

Pirólisis de residuos plásticos y mixtos como una alternativa sustentable para la gestión de residuos sólidos municipales

Pyrolysis of Plastic And Mixed Waste as a Sustainable Alternative for Municipal Solid Waste Management

 Luis Adolfo Alvarenga Aguilar ^a

^a Universidad Católica de El Salvador

Cómo citar: Alvarenga Aguilar, L. A. Pirólisis de residuos plásticos y mixtos como una alternativa sustentable para la gestión de residuos sólidos municipales. *Revista Kawsaypacha: Sociedad Y Medio Ambiente*, (17). <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202601.A013>



Resumen: Esta revisión de literatura analiza la pirólisis como una herramienta sustentable y tecnológica para la gestión de residuos sólidos municipales, especialmente plásticos, biomásicos y mixtos. Se realizó una lectura de 131 estudios científicos de acceso abierto indexados en la base de datos Dimensions, de los cuales se seleccionaron 29 artículos que demostraron cómo la pirólisis transforma los residuos en productos útiles, como biocarbón, bioaceite y gases combustibles útiles, aportando a la generación de energía. Los residuos mixtos que contienen plásticos de baja o nula biodegradabilidad aumentan su rendimiento energético, que se ve potenciado aún más con algunos catalizadores (como las zeolitas, que aumentan la eficiencia del proceso). El biocarbón resalta no solo como combustible, sino también por su capacidad de mejorar las propiedades del suelo, los bioaceites se pueden usar como materia prima para otros combustibles, como el biodiésel, y los gases combustibles pueden usarse como fuente para fuego o en motores de combustión interna. Además, en este artículo también se muestran, de forma sintetizada, las variables importantes de cada estudio para posteriores réplicas o discusiones, como la temperatura de la pirólisis, la composición de los residuos y el tiempo de residencia. Con la finalidad de disminuir el volumen de residuos en rellenos sanitarios e incentivar el uso de energías renovables, esta investigación invita a fortalecer la cooperación entre investigadores, a la generación de políticas públicas que favorezcan la calidad del ambiente y a la cooperación con autoridades y comunidades para hacer viable esta solución y oportunidad de generar

valor ecológico, al mitigar la contaminación por plásticos, y valor energético, por la síntesis de información sobre fuentes alternativas a los combustibles fósiles.

Palabras clave: Pirólisis. Termoquímica. Residuos sólidos urbanos. Economía circular. El Salvador.

Abstract: This literature review analyzes pyrolysis as a sustainable and technological tool for the management of municipal solid waste, especially plastics, biomass, and mixed waste. A reading of 131 open-access scientific studies indexed in the Dimensions database was done, of which 29 were considered evidence of how pyrolysis transforms waste into useful products such as biochar, bio-oil, and combustible gases, contributing to energy generation. Mixed waste containing plastics with low or no biodegradability that increases its energy yield, and is further enhanced by some catalysts such as zeolites that increase the efficiency of the process. Biochar stands out not only as a fuel but also for its ability to improve soil properties. Bio-oils can be used as a raw material for other fuels such as biodiesel, and combustible gases can be used as a source of fire or in internal combustion engines. In addition, the important variables of each study are summarized for subsequent replication or discussion, such as pyrolysis temperature, waste composition, and residence time. In order to reduce the volume of waste in landfills and encourage the use of renewable energy, this research encourages strengthening cooperation among researchers, the development of public policies that promote environmental quality, and cooperation with authorities and communities to make this solution viable and an opportunity to generate ecological value by mitigating plastics, and energy value by synthesizing information about an alternative to fossil fuels.

Keywords: Pyrolysis. Thermochemistry. Urban solid waste. Circular economy. El Salvador.

1. Introduction

El manejo de los residuos sólidos municipales representa uno de los principales desafíos ambientales en la actualidad. La acumulación de plásticos y otros desechos mixtos genera impactos negativos sobre los ecosistemas, la salud humana y el clima global. Tradicionalmente, estos residuos han sido gestionados mediante métodos como el vertido en rellenos sanitarios y la incineración, los cuales presentan limitaciones en términos de eficiencia y sustentabilidad. En este contexto, la pirólisis ha surgido como una alternativa viable para la valorización de residuos plásticos y mixtos, al permitir la conversión de estos materiales en productos útiles como bioaceite, biocarbón y gases combustibles.

1.1 Antecedentes

La energía renovable es una alternativa sustentable para la producción de energía, busca reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental. Entre las

tecnologías emergentes, la pirólisis se destaca como un proceso termoquímico eficaz para la conversión de residuos sólidos urbanos (RSU) en productos energéticos valiosos (Horváth et al., 2024). Este proceso implica la descomposición térmica de materiales en ausencia de oxígeno, generando bioaceite, gas de síntesis y biocarbón, los cuales pueden ser utilizados como combustibles o mejoradores del suelo (Adeniyi et al., 2024).

La pirólisis de RSU es una solución prometedora para el manejo de desechos urbanos y la obtención de energía limpia. Estudios han demostrado que la copirólisis de biomasa con residuos plásticos mejora la calidad del bioaceite al reducir su contenido de oxígeno y aumentar su rendimiento líquido (Zhang et al., 2023). Además, el uso de catalizadores ha optimizado la eficiencia térmica del proceso, reduciendo la energía de activación y mejorando la conversión de residuos en productos valiosos (Wee et al., 2024).

Los residuos sólidos urbanos incluyen una variedad de materiales, como plásticos, materia orgánica y papel, cuya gestión eficiente es clave para la sostenibilidad ambiental (Diallo et al., 2021). Su aprovechamiento mediante tecnologías termoquímicas, como la pirólisis y la gasificación, permite la producción de combustibles y productos con alto valor energético (Iannello et al., 2020).

Dentro del contexto de la economía circular, la pirólisis y la gasificación se presentan como estrategias que complementan el reciclaje, promoviendo la valorización de residuos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Klavins et al., 2018).

1.2 Objetivos

El objetivo general fue analizar el proceso de pirólisis de residuos plásticos y mixtos para la gestión de residuos sólidos municipales, evaluando sus productos, eficiencia y potencial impacto ambiental. Para ello se examinaron los procesos de pirólisis aplicados a residuos plásticos y mixtos, sus variables operativas, tipos de plásticos y biomasa involucrados, y las tecnologías utilizadas. Asimismo, se evaluaron los productos derivados de la pirólisis, sus aplicaciones potenciales y la viabilidad como alternativa a los combustibles fósiles y materiales convencionales.

2. Metodología

Se hizo uso de la base de datos Dimensions, en la cual se buscaron las palabras clave *municipal*, *waste*, *pyrolysis* y *biomass*, todas en inglés y unidas con el booleano AND en el filtro primario de título y resumen. Encontrándose 425 resultados, se aplicó un segundo filtro para que mostrase únicamente los resultados de acceso abierto, reduciéndose a 131 resultados. Estos resultados se exportaron en la extensión .XLSX y se trabajó en la hoja de cálculo de Microsoft Excel, ordenando la información por autor, año de publicación, título, resumen y DOI. Se procedió a leer los artículos mientras se extraía la información en común en todos los artículos (los resultados se muestran en la Tabla 1).

3. Resultados y discusión

La Tabla 1 compila aquellos estudios en los que se obtuvo uno de los tres principales productos de la pirólisis: biocarbón, aceites de pirólisis o gases combustibles; en su mayoría, se trató de los relacionados con bioaceites y derivados (seis estudios), así como biocarbón (cinco estudios) —destacándose el estudio de Park et al. (2016)—, al ser un combustible sólido en forma de pelusa; y en menor cantidad, los gases de pirólisis o gases combustibles (cuatro estudios).

Tabla 1. Estudios cuyo resultado fue uno de tres posibles derivados de pirólisis

Autor/es	Residuo tratado	Resultado del estudio	Variables	Conclusión parcial de cada estudio
Adeniyi et al., 2024	Biomasa y plásticos	Biocarbón	Materia prima, pretratamiento, mezcla, configuración del reactor, temperatura, catalizador.	El biocarbón se usó como aditivo para el suelo y adsorbente en tratamiento de aguas residuales.
Bansode et al., 2016	Papel periódico, cartón, astillas de madera, residuos de jardinería	Biocarbón	Temperatura de pirólisis: 700 °C; tiempo de pirólisis: 2 h; biocarbón en el suelo: 2% (p/p); pH del biocarbón: 6.8; retención de agua mejorada; alto contenido de K y NO ₃ -N.	El biocarbón mejoró las propiedades del suelo, aumentó la germinación y la biomasa de las plantas. Redujo las emisiones de CO ₂ en un 14%.
Dafalla et al., 2024	Biomasa, plásticos, neumáticos, RSU	Biocarbón de alta calidad	Temperatura de pirólisis: 300-500 °C.	La copirólisis de biomasa con diferentes materiales puede producir biocarbón de alta calidad.
Hardiyanto et al., 2023	RSU, plástico, biomasa, caucho, papel	Bioaceite como combustible de hidrocarburos	Concentración del catalizador de zeolita: 0.25; 0.5; 0.75; 1; temperatura de pirólisis: 400 °C; tiempo de reacción: 60 minutos.	Concentración ideal del catalizador de zeolita para aumentar la eficiencia térmica en la mayor cantidad de bioaceite es de 0.5. Permite producir a bajas temperaturas.
Islam et al., 2021	Residuos agrícolas (paja de arroz, paja de trigo, cáscara de arroz, palo de yute, bagazo de caña de azúcar), RSU, desechos electrónicos (plásticos)	Combustibles líquidos a partir de pirólisis	Poder calorífico: paja de arroz 13.71 MJ/kg; polietileno 46.41 MJ/kg; materia volátil: residuos plásticos 98.1%; cáscara de arroz 57.19%; contenido de carbono: residuos plásticos 84.03%; contenido de azufre: mayor en RSU; contenido de ceniza: cáscara de arroz 19.7%, neumáticos 4.38%; rango de temperatura de pérdida de masa: 250-450 °C (residuos agrícolas), 350-500 °C (RSU).	Concentración ideal del catalizador de zeolita para aumentar la eficiencia térmica en la mayor cantidad de bioaceite es de 0.5. Permite producir a bajas temperaturas.

Autor/es	Residuo tratado	Resultado del estudio	Variables	Conclusión parcial de cada estudio
Klavins et al., 2018	Biomasa de RSU, plásticos	Gas de síntesis (CO, CO ₂ , H ₂), combustibles para transporte, fertilizantes, productos químicos	Proceso: gasificación (oxidación parcial, endotérmico); aplicaciones: producción de combustibles, productos químicos, sustituto de gas natural.	La gasificación de biomasa de RSU no compete con el reciclaje, sino que lo complementa. Esta tecnología tiene potencial en la gestión de residuos y revaloriza los residuos.
Li y Williams, 2023	Poliétileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), politereftalato de etileno (PET), biomasa residual, RSU	Gas de síntesis (H ₂ , CO), rendimiento más alto de gas de síntesis	Temperatura del catalizador: 1000 °C; entrada de vapor: 10 g h ⁻¹ g catalizador ⁻¹ ; rendimiento de gas de síntesis: 3.83 g gplástico ⁻¹ para biocarbón, 2.73 g gplástico ⁻¹ para carbón RDF.	Los plásticos poliolefinicos (HDPE, LDPE, PP) produjeron el mayor rendimiento de gas de síntesis, comparado con PS y PET. El carbón demostró un mayor rendimiento de H ₂ a 1000 °C en comparación con biocarbón, debido a su mayor contenido de metales catalizadores.
Márquez et al., 2023	RSU, biomasa y plásticos	64% hidrocarburos (24% aromáticos), 20% compuestos oxigenados (cetonas, furanos y ácidos)	Temperatura: biomasa 150-400 °C, óptimo 300-350 °C, plásticos 400-520 °C; energía de activación: biomasa 240 kJ/mol, plásticos 250 kJ/mol; modelos cinéticos: biomasa tercer orden, plásticos primer orden; métodos cinéticos: KAS, OFW, Starink, Friedman, Vyazovkin.	Se identificaron y cuantificaron los productos de la pirólisis de RSU. La biomasa y los plásticos tienen diferentes comportamientos cinéticos y energías de activación. Se obtuvo una proporción significativa de hidrocarburos y compuestos oxigenados.
Mensah et al., 2022	Plástico, biomasa, RSU de Ghana	Gas de síntesis para combustibles, productos químicos y generación de electricidad	Tipo de materia prima, temperatura, catalizadores, velocidad de calentamiento, configuración del reactor, tiempo de residencia.	La copirólisis de residuos plásticos y biomasa mejora la producción de gas de síntesis, optimizándolo para aplicaciones energéticas, además reduce emisión de CO ₂ .
Miskolczi et al., 2025	Residuos plásticos municipales, biomasa y lodos depurados de trabajos agrícolas	Carbón con capacidad de captura de CO ₂	Temperatura de pirólisis 400, 600 y 900 °C, tamaño de grano 0,315-1,50 mm, capacidad de absorción de CO ₂ 0,76-2,33 mmol CO ₂ /g para muestras derivadas de residuos, 3,71-3,90 mmol CO ₂ /g para carbón activado de referencia, temperatura de carbonización 750 °C y calcinación 900 °C.	Los carbones obtenidos a 900 °C presentaron la mayor capacidad de absorción de CO ₂ , especialmente los derivados de residuos plásticos municipales. La capacidad de carbonización de los lodos de depuradora disminuyó drásticamente después de 5 ciclos.
Park et al., 2016	RSU, plástico y madera	Combustible sólido recuperado (CSR), tipo pelusa con viabilidad como combustible alternativo	Análisis elemental, termogravimetría (TG), mayor valor calorífico (HHV), análisis proximal.	El CSR tipo pelusa fabricado a partir de RSU mostró características térmicas para su uso como combustible en la conversión de residuos en energía.

Autor/es	Residuo tratado	Resultado del estudio	Variables	Conclusión parcial de cada estudio
Sophonrat y Yang, 2017	Mezcla de polietileno (PE) y celulosa	Producción de productos volátiles con mayor contenido de compuestos oxigenados cuando se mezclan por fusión	Temperatura de pirólisis: 600 °C, métodos de mezcla: fusión y no mezclar.	La mezcla de PE y celulosa por fusión genera compuestos oxigenados como ácido acético y cetonas alifáticas; mas el cambio en los productos principales hidrocarburos alifáticos y levoglucosano es mínimo.
Zhang et al., 2023	RSU (envases de desecho y botellas plásticas de PP y PE)	Mejora en la calidad del bioaceite mediante copirólisis	Copirólisis a 450 °C, reducción de residuos en 3%, aumento del rendimiento líquido en 3.78%, contenido de oxígeno en líquidos reducido del 65% a 8%, aumento de CO ₂ y CO en productos gaseosos.	La copirólisis de residuos plásticos con biomasa mejora la calidad del bioaceite al aumentar el rendimiento y promover compuestos valiosos, como L-glucosa y aldehídos.
Zhao et al., 2021	RSU, residuos de biomasa, residuos plásticos y sus mezclas	Gases utilizables (H ₂ , CO, CH ₄ , CO ₂)	Gasificación en reactores de una o varias etapas, variables de operación como agente de gasificación, temperatura, composición de alimentación.	La gasificación es una tecnología para convertir residuos sólidos en gases aprovechables. Hay factores operativos y catalizadores para el rendimiento de los reactores productores de energía.
Zhou et al., 2014	Xilan, celulosa, lignina, pectina, almidón, polietileno (PE), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET)	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de 2-4 anillos	Pirólisis en horno de lecho fijo a 800 °C.	La pirólisis de plásticos generó más HAP que la biomasa. El poliestireno (PS) generó más HAP, seguido por el PVC, PET y lignina. Los HAP dominantes fueron la naftalina y otros compuestos de 2 a 3 anillos, siendo el PS, el PET y la lignina capaces de generar HAP directamente a partir de su estructura aromática.

En la Tabla 2 se puede observar una relación entre los procesos de pirólisis y la obtención de varios productos; hay igual cantidad de estudios (cuatro estudios cada uno) que obtuvieron dos productos o tres productos. En la tabla solo se diferencia el estudio de Diallo et al. (2021), que mencionan un combustible que lo hace adecuado para otros procesos pirolíticos.

Tabla 2. Estudios cuyos productos fueron dos o tres derivados de pirólisis

Autor/es	Residuo tratado	Producto o resultado obtenido	Variables	Conclusión parcial de cada estudio
Diallo et al., 2021	Racimos vacíos de fruta (EFB) y RSU	Combustible potencial para pirólisis o gasificación	Relación RSU/EFB: 0.25; 0.42; 0.66; 1.00; 1.50; Poder Calorífico (PC) del EFB: 16.86 MJ/kg; PC de las mezclas: 19.77; 21.22; 22.67; 27.04; 28.47 MJ/kg; Contenido de cloro: 0.21-0.95%; Contenido de azufre: 0.041-0.078%	El poder calorífico del EFB aumenta al mezclarlo con residuos sólidos urbanos. Este combustible tiene baja concentración de cloro y azufre, ofreciendo bajo impacto ambiental.
Gabbar y Ahmad, 2024	RSU, papel y plástico	Bioaceite, carbón, y gases	Proceso: R&D, control de reactor (RC); técnicas utilizadas: análisis termogravimétrico, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier. Parámetros: temperatura, velocidades de calentamiento, análisis elemental	Existen procesos integrados para optimizar la conversión de RSU en bioaceite, carbón y gases, destacando la necesidad de simulaciones y modelos para mejorar la eficiencia y la viabilidad de la producción.
Holubčík et al., 2022	RSU de biomasa vegetal y plásticos de automóviles	Aceite de pirólisis, gas de pirólisis, carbono	Componentes de residuos: plásticos, biomasa, caucho, plásticos de vehículos; método de análisis: analizadores termogravimétricos y elementales	La pirólisis de RSU y plásticos de vehículos tiene un alto poder calorífico, lo que muestra una tecnología para reducir la carga ambiental en Eslovaquia
Horváth et al., 2024	Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (OFMSW)	Productos gaseosos (hidrógeno, metano, CO ₂ , CO), productos sólidos	Temperaturas: 500 °C (zona 1), 600 °C o 900 °C (zona 2); fracciones de residuos: biomasa seca, materias primas ricas en papel, materias primas ricas en papel y plástico; catalizadores: Zeolita Ni/Y, Ni-Ce; relaciones de gases: H ₂ /CO, CO ₂ /CO, CH ₄ /CO; poder calorífico: 12,5-12,8 MJ/kg	La pirólisis y gasificación combinadas son eficaces para obtener productos de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. El uso de catalizadores, especialmente con Ce, mejora la producción de hidrógeno y metano, elevando el poder calorífico de los productos obtenidos.
Iannello et al., 2020	Biomasa y RSU incluyendo combustible derivado de residuos	Gas de síntesis limpio, biohidrógeno, gas natural sintético (GNS), combustibles líquidos	Proceso: pirólisis, gasificación; tipo de reactor: lecho fluidizado; productos: biohidrógeno, GNS, combustibles líquidos	El uso de reactores de lecho fluidizado para tratar biomasa y residuos sólidos favorece producir gas de síntesis limpio, GNS y combustibles líquidos. Contribuye a la producción de bioenergía.
Khatibi et al., 2025	RSU	Bioaceite y gases desoxigenados	Contenido de oxígeno: alto en bioaceite; catalizadores: TiO ₂ , MCM-41, ZSM-5, Al ₂ O ₃ ; rendimiento de gases: CO, CO ₂ , H ₂ ; rendimiento total de aceite oxigenado: MCM-41 < ZSM-5 < TiO ₂ < Al ₂ O ₃	La pirólisis de RSU produce bioaceite altamente oxigenado, viscoso, ácido, con alto contenido de humedad. El proceso de pirólisis con plasma/catálisis no térmico mejora los productos y reduce el contenido de oxígeno en el bioaceite. Los catalizadores MCM-41 y ZSM-5 mejoran los rendimientos de gases y la desoxigenación de los volátiles de pirólisis.

Autor/es	Residuo tratado	Producto o resultado obtenido	Variables	Conclusión parcial de cada estudio
Miskolczi et al., 2023	Biomasa de diferentes orígenes, plásticos provenientes de RSU	Gases de hidrocarburos, hidrocarburos líquidos, carbón sólido, productos acuosos y gas de síntesis con alto contenido de CO y CO ₂	Materia prima, temperatura (500 °C en pirólisis y 500-800 °C en gasificación), catalizadores (Ni/ZSM-5, Ce/Ni/ZSM-5, La/Ni/ZSM-5, Ce/La/ZSM-5), contaminantes (nitrógeno, azufre, cloro), relación H ₂ /CO, composición de hidrocarburos aromáticos	La materia prima y los contaminantes afectan significativamente los rendimientos del gas de síntesis y la composición de los productos en la pirólisis-gasificación, siendo los residuos plásticos los que generan mayor cantidad de gas de síntesis.
Nanda et al., 2023	Residuos plásticos de un solo uso	Combustibles limpios mediante pirólisis, licuefacción y gasificación	Tipos de plásticos, tecnologías de conversión (pirólisis no catalítica, catalítica, microondas, plasma, licuefacción, gasificación), coprocesamiento con biomasa	Las tecnologías termoquímicas pueden convertir residuos plásticos en combustibles de alta calidad. Se requiere inversión en investigación y desarrollo.
Syamsiro et al., 2014	Residuos plásticos municipales (PEAD, entre otros)	Producción de <i>fueloil</i> , productos líquidos, gaseosos y sólidos con alto valor calorífico	Catalizadores comerciales de zeolita y zeolita natural, pirólisis secuencial y reformado catalítico	Los residuos plásticos, especialmente el PEAD, producen la mayor fracción líquida, mientras que los catalizadores incrementan la fracción gaseosa y reducen la fracción líquida. Los productos sólidos tienen un mayor valor calorífico que la biomasa y el carbón de baja gama.

En la Tabla 3 se puede observar estudios que otorgan datos de características termogravimétricas, mejoras en rendimientos con catalizadores; incluso el estudio de Netzer et al. (2021) utilizó una simulación de modelo numérico.

Tabla 3. Estudios de pirólisis que otorgan como producto otros datos técnicos

Autor/es	Residuo tratado	Producto o resultado obtenido	Variables	Conclusión parcial de cada estudio
Ansah et al., 2016	Madera, papel, textil, plástico, PET	Características termogravimétricas y calorimétricas	Temperatura de pirólisis: 220-480 °C (difiere por material); pérdida de peso: madera 9.9%, PET 18.5%; energía de activación: PET 181.86 kJ/mol, madera 41.47 kJ/mol, papel 50.01 kJ/mol	El PET tiene una mayor energía de activación, requiere más calor que la biomasa. La torrefacción mejora la molienda del PET y la copirólisis muestra interacción significativa cuando la biomasa es dominante.
Netzer et al., 2021	RSU	Modelo numérico para predecir la formación de NOx en la incineración de RSU	Tipos de residuos (biomasa, proteínas, inorgánicos, plásticos), mecanismos de reacción heterogéneos y homogéneos, interacciones de NOx con especies de azufre y cloruro	El modelo permite predecir la composición del gas y la formación de NOx en la incineración de RSU, optimizando la combustión y reduciendo emisiones.
Papuga et al., 2013	Residuos plásticos (HDPE, PP, PS) y biomasa (aserrín de haya y abeto)	Mayor rendimiento de materia volátil en la copirólisis de mezclas biomasa/plástico	Proporciones biomasa/plástico (1:1, 3:1, 1:3), humedad, cenizas, coque, carbón aglomerado, materia volátil	La copirólisis mejora la conversión de residuos en productos valiosos, con un aumento de materia volátil, siendo más notable que en la mezcla haya/PS 1:1.
Sebestyén et al., 2017	Mezcla de biomasa y plásticos en proporción 1:1	Mayor rendimiento de productos aromáticos mediante pirólisis con catalizadores	Tipo de catalizador (zeolitas β , Y, ZSM-5, FCC, NiMo/Al ₂ O ₃), relación muestra-catalizador 2:1, velocidad de calentamiento (baja y alta)	Los catalizadores mejoran la calidad del producto de descomposición, con un incremento significativo en los productos aromáticos, especialmente con β -zeolita y ZSM-5.
Wee et al., 2024	Racimos vacíos de palma aceitera (EFB) y residuos de mascarillas quirúrgicas (SFM)	Combustibles de valor añadido por copirólisis, mejora en el rendimiento con el uso de catalizadores	Relación en peso EFB:SFM de 1:1, 4:1 y 1:4, velocidades de calentamiento de 10 a 100 °C.min ⁻¹ , catalizador HZSM-5, valor Ir de 8.11	La copirólisis de EFB y SFM mostró un comportamiento inhibitorio en la degradación térmica, con el catalizador HZSM-5 mejorando significativamente la eficiencia del proceso, reduciendo la energía de activación y la entalpía. El mejor rendimiento se obtuvo a 50 °C.min ⁻¹ .

4. Discusión

La literatura revisada muestra una amplia variedad de residuos tratados, destacando la combinación de biomasa y plásticos, como los RSU y materiales agrícolas. Los plásticos, como PET, PE y PS, son comúnmente abordados debido a su impacto ambiental y baja biodegradabilidad. Su tratamiento junto con biomasa, como residuos de madera, paja o bagazo de caña de azúcar, ofrece oportunidades para la producción de bioenergía y bioproductos mediante tecnologías como la pirólisis (Islam et al., 2021;

Li & Williams, 2023). Además, la mezcla de estos residuos en diferentes proporciones ha sido estudiada para optimizar procesos como la co-pirólisis. Los RSU, que incluyen plásticos y materiales orgánicos, requieren estrategias de reciclaje más eficientes. La valorización de residuos, tanto orgánicos como plásticos, es importante para avanzar hacia una nueva conceptualización de los residuos y reducir el impacto ambiental, siendo necesaria la colaboración entre investigación, industria y políticas públicas para mejorar las prácticas de gestión y reciclaje (Nanda et al., 2023).

La literatura revisada resalta productos con alto potencial calorífico obtenidos mediante pirólisis, gasificación y copirólisis, como el biocarbón, bioaceite y gases. El biocarbón es valorado por su capacidad de captura de CO₂ y sus aplicaciones energéticas (Miskolczi et al., 2025). El bioaceite, derivado de la pirólisis, se presenta como una alternativa a los hidrocarburos convencionales. Los gases de síntesis, como hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), tienen aplicaciones en la producción de combustibles, electricidad y productos químicos. La copirólisis de biomasa y plásticos mejora el rendimiento de compuestos volátiles y productos aromáticos con alto valor calorífico (Papuga et al., 2013; Sophonrat & Yang, 2017).

Los parámetros de operación en procesos de pirólisis y gasificación revelan la importancia de controlar diversas variables para optimizar la producción de productos con alto valor calorífico. La temperatura es uno de los factores más influyentes, con rangos que varían entre 220 °C y 900 °C, dependiendo del material procesado. Por ejemplo, el PET y la madera tienen tasas de pérdida de peso distintas, lo que impacta su conversión en productos como biocarbón y bioaceite (Ansah et al., 2016; Bansode et al., 2016; Park et al., 2016). Las temperaturas más altas, como 700 °C, favorecen la generación de biocarbón de alta calidad, mientras que temperaturas intermedias, entre 300 °C y 500 °C, son comunes en muchos procesos (Dafalla et al., 2024).

El uso de catalizadores, como zeolitas (Ni/Y, ZSM-5), mejora el rendimiento, particularmente en la copirólisis de biomasa y plásticos, donde se observa un incremento en la producción de compuestos volátiles y productos aromáticos. La relación entre los diferentes componentes de la mezcla (biomasa, plástico, residuos sólidos urbanos) también influye en el poder calorífico de los productos obtenidos, con valores que varían desde 12.5 hasta 28.47 MJ/kg.

Estos parámetros son cruciales para la producción de combustibles limpios, como biohidrógeno, gas de síntesis y combustibles líquidos. El control adecuado de las condiciones de operación, como la temperatura, el tiempo de residencia y los catalizadores, permite maximizar la eficiencia de los procesos y mejorar el rendimiento energético de los productos obtenidos (Khatibi et al., 2025; Miskolczi et al., 2023; Sebestyén et al., 2017; Wee et al., 2024).

El biocarbón mejora la calidad del suelo al aumentar el pH, la retención de agua y los nutrientes, favoreciendo el crecimiento vegetal y reduciendo las emisiones de CO₂ en un

14% (Bansode et al., 2016). Además, actúa como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales, mitigando impactos ambientales (Adeniyi et al., 2024).

La copirólisis de biomasa y plásticos optimiza la producción de biocombustibles, facilitando el procesamiento del PET y mejorando la calidad de los productos finales (Zhou et al., 2014).

Modelos de simulación y el uso de catalizadores aumentan la eficiencia de la conversión de residuos urbanos en biohidrógeno y gas de síntesis, promoviendo una gestión sustentable de residuos dentro de una potencial economía circular (Gabbar & Ahmad, 2024; Netzer et al., 2021).

5. Conclusiones

La pirólisis ha demostrado ser una tecnología eficiente para el tratamiento de residuos sólidos municipales, residuos plásticos PET, PE, PS, PP, de origen biomásico, madera, papel, agrícolas, racimos vacíos de frutas, y combinaciones, permitiendo su conversión en productos de valor como bioaceite, biocarbón y gases combustibles, reintegrando desperdicios como nuevos productos a la cadena productiva (Klavins et al., 2018; Syamsiro et al., 2014; Zhao et al., 2021).

El uso de catalizadores, como la zeolita, ha demostrado optimizar la producción de bioaceite al permitir una conversión más eficiente y reducir la temperatura de reacción, al favorecer el tiempo de calentamiento, aumentando la eficiencia de la degradación de los residuos; otros procesos, como la torrefacción, también aumentan la eficiencia, tal como se ha medido en procesos termogravimétricos (Ansah et al., 2016; Hardiyanto et al., 2023).

Los productos de la pirólisis, como el bioaceite, permiten la destilación de otros biocombustibles líquidos; y los gases de síntesis, biohidrógeno y gas natural sintético representan una alternativa viable a los combustibles fósiles debido a su alto poder calorífico y potencial para la generación de energía, favoreciendo a la reducción de emisiones de efecto invernadero de la atmósfera por absorción de CO₂, así como el tratamiento de aguas (Adeniyi et al., 2024; Holubčík et al., 2022; Iannello et al., 2020; Miskolczi et al., 2025).

Referencias

- Adeniyi, A.; Iwuozor, K.; Emenike, E.; Ajala, O.; Ogunniyi, S. & Muritala, K. (2024). Thermochemical co-conversion of biomass-plastic waste to biochar: a review. *Green Chemical Engineering*, 5(1), pp. 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.03.002>
- Ansah, E.; Wang, L. & Shahbazi, A. (2016). Thermogravimetric and calorimetric characteristics during co-pyrolysis of municipal solid waste components. *Waste Management*, 56, pp. 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.015>
- Bansode, R.; Randolph, P.; Hassan, O.; Rehrah, D. & Ahmedna, M. (2016). Mixed Solid Municipal Waste-Based Biochar for Soil Fertility and Greenhouse Gas Mitigation. https://www.researchgate.net/publication/334802374_Mixed_Solid_Municipal_Waste-Based_Biochar_for_Soil_Fertility_and_Greenhouse_Gas_Mitigation_1
- Dafalla, M.; Inayat, A.; Jamil, F. & Ghenai, C. (2024). Prospective of biochar material production and process optimization using co-pyrolysis approach-A mini-review. *Journal of Physics: Conference Series* 2751, 01202. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2751/1/012024>
- Diallo, A.; Alkhatib, M.; Alam, Z. & Mel, M. (2021). Enhancement of the calorific value of Em1707pty Fruit Bunch (Efb) by adding municipal solid waste as solid fuel in gasification process. *IJUM Engineering Journal*, 22(2), pp. 10-20. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v22i2.1566>
- Gabbar, H. & Ahmad, M. (2024). Integrated Waste-to-Energy Process Optimization for Municipal Solid Waste. *Energies*, 17(2), p. 497. <https://doi.org/10.3390/en17020497>
- Hardiyanto, M.; Sasongko, N. & Almubaroq, H. (2023). Analysis Of Isothermal Pyrolysis Process Of Municipal Waste Into Bio-Oil With The Addition Of Natural Catalyst (Zeolite) In Supporting National Energy Security. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1267, 012077. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1267/1/012077>
- Holubčík, M.; Klačko, A.; Jandačka, J. & Drga, J. (2022). Pyrolysis Treatment of Municipal Solid Waste and Automotive Waste with Study of Each Component Energy Potential. *MATEC Web of Conferences*, 369. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236903005>
- Horváth, D.; Tomasek, S.; Bobek-Nagy, J.; Tóth, E.; Kurdi, R. & Miskolczi, N. (2024). Syngas Purpose Pyrolysis-Gasification of Organic Fractions of MSW over Metal-Loaded Y-Zeolite Catalysts. *International Journal of Energy Research*, 5558323. <https://doi.org/10.1155/2024/5558323>
- Iannello, S.; Morrin, S. & Materazzi, M. (2020). Fluidised Bed Reactors for the Thermochemical Conversion of Biomass and Waste. *KONA Powder and Particle Journal*. <https://doi.org/10.14356/kona.2020016>
- Islam, K.; Khatun, M.; Arefin, A.; Islam, M. & Hassan, M. (2021). Waste to energy: An experimental study of utilizing the agricultural residue, MSW, and e-waste available in Bangladesh for pyrolysis conversion. *Heliyon*, 7(12), e08530. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08530>
- Klavins, M.; Bisters, V. & Burlakovs, J. (2018). Small Scale Gasification Application and Perspectives in Circular Economy. *Environmental and Climate Technologies*, 22(1). <https://doi.org/10.2478/rtuect-2018-0003>
- Khatibi, M.; Nahil, M. & Williams, P. (2025). Pyrolysis/Non-thermal Plasma/Catalysis Processing of Refuse-Derived Fuel for Upgraded Oil and Gas Production. *Waste and Biomass Valorization*, 16, pp. 3267-3294. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02866-w>
- Li, Y. & Williams, P. (2023). Catalytic Biochar and Refuse-Derived Char for the Steam Reforming of Waste Plastics Pyrolysis Volatiles for Hydrogen-Rich Syngas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(36). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02292>
- Márquez, A.; Patlaka, E.; Sfakiotakis, S.; Ortiz, I. & Sánchez-Hervás, J. (2023). Pyrolysis of municipal solid waste: A kinetic study through multi-step reaction models. *Waste management*, 172, pp. 171-181. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.031>
- Mensah, I.; Ahiokpor, J.; Bensah, E.; Narra, S.; Amponsem, B. & Antwi, E. (2022). Recent Development of Biomass and Plastic Co-Pyrolysis for Syngas Production. *Chemical Science International Journal*, 31(1), pp. 41-59. <https://doi.org/10.9734/CSJI/2022/v31i130275.10.9734/csji/2022/v31i130275>

- Miskolczi, N.; Gao, N. & Quan, C. (2023). Pyrolysis-gasification of biomass and Municipal Plastic Waste using transition metal modified catalyst to investigate the effect of contaminants. *Journal of the Energy Institute*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101233>
- Miskolczi, N.; Gao, N.; Quan, C. & Laszlo, A. (2025). CO₂ reduction by chars obtained by pyrolysis of real wastes: Low temperature adsorption and high temperature CO₂ capture. *Carbon Capture Science & Technology*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100332>
- Nanda, S.; Sarker, T.; Kang, K.; Li, D. & Dalai, A. (2023). Perspectives on Thermochemical Recycling of End-of-Life Plastic Wastes to Alternative Fuels. *Materials*, 16(13), 4563. <https://doi.org/10.3390/ma16134563>
- Netzer, C.; Li, T. & Løvås, T. (2021). Surrogate Reaction Mechanism for Waste Incineration and Pollutant Formation. *Energy & Fuels*, 35(9). <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03485>
- Papuga, S.; Musić, I.; Gvero, P. & Vukić, L. (2013). Preliminary research of waste biomass and plastic pyrolysis process. <https://doi.org/10.7251/comen1301076p>
- Park, S.; Lee, J.; Yang, W.; Kang, J.; Sung, J.; Alam, M.; Seo, Y.; Rao, C.; Saravanakumar, A.; Kumar, K.; Lee, J. & Oh, J. (2016). For Waste to Energy, Assessment of Fluff Type Solid Refuse Fuel by Thermal Characteristics Analyses. *Procedia Environmental Sciences*, 35, pp. 498-505. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.034>
- Sebestyén, Z.; Miskolczi, N.; Barta-Rajnai, E.; Jakab, E. & Czégény, Z. (2017). Thermocatalytic Studies on Municipal Solid Waste. *Energy Procedia*, 105, pp. 706-711. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.379>
- Sophonrat, N. & Yang, W. (2017). Effect of mixing methods of polyethylene and cellulose on volatile products from its co-pyrolysis. *Energy Procedia*, 142, pp. 315-320. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.050>
- Syamsiro, M.; Saptoadi, H.; Norsujianto, T.; Noviasri, P.; Cheng, S.; Alimuddin, Z. & Yoshikawa, K. (2014). Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors. *Energy Procedia*, 47, pp. 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.212>
- Wee, M.; Chin, B.; Saptorio, A.; Chew, J.; Sunarso, J.; Yusup, S. & Sharma, A. (2024). Catalytic co-pyrolysis of oil palm empty fruit bunches (EFB) and surgical face mask (SFM) wastes: Thermo-kinetic study, ANN model fitting, and synergistic effect. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105811>
- Zhang, H.; Tian, B.; Yan, X.; Bai, Y.; Gao, J.; Li, X.; Xie, Q.; Yang, Y. & Li, Y. (2023). Copyrolysis of Waste Cartons and Polyolefin Plastics under Microwave Heating and Characterization of the Products. *ACS Omega*, 8(8). <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05045>
- Zhao, X.; Li, K. E.; Lamm, M.; Celik, S.; Wei, L. & Ozcan, S. (2021). Solid Waste Gasification: Comparison of Single- and Multi-Staged Reactors. En *Gasification* [Working Title]. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96157>
- Zhou, H.; Wu, C.; Onwudili, J.; Meng, A.; Zhang, Y. & Williams, P. (2014). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) formation from the pyrolysis of different municipal solid waste fractions. *Waste Management*, 36, pp. 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.014>

Declaración sobre uso de herramientas de Inteligencia Artificial

El presente artículo fue escrito íntegramente por el autor, con la ayuda de herramientas de IA. Se utilizó ChatGPT 4.0 para cambiar los párrafos escritos por el autor a formato de tabla, según los encabezados utilizados en las tablas 1, 2 y 3. Luego de utilizar las herramientas mencionadas, el autor ha revisado y verificado la validez de los datos presentados y asume plena responsabilidad de los contenidos publicados.

Declaración de posibles conflictos de intereses

El autor declara que no tiene conflicto de intereses.

Luis Adolfo Alvarenga Aguilar

Maestro en Gerencia y Gestión Ambiental e Ingeniero Industrial por la Universidad Católica de El Salvador (UNICAES), donde también se encuentra estudiando el doctorado en Ingeniería Ambiental y, además, se desempeña como docente a tiempo completo e investigador en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Su línea de investigación se enfoca en las energías renovables.

Correo: luis.alvarenga@catolica.edu.sv

Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente.

N° 17 enero – junio 2026. E-ISSN: 2709 – 3689

Cómo citar: Alvarenga Aguilar, L. A. Pirólisis de residuos plásticos y mixtos como una alternativa sustentable para la gestión de residuos sólidos municipales. *Revista Kawsaypacha: Sociedad Y Medio Ambiente*, (17). <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202601.A013>

