivalente por kg de plástico tratado. Las emisiones dependen del tipo de plástico, el tiempo de residencia y la presencia del catalizador. Las configuraciones más eficientes desde el punto de vista ambiental fueron

aquellas que utilizaron PET con ferroceno al 5,0 % y el tratamiento se extendió durante 3 horas, consolidándose como una opción interesante frente a métodos tradicionales de gestión de residuos como la incineración o el vertido.

Este estudio confirma que la carbonización de residuos plásticos, aún sin atmósfera inerte ni etapas de activación del producto, puede ser una alternativa viable técnica y ambientalmente. Además, el hecho de que los materiales carbonosos tengan posibles aplicaciones en áreas emergentes, hace que estos procesos sean potencialmente económicos. La obtención de materiales carbonosos sin necesidad de pretratamientos complejos, utilizando condiciones accesibles y catalizadores comerciales, abre nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías de *upcycling* (transformación de materiales que ya no son útiles en otros de mayor valor ecológico/económico) sencillas, escalables y sostenibles.

La crisis del plástico: un problema creciente y mal gestionado

La producción de plásticos ha aumentado de forma exponencial en las últimas décadas. En la actualidad se generan más de 440 millones de toneladas de plásticos al año, y las proyecciones indican que esta cifra podría incrementarse más de un 30% para el año 2050 si no se adoptan medidas (ver **Figura 1**) [1].

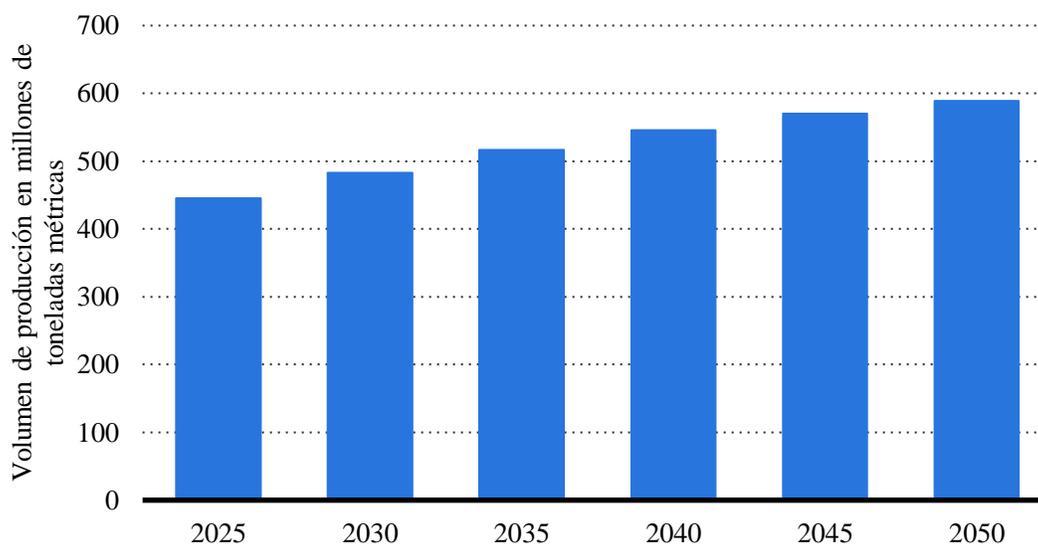


Figura 1 Proyección de la producción global de plásticos. Fuente: *Statista. (2025). Global plastic waste.* <https://www.statista.com/study/65164/plastic-waste-worldwide/>

Este crecimiento tan acelerado se debe a la versatilidad, bajo coste y ligereza de estos materiales, que han sido integrados en casi todos los sectores industriales y uso doméstico. Sin embargo, esta dependencia masiva de productos plásticos con ciclos de vida muy cortos ha generado una acumulación crítica de residuos a escala global.

A pesar de las numerosas campañas de concienciación presentes en nuestro día a día, el reciclaje de plásticos sigue siendo muy limitado. Actualmente, en 2025, la producción global de residuos plásticos alcanza los 420 millones de toneladas métricas al año, y se estima que esta cifra superará los 610 millones en 2040 (ver **Figura 2**). Sin embargo, solo alrededor del 10 % de estos residuos se recicla de forma efectiva en la actualidad, mientras que el resto se incinera, se deposita en vertederos o termina contaminando el medio ambiente por falta de gestión [2].

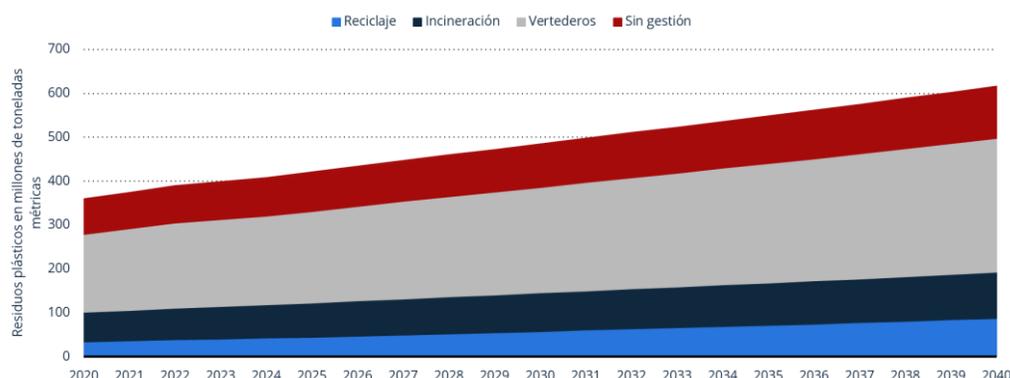


Figura 2 Proyección de residuos plásticos a nivel global. Fuente: Statista. (2025). *Global plastic waste*. <https://www.statista.com/study/65164/plastic-waste-worldwide/>

Esta gestión deficiente ha derivado en problemas ambientales de gran magnitud como la contaminación de océanos y suelos, dispersión de microplásticos, emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y agotamiento de recursos materiales. Los datos globales recientes sobre la gestión de este tipo de residuos muestran que, a nivel mundial, el 46 % de los residuos plásticos acaban de en vertederos, un 17 % se incinera, solo el 15 % se recoge para reciclaje y el 22 % restante se gestiona de forma inadecuada o ni siquiera se recoge (**Figura 3**).

Al diferenciar por regiones, los países de la OCDE presentan mayores tasas de vertido (53 %) e incineración (25 %), con un 16 % de reciclado y solo un 6 % mal gestionado. En contraste, los países no pertenecientes a la OCDE muestran una situación más crítica y es que un 37 % de los residuos plásticos no se gestiona adecuadamente, mientras que apenas el 15 % se recoge para reciclaje, el 9% de incinera y el 39 % se destina a vertederos. Estos datos reflejan un panorama desigual y subrayan la necesidad urgente de estrategias innovadoras y más eficientes para la gestión de residuos plásticos a escala global [2].

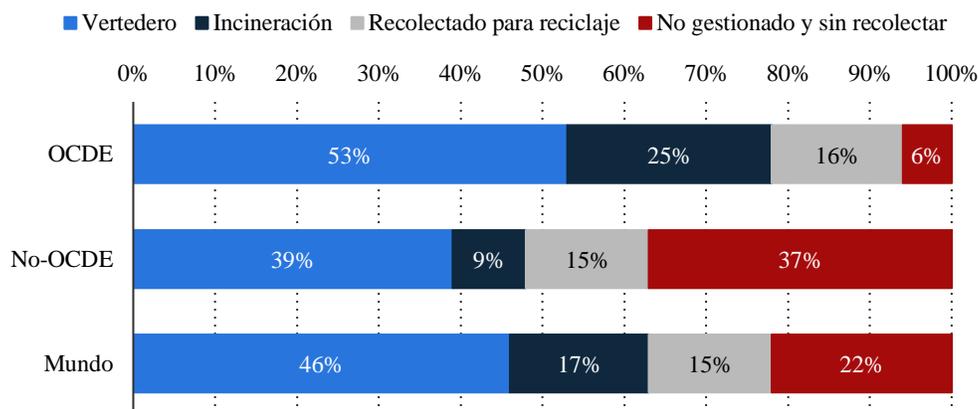


Figura 3 Gestión global de residuos plásticos por región.

Debido a las limitaciones del reciclaje mecánico, que requiere residuos homogéneos y limpios, así como a las bajas tasas de reciclaje actuales, es necesario explorar tecnologías alternativas que permitan una gestión más eficiente y sostenible de los residuos plásticos. La carbonización, un proceso derivado de la pirólisis, se presenta como una estrategia prometedora, ya que transforma plásticos en materiales carbonáceos sólidos con valor funcional, contribuyendo al concepto de *upcycling* y al cierre de ciclos materiales. En este trabajo se ha evaluado la viabilidad técnica y ambiental de la carbonización de residuos plásticos (PET, PP y mezclas), mediante ensayos experimentales a escala laboratorio con ferroceno como catalizador, complementados con análisis estructurales por difracción de rayos X y evaluación del impacto ambiental a través de Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés).

Metodología y resultados

Reactivos empleados

Para el desarrollo experimental se utilizaron tres tipos de materias primas plásticas: tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP) y una mezcla 50:50 en masa de ambos polímeros. Todos ellos fueron empleados en forma de pellets comerciales. Debido a la dificultad de triturar estos pellets, se optó por preformar láminas delgadas mediante prensado térmico a 160 °C para el PP y 260 °C para el PET. Posteriormente las láminas fueron recortadas en fragmentos de menor tamaño para facilitar su manipulación y carga en el reactor (**Figura 4**). Como aditivo catalítico se empleó ferroceno de calidad comercial, en dos concentraciones de 0,2 % y 5,0 % en peso respecto a la masa total del plástico.



Figura 4 Láminas prensadas y recortadas de PET.

Reactor y condiciones de operación

Las experiencias se llevaron a cabo en un reactor no agitado Parr 4740 HT/HP de acero inoxidable, con capacidad interna de 25 ml, diseñado para soportar temperaturas de hasta 538 °C y presiones de hasta 127 bar. No obstante, debido a la limitación del disco de ruptura, cuya integridad puede verse comprometida por encima de 500 °C y por razones de seguridad la temperatura de operación se fijó en 450 °C.



Figura 5 Reactor Parr en la mufla.

Una vez cargado con la muestra (plástico y catalizador), el reactor se cerró herméticamente sin atmósfera inerte y se introdujo en una mufla para su calentamiento. El sistema se calentó a una tasa de 8 °C/min hasta alcanzar los 450 °C, manteniéndose a esta temperatura durante el tiempo de residencia definido para cada ensayo (3 h u 8 h). Finalizada la reacción, el reactor se dejó enfriar al aire ambiente durante toda la noche y posteriormente se abrió y se recuperó el producto sólido carbonáceo para su pesado y cálculo del rendimiento en masa.

Diseño experimental

El diseño contempló tres niveles de concentración de catalizador (0 %, 0,2 % y 5,0 % en peso de ferroceno) y dos tiempos de residencia (3 h y 8 h), con el objetivo de evaluar la influencia de estos parámetros sobre el rendimiento y la estructura del material carbonáceo obtenido.

La elección de las concentraciones de ferroceno respondió a criterios de viabilidad y relevancia para el rango de temperatura empleado (450 °C). A diferencia de estudios destinados a la obtención de nanomateriales o grafeno, que operan entre 700 – 800 °C con concentraciones de 20 – 35 % [3, 4], este trabajo buscó condiciones más moderadas que permitiesen observar el efecto catalítico sin introducir excesos de hierro en el sistema ni alterar drásticamente la dinámica de la carbonización.

Las condiciones ensayadas se resumen en la **Tabla 1**, donde cada código identifica el tipo de plástico, el porcentaje de ferroceno y el tiempo de reacción.

Tabla 1 Diseño experimental del proceso.

<i>Código</i>	<i>Tipo de plástico</i>	<i>Ferroceno (%)</i>	<i>Tiempo de reacción (h)</i>	<i>N.º Ensayo</i>
PET1	PET	0,0	3	1
PET2	PET	0,2	3	2
PET3	PET	5,0	3	3
PET4	PET	0,0	8	4
PET5	PET	0,2	8	5
PET6	PET	5,0	8	6
PP1	PP	0,0	3	7
PP2	PP	0,2	3	8
PP3	PP	5,0	3	9
PP4	PP	0,0	8	10
PP5	PP	0,2	8	11
PP6	PP	5,0	8	12
MIX1	PET+PP (50/50)	0,0	8	13
MIX2	PET+PP (50/50)	0,2	8	14
MIX3	PET+PP (50/50)	5,0	8	15

Discusión de resultados obtenidos

En primer lugar, los ensayos de laboratorio para el PET fueron los que mostraron un rendimiento notablemente superior al del resto de materiales analizados. Este rendimiento se debe principalmente a su estructura química aromática y a la presencia de oxígeno en sus cadenas, que facilitan la formación de productos carbonáceos incluso a temperaturas moderadas como las empleadas en los ensayos (450 °C vs. más de 600 °C empleados en literatura) [5] (**Figura 6**).

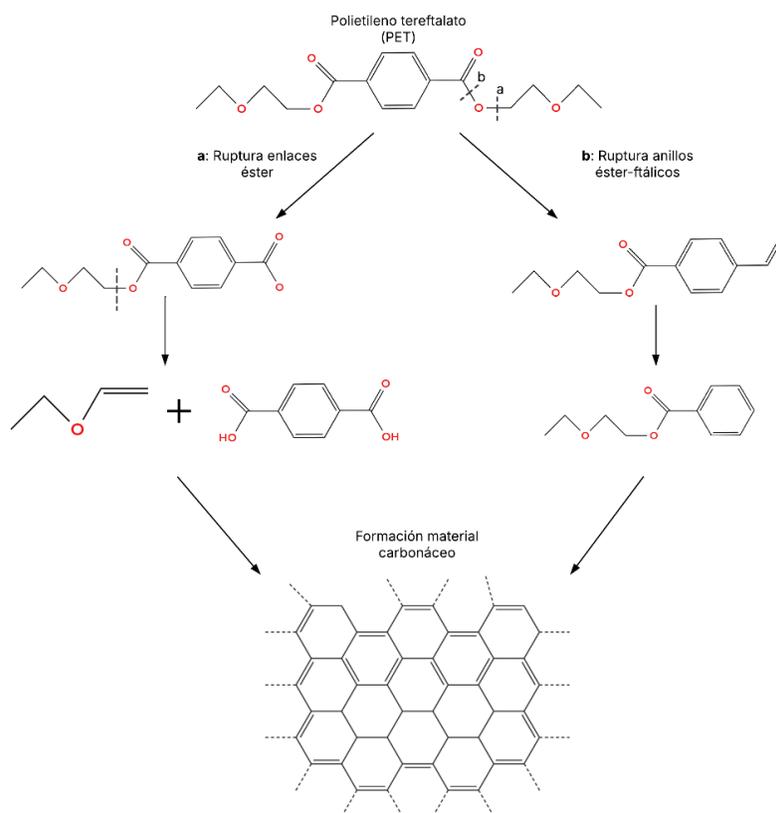


Figura 6 Mecanismo de carbonización del PET. Adaptado de: *Chen, S., Liu, Z., Jiang, S., & Hou, H. (2019). Carbonization: A feasible route for reutilization of plastic wastes. The Science of the Total Environment, 710, 136250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136250>.*

El rendimiento máximo obtenido con PET destaca la capacidad de este polímero para generar un material carbonáceo estable y de mayor calidad, alineándose con la literatura científica que reporta su favorable comportamiento durante la carbonización debido a la formación de compuestos aromáticos que promueven la estabilización del carbono [6]. Al recolectar el material del reactor, luego de dejarlo enfriar durante toda la noche, no se detectó la presencia de líquidos en el producto, ni excesiva generación de gases dentro del reactor.



Figura 7 Carbonización del PET3.



Figura 8 Carbonización del PP3.

Por otro lado, el PP presentó un comportamiento diferente, caracterizado por una predominancia de productos líquidos y gaseosos, con rendimientos de material carbonáceo considerablemente inferiores. Este resultado es consistente con la naturaleza no oxigenada y alifática del PP, que dificulta la formación de estructuras carbonáceas estables sin la intervención de catalizadores. Los resultados sugieren que, a la temperatura y condiciones empleadas, el proceso se asemeja más a una pirólisis convencional que, a una carbonización estricta, coincidiendo con lo reportado por Maqsood et al. (2021) [7]. Estos autores encontraron rendimientos a char bajos para PP sometido a pirólisis lenta a temperaturas similares (300 °C y 430 °C).



Figura 9 Mezcla de PP y PET recortado.

Finalmente, al analizar la mezcla de PET y PP (MIX), se observó un efecto sinérgico que mejora el rendimiento de material carbonáceo en comparación con el PP puro. La presencia de PET actúa como estabilizador al introducir grupos oxigenados que favorecen la formación de estructuras entrelazadas de carbono, estabilizando las cadenas provenientes del PP y mejoran así el rendimiento global del proceso. Este fenómeno está respaldado por Ma et al. (2024) [8], quienes señalan que la incorporación de grupos oxigenados provenientes de plásticos como el PET es esencial para mejorar la formación de material carbonáceo a partir de plásticos no oxigenados como el PP.

oxigenados como el PP.

Cuando el producto se recolectó, no se evidenció la presencia significativa de líquidos ni generación excesiva de gases, mostrando un comportamiento que se asemeja más al obtenido en los ensayos con el PET.



Figura 10 Carbonización del MIX3.

En la **Tabla 2**, se presentan los rendimientos obtenidos en los distintos ensayos realizados. Los valores reflejan la eficiencia en la obtención de material carbonáceo bajo las condiciones experimentales establecidas. Los rendimientos fueron calculados como la relación entre la masa de material carbonáceo recuperado y la masa inicial de plástico cargada en el reactor. En el caso particular de los ensayos con PP, la masa final corresponde al material sólido húmedo, una vez se descartó el líquido generado durante la reacción.

Tabla 2 Rendimientos obtenidos de los ensayos de laboratorio.

<i>Ensayo</i>	<i>Tipo de plástico</i>	<i>Ferroceno (%)</i>	<i>Tiempo de reacción (h)</i>	<i>Masa inicial (g)</i>	<i>Masa final (g)</i>	<i>Rendimiento (%)</i>
PET1	PET	0,0	3	2,000	1,217	60,85
PET2	PET	0,2	3	2,001	1,283	64,12
PET3	PET	5,0	3	2,001	1,442	72,06
PET4	PET	0,0	8	2,071	1,348	65,09
PET5	PET	0,2	8	2,002	1,327	66,28
PET6	PET	5,0	8	2,001	1,454	72,66
PP1	PP	0,0	3	2,048	0,111	5,42
PP2	PP	0,2	3	2,007	0,089	4,43
PP3	PP	5,0	3	2,001	0,157	7,85
PP4	PP	0,0	8	2,010	0,133	6,62
PP5	PP	0,2	8	2,004	0,111	5,54
PP6	PP	5,0	8	2,002	0,281	14,04
MIX1	PET+PP (50/50)	0,0	8	2,014	0,838	41,61
MIX2	PET+PP (50/50)	0,2	8	2,001	0,838	41,88
MIX3	PET+PP (50/50)	5,0	8	2,001	1,076	53,77

Discusión de resultados del análisis XRD

En los productos carbonáceos derivados del PET, los difractogramas revelaron un pico ancho y poco definido alrededor de $2\theta \approx 25-26^\circ$, característico del carbono amorfo con bajo grado de orden estructural [9] (**Figura 11**). En la muestra PET6, que contenía ferroceno como catalizador, se detectaron picos agudos correspondientes a fases cristalinas, principalmente magnetita (Fe_3O_4), producto de la descomposición térmica del ferroceno durante la reacción, tal y como se aprecia en la **Figura 12**.

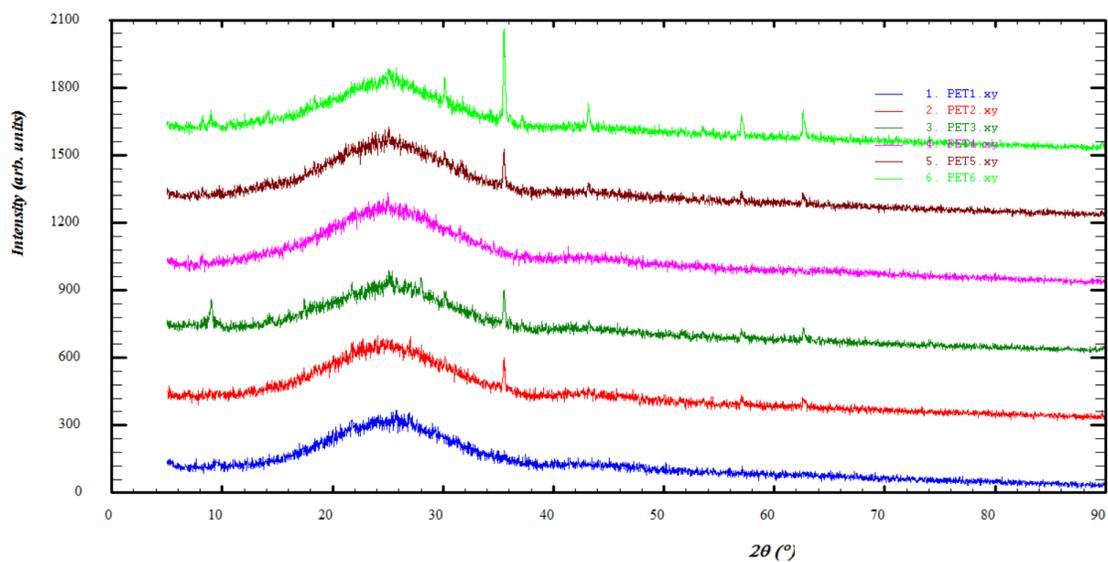


Figura 11 Resultados del análisis XDR para ensayos con PET.

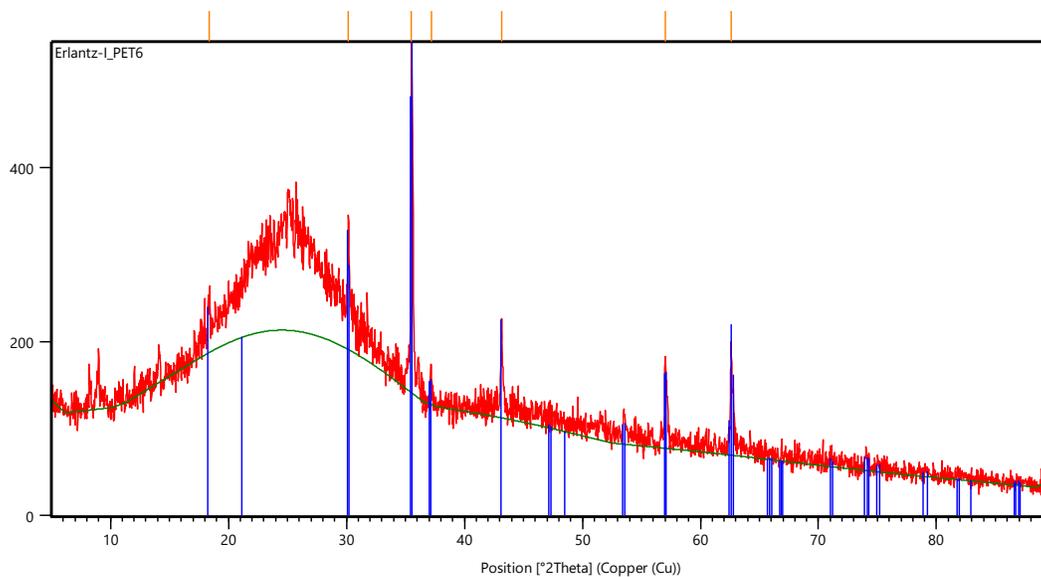


Figura 12 Difractograma obtenido para la muestra PET6.

La formación de magnetita fue confirmada comparando los picos experimentales con la carta patrón de Fe_3O_4 (**Figura 13**). Este resultado sugiere que la descomposición del PET generó un ambiente ligeramente oxidante en el reactor debido a la liberación de subproductos como CO , CO_2 y H_2O , favoreciendo la formación de esta fase cristalina [10, 11].

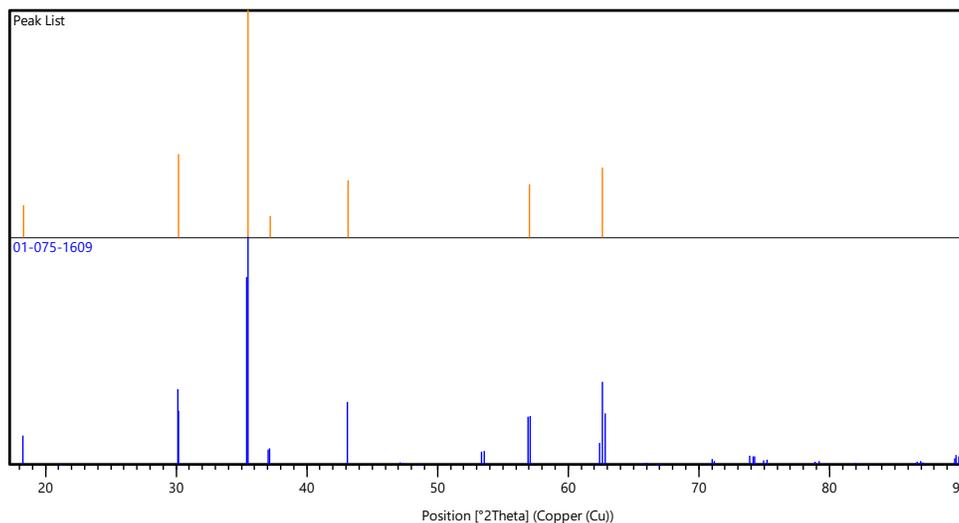


Figura 13 Comparación de los picos experimentales del PET6.

En las muestras derivadas del PP, también predominó el carbono amorfo con bajo orden estructural, evidenciado por el amplio pico en torno a $25\text{-}26^\circ$ [9]. En los ensayos con mayor concentración de ferroceno (PP3 y PP6), se observaron picos agudos asociados a fases cristalinas como carburo de hierro (Fe_3C) y óxido de hierro (FeO), como se observa en las **Figuras 14** y **15** respectivamente. Este hecho indica que la atmósfera durante la carbonización fue más reductora, posiblemente debido a la estructura no oxigenada del PP y la liberación de hidrocarburos, lo que facilitó la formación de estas fases menos oxidadas [6, 10].

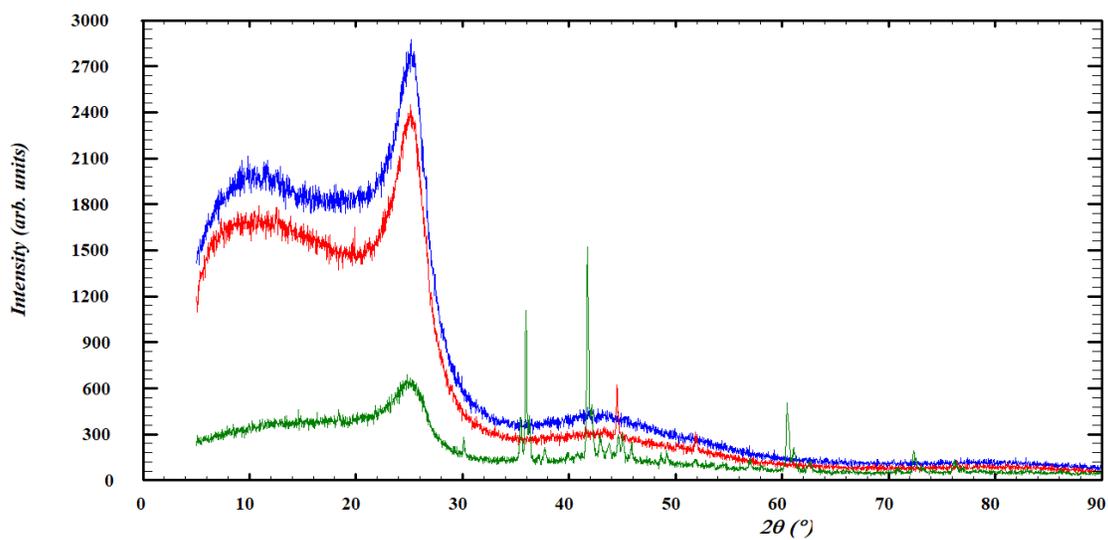


Figura 14 Resultados del análisis XDR para los ensayos PP1, PP2 y PP3.

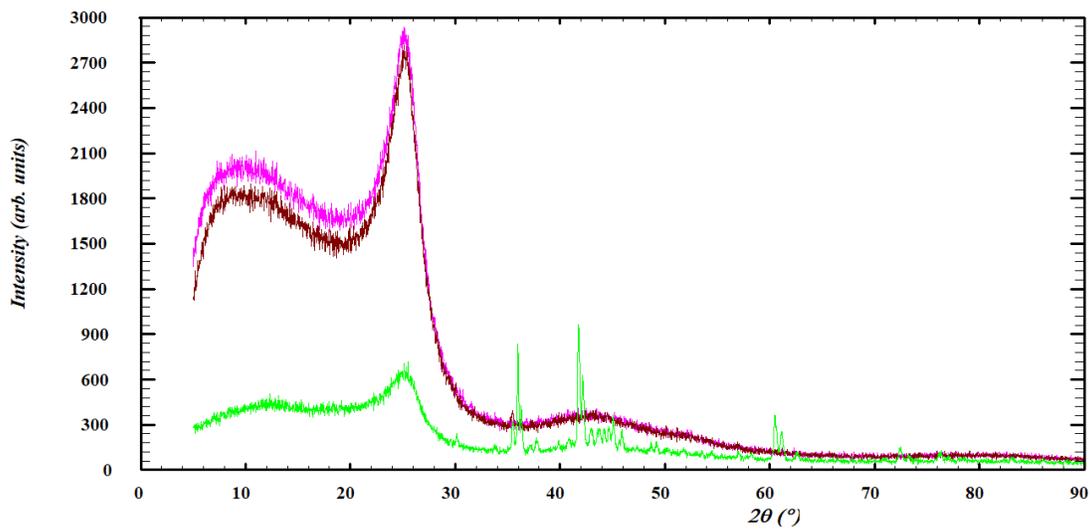


Figura 15 Resultados del análisis XDR para los ensayos PP4, PP5 y PP6.

En la muestra PP3, la identificación de Fe_3C , FeO y Fe_3O_4 se confirmó con la comparación a cartas patrón, como se puede constatar en las **Figuras 16 y 17**.

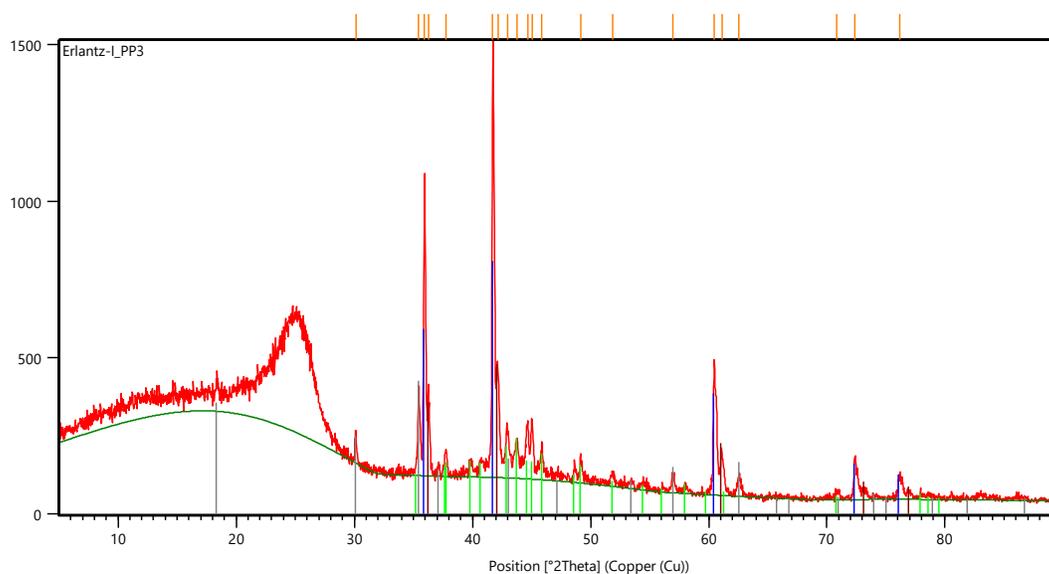


Figura 16 Difractograma obtenido para la muestra PP3.

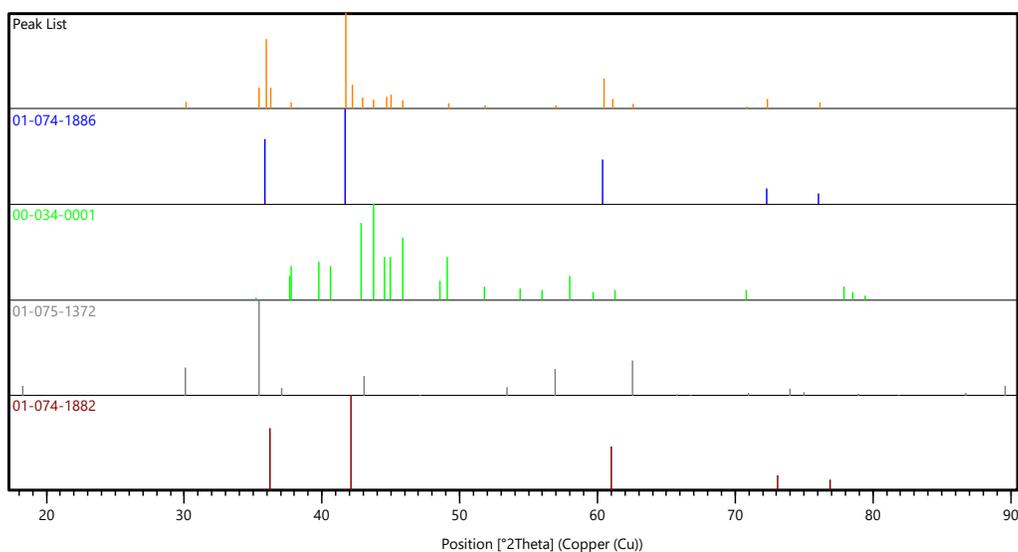


Figura 17 Comparación de los picos experimentales del PP3.

Para la mezcla PET+PP (MIX), también se observó predominancia de carbono amorfo con bajo grado de orden estructural [9] (**Figura 18**). En la muestra MIX3 con ferroceno, se

detectaron picos cristalinos correspondientes a magnetita (Fe_3O_4), similares a los observados en el PET6, como se puede apreciar en la **Figura 19**. Esto confirma que la presencia de PET en la mezcla favorece un ambiente más oxidante durante la reacción, limitando la formación de carburos y óxidos reducidos, y evidenciando la influencia del tipo de polímero en las fases cristalinas formadas [10, 11].

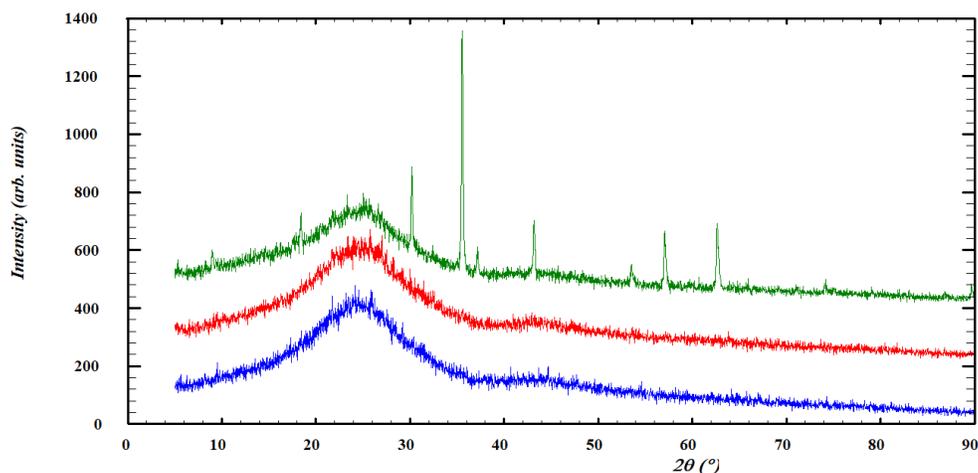


Figura 18 Resultados del análisis XDR para ensayos MIX.

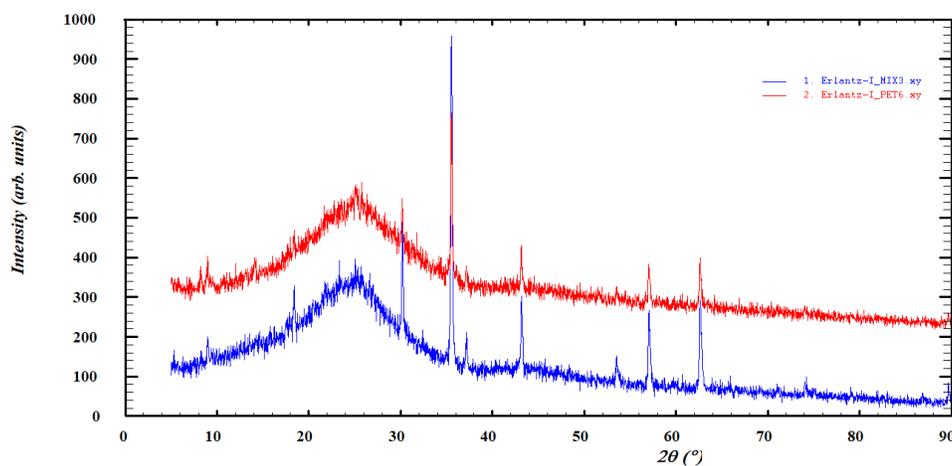


Figura 19 Comparación del MIX3 con PET6.

En resumen, el uso de ferroceno como catalizador influyó tanto en el proceso de carbonización como en la formación de fases inorgánicas cristalinas (óxidos y carburos de hierro) cuya naturaleza depende del ambiente químico generado durante la reacción. Aunque la matriz predominante en todas las muestras fue carbono amorfo, la coexistencia con estas fases cristalinas podría aportar propiedades funcionales interesantes para futuras aplicaciones [4].

Discusión de los resultados del Análisis de Ciclo de Vida

Para evaluar el impacto ambiental del proceso de carbonización de plásticos, se llevó a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés). El ACV se aplicó a los 15 ensayos experimentales, empleando como indicador el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) expresado en CO₂ equivalente por kilogramo de plástico tratado (kg CO₂-eq/kg PT). El análisis consideró variables clave como el tipo de plástico, el tiempo de residencia y la concentración de catalizador. Los resultados del LCA muestran que el GWP aumenta notablemente con el tiempo de residencia (**Tabla 3**). Por ejemplo, en ausencia de catalizador y con 3 horas de reacción, el GWP fue de 0,812 kg CO₂-eq/kg PT para PET y 0,786 para PP, ambos en el rango más bajo registrado (ver **Figura 20**).

Tabla 3 GWP (kg CO₂-eq / kg) en función del tipo de plástico, tiempo de residencia y concentración de ferroceno.

Tiempo (h)	Ferroceno (%)	PET	PP	MIX
3	0,0	0,812	0,786	-
3	0,2	0,812	0,803	-
3	5,0	0,840	0,833	-
8	0,0	2,014	2,068	2,075
8	0,2	2,084	2,076	2,090
8	5,0	2,113	2,105	2,118

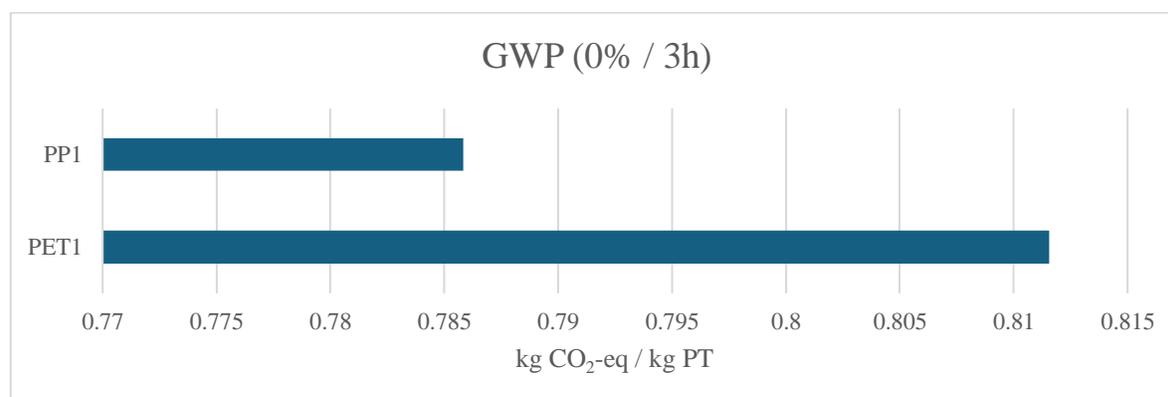


Figura 20 GWP para PP1 y PET1 (0 % ferroceno, 3 h).

Al extender el tiempo a 8 horas, el impacto se eleva por encima de 2,0 kg CO₂-eq/kg PT para todos los plásticos, alcanzando 2,075 para la mezcla PET+PP sin catalizador, que presenta el valor más alto debido a la energía adicional requerida para el laminado de ambos componentes (**Figura 21**).

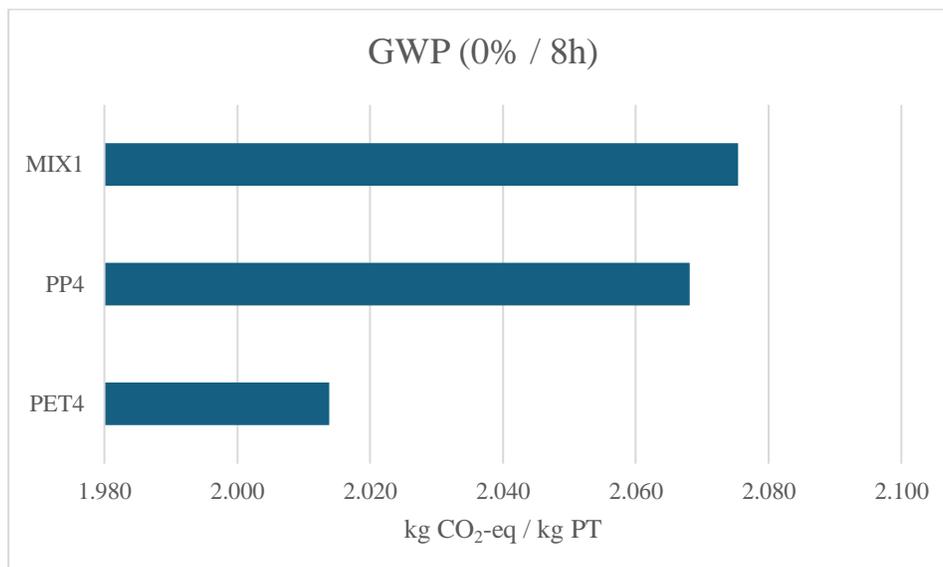


Figura 21 GWP para MIX1, PP4 y PET4 (0 % ferroceno, 8 h).

En cuanto a la influencia del catalizador, la variación en la concentración de ferroceno mostró un efecto marginal sobre el GWP, con incrementos pequeños y poco significativos en comparación con la influencia del tiempo. Por ejemplo, para 3 horas y PET, el GWP se incrementó ligeramente de 0,812 a 0,840 kg CO₂-eq/kg PT entre la ausencia y la máxima concentración de ferroceno. Esta tendencia se mantiene para los demás plásticos y tiempos de reacción (**Figura 22**).

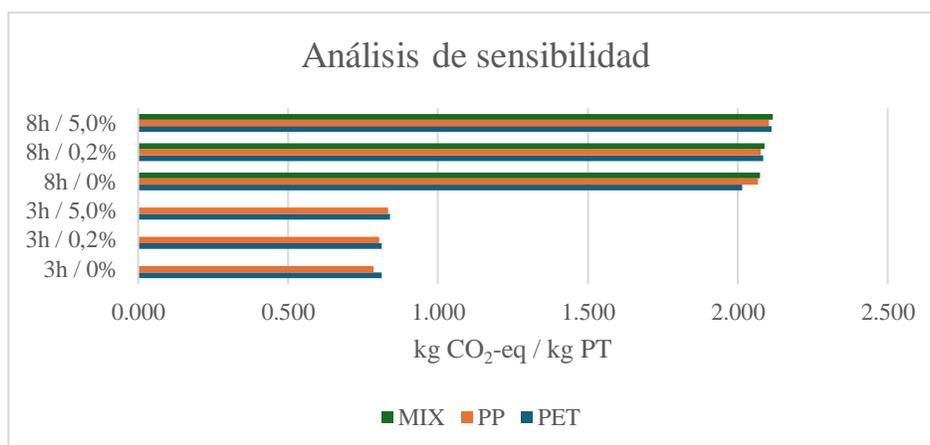


Figura 22 Sensibilidad conjunta al tiempo y concentración de ferroceno (PET, PP y MIX).

El análisis general confirma que el tiempo de residencia es el parámetro que determina el impacto ambiental del proceso, principalmente asociado al consumo energético para mantener las condiciones térmicas durante períodos prolongados. En cambio, ni el tipo de polímero ni la concentración de catalizador afectan de manera sustancial el potencial de calentamiento global, lo que otorga flexibilidad al proceso en cuanto a la materia prima y al uso del ferroceno desde una perspectiva ambiental.

Conclusiones y futuras líneas de investigación

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la carbonización de residuos plásticos como PET, PP y sus mezclas, bajo condiciones controladas y con la adición de ferroceno como catalizador, permite obtener materiales carbonáceos con un bajo grado de orden estructural y la formación de fases cristalinas relacionadas con la descomposición del catalizador. El análisis mediante difracción de rayos X ha confirmado la presencia predominante de carbono amorfo junto con fases inorgánicas como óxidos y carburos de hierro en las muestras catalizadas.

Desde el punto de vista ambiental, el análisis de ciclo de vida mostró que el tiempo de residencia en el proceso es el factor que más influye en el impacto climático, mientras que la concentración de ferroceno y el tipo de plástico presentan una influencia menor. Además, se estima que, si la energía empleada en el proceso proviniera de fuentes renovables, la huella ambiental podría reducirse significativamente, haciendo de esta tecnología una alternativa más verde y sostenible.

Para futuros trabajos, se recomienda optimizar las condiciones operativas para maximizar el rendimiento del material carbonáceo y minimizar el consumo energético, además de explorar la funcionalización de los productos obtenidos para aplicaciones específicas. Asimismo, resulta conveniente ampliar los estudios a residuos plásticos más heterogéneos y representativos de flujos reales, así como evaluar la influencia de diferentes catalizadores y atmósferas de reacción. En conclusión, este estudio contribuye a sentar las bases para el desarrollo de procesos de *upcycling* mediante carbonización, ofreciendo una alternativa sostenible y funcional para la valorización de residuos plásticos en línea con los principios de la economía circular.

Referencias bibliográficas

- [1] International Energy Agency (2020). Production forecast of thermoplastics worldwide from 2025 to 2050 (in million metric tons). Statista. Accedido julio de 2025: <https://www.statista.com/statistics/664906/plastics-production-volume-forecast-worldwide/>
- [2] Statista. (2025). *Global plastic waste | Statista*. Accedido julio de 2025: <https://www.statista.com/study/65164/plastic-waste-worldwide/>
- [3] Liu, X., Ma, C., Wen, Y., Chen, X., Zhao, X., Tang, T., Holze, R., & Mijowska, E. (2020). Highly efficient conversion of waste plastic into thin carbon nanosheets for superior capacitive energy storage. *Carbon*, 171, 819–828. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.09.057>
- [4] Martín, A. J., Mondelli, C., Jaydev, S. D., & Pérez-Ramírez, J. (2021). Catalytic processing of plastic waste on the rise. *Chem*, 7(6), 1487–1533. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.12.006>
- [5] Chen, S., Liu, Z., Jiang, S., & Hou, H. (2019). Carbonization: A feasible route for reutilization of plastic wastes. *The Science of the Total Environment*, 710, 136250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136250>
- [6] Blanchard, R., & Mekonnen, T. H. (2024). Valorization of plastic waste via chemical activation and carbonization into activated carbon for functional material applications. *RSC Applied Polymers*, 2(4), 557–582. <https://doi.org/10.1039/d4lp00016a>
- [7] Maqsood, T., Dai, J., Zhang, Y., Guang, M., & Li, B. (2021). Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>
- [8] Ma, Z., Wang, L., Wang, Z., Cui, H., Tang, E., Hou, H., Xu, G., Song, T., & Wang, Q. (2024). Plastic Waste-Derived Carbon Materials: construction strategies and functional applications in energy storage, environmental remediation and organic synthesis. *ChemCatChem*. <https://doi.org/10.1002/cctc.202401072>
- [9] Takagi, H., Maruyama, K., Yoshizawa, N., Yamada, Y., & Sato, Y. (2004). XRD analysis of carbon stacking structure in coal during heat treatment. *Fuel*, 83(17–18), 2427–2433. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.06.019>
- [10] Elessawy, N. A., El-Sayed, E. M., Ali, S., Elkady, M. F., Elnouby, M., & Hamad, H. A. (2019). One-pot green synthesis of magnetic fullerene nanocomposite for adsorption characteristics. *Journal of Water Process Engineering*, 34, 101047. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101047>
- [11] Zhang, J., Yan, B., Wan, S., & Kong, Q. (2013). Converting Polyethylene Waste into Large Scale One-Dimensional Fe₃O₄@C Composites by a Facile One-Pot Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(16), 5708–5712. <https://doi.org/10.1021/ie4004392>