



LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS COMO PROCESO CLAVE PARA LA GENERACIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR AGREGADOS: REVISIÓN DE LITERATURA

PYROLYSIS OF AGRICULTURAL RESIDUES AS A KEY PROCESS FOR THE GENERATION OF ADDED-VALUE COMPOUNDS: LITERATURE REVIEW

A PIRÓLISE DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO PROCESSO CHAVE PARA A GERAÇÃO DE COMPOSTOS DE VALOR AGREGADO: REVISÃO DE LITERATURA

Autores:

✉ **Joamely Dayana Vines Martínez*** 

jvines5667@utm.edu.ec

✉ **Maria Eliceth Rodriguez Alcivar** 

bfaublaconsorcioalcantarilladojoaiv@hotmail.com

✉ **Michael Anibal Macias Pro** 

bfaublaconsorcioalcantarilladojoaiv@hotmail.com

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

* Autor para correspondencia.

Resumen

A nivel global, se producen grandes cantidades de residuos agrícolas, que en su mayoría son eliminados mediante prácticas que generan impactos ambientales negativos como la incineración, desaprovechando su potencial de valorización. Esta investigación presenta una revisión narrativa enfocada en el aprovechamiento de los residuos mediante la pirólisis, un proceso de conversión termoquímica en ausencia de oxígeno, con el objetivo de transformarlos en productos con valor agregado. Se realizó una evaluación crítica de la información disponible, considerando la solidez de los resultados y la calidad de fuentes. En total se seleccionaron 86 artículos científicos y se identificó la falta de estudios comparativos sobre las propiedades de los productos obtenidos, los pretratamientos aplicados e información limitada sobre el escalamiento del proceso. Mediante la información obtenida, este estudio respalda el potencial pirolítico de los residuos agrícolas como una estrategia sostenible y que fomenta la economía circular, así como se destaca el requerimiento de investigaciones que exploren su aplicación a escala industrial.

Palabras clave: Residuos agrícolas, Pirólisis, Valor agregado, Variables experimentales, Producción de biocarbón, bioaceite y biogás.

Editor Académico

Solenny M. Parra R. 

Citación sugerida: Vines Martineza, J. D., Rodriguez Alcivar, M. E., Macias Pro, M. A. (2026). La pirólisis de residuos agrícolas como proceso clave para la generación de compuestos de valor agregados: revisión de literatura. *Revista Bases de la Ciencia*, 11(1), 1-17. DOI: 10.33936/revbasdelaciencia.v11i1.7631

Recibido: 17/6/2025

Aceptado: 17/12/2025

Publicado: 01/01/2026

Abstract

Globally, large quantities of agricultural residues are produced, most of which are disposed of through practices that generate negative environmental impacts, such as incineration, thus wasting their valorization potential. This research presents a narrative review focused on the utilization of residues through pyrolysis, a thermochemical conversion process in the absence of oxygen, with the aim of transforming it into value-added products. A critical evaluation of the available information was conducted, considering the robustness of the results and the quality of the sources. A total of 86 scientific articles were selected, and a lack of comparative studies on the properties of the products obtained, the pretreatments applied, and limited information on process scaling were identified. Using the information obtained, this study supports the pyrolytic potential of agricultural residues as a sustainable strategy that promotes the circular economy, and highlights the need for research exploring its application on an industrial scale.

Keywords: Agricultural residues, Pyrolysis, Added value, Experimental variables, Biomass valorization.

Resumo

Globalmente, grandes quantidades de resíduos agrícolas são produzidos, a maioria dos quais é descartada por meio de práticas que geram impactos ambientais negativos, como a incineração, desperdiçando assim seu potencial de valorização. Esta pesquisa apresenta uma revisão narrativa focada na utilização de resíduos por meio da pirólise, um processo de conversão termoquímica na ausência de oxigênio, com o objetivo de transformá-los em produtos de valor agregado. Uma avaliação crítica das informações disponíveis foi conduzida, considerando a robustez dos resultados e a qualidade das fontes. Um total de 86 artigos científicos foram selecionados, e uma escassez de estudos comparativos sobre as propriedades dos produtos obtidos, os pré-tratamentos aplicados e informações limitadas sobre o escalonamento do processo foram identificadas. Usando as informações obtidas, este estudo apoia o potencial pirolítico dos resíduos agrícolas como uma estratégia sustentável que promove a economia circular e destaca a necessidade de pesquisas explorando sua aplicação em escala industrial.

Palavras chave: Resíduos agrícolas, Pirólise, Valor agregado, variáveis experimental, Valorização da biomassa.





1. Introducción

La producción agrícola mundial ha mostrado un crecimiento sostenido en respuesta a la creciente demanda de alimentos. El aumento demográfico y la expansión de la agricultura han generado una multiplicación notable en la generación de residuos agrícolas. Según el informe “Energy Smart Food for People and Climate” de la FAO (2011), se estima que los residuos agrícolas globales oscilan entre 4.600 y 5.000 millones de toneladas al año, siendo la disposición final de estos residuos su principal desafío (Giller et al., 2021).

Una gestión inadecuada en la descomposición de la biomasa favorece la emisión de gases que están directamente vinculados al cambio climático, agravando aún más las implicaciones ambientales y resaltando la necesidad urgente de abordar estos problemas (El-Ramady et al., 2022). Debido a esto, es imperativo explorar tecnologías ecológicas y sostenibles que permitan el tratamiento correcto de los residuos.

Una gestión inadecuada en la descomposición de la biomasa favorece a la emisión de gases que están directamente vinculados al cambio climático, agravando aún más las implicaciones ambientales y resaltando la necesidad urgente de abordar estos problemas (El-Ramady et al., 2022). Debido a esto, es imperativo explorar tecnologías ecológicas y sostenibles que permitan el tratamiento correcto de los residuos.

La pirólisis emerge como una alternativa prometedora, basada en transformaciones térmicas sin oxígeno, convirtiendo la biomasa residual en productos gaseosos, líquidos y/o biocombustibles sólidos (Domazetovska et al., 2023). Su principal ventaja es la capacidad de generar productos de valor agregado, lo que permite generar ingresos adicionales a partir de los residuos transformados. Este proceso también contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y maximizar el valor de los materiales residuales (Colodel et al., 2023; Domazetovska et al., 2023; Hossain et al., 2024).

La eficiencia del proceso pirolítico depende de varios factores, como la temperatura, el tiempo de residencia, el tipo de reactor, los pretratamientos utilizados y la composición de la materia prima. La elección de estas variables influyen directamente en el rendimiento y calidad de los productos (Hu & Gholizadeh, 2019; Li, 2024; Slezak et al., 2023; Yan & Salman, 2023). A pesar de que se ha evidenciado la existencia de instalaciones operativas a escala piloto e industrial, aún persisten desafíos relacionados con los elevados costos de implementación, la variabilidad de la materia prima y la falta de estandarización de condiciones operativas (Amenaghawon et al., 2021; Glushkov et al., 2021; Hu & Gholizadeh, 2020; Raza et al., 2021).

Este estudio tiene como objetivo analizar las variables clave que influyen en el proceso de pirólisis de residuos agrícolas, recopilando información para mejorar procesos experimentales, como pretratamientos específicos, detalles acerca de los reactores y condiciones que pueden influir en el proceso termoquímico. Finalmente, se busca dar a conocer distintos enfoques experimentales, con la finalidad de buscar la mejora y aplicación de la pirólisis a gran escala en entornos industriales, y se explora su futuro como alternativa sostenible para la gestión de residuos agrícolas y como fuente de productos de valor agregado.

2. Metodología

Esta investigación se basa en una revisión narrativa de literatura enfocada en el estudio del potencial que tienen los desechos agrícolas para producir compuestos con valor agregado a través de procesos termoquímicos. Se llevó a cabo la búsqueda bibliográfica en las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS), tomando en cuenta las publicaciones en inglés desde 2019 hasta 2024. Se emplearon operadores booleanos, utilizando combinaciones como: “*pyrolysis AND agricultural residues*”, “*biomass valorization OR added-value products*” y “*biochar OR bio-oil OR syngas AND agricultural waste*”. La recuperación de literatura especializada y relevante fue posible gracias a estos operadores.

Se eligieron como criterios de inclusión artículos indexados con acceso a texto completo, ya sea de pago o de acceso abierto, que hayan sido publicados en revistas de alto impacto y que tengan una conexión directa con la valorización de residuos agrícolas mediante la pirólisis. Las investigaciones en revistas regionales, bases de datos no indexadas, idiomas que no sean el inglés o con información incompleta fueron descartadas. A partir de estos criterios se seleccionaron 86 artículos, que constituyen la base del presente análisis. Se procuró garantizar transparencia y trazabilidad metodológica en la selección de literatura.

La síntesis de la información se realizó de manera analítica y comparativa, agrupando los estudios según (i) tipo de residuo agrícola y pretratamientos empleados, (ii) condiciones de operación (temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, catalizadores), y (iii) productos obtenidos (biocarbón, bioaceite, biogás). Esta clasificación



permitió identificar tendencias comunes, diferencias entre enfoques experimentales y hallazgos relevantes para la valorización de la biomasa.

Asimismo, se efectuó una evaluación crítica de la evidencia, considerando el impacto de las revistas, el rigor metodológico de los estudios y la solidez de los resultados reportados, lo cual permitió integrar la información de manera coherente y consistente. Esto permitió ponderar la calidad y consistencia de la literatura analizada, identificar sesgos derivados de metodologías heterogéneas y resaltar aquellos trabajos con mayor solidez científica.

3. Resultados y discusión

Fundamentos de la Pirólisis

La pirólisis, como proceso de transformación de materia orgánica, se caracteriza por desarrollarse en una atmósfera inerte y el uso temperaturas elevadas, las cuales desencadenan la liberación de energía esencial para la descomposición de la estructura química de la biomasa (Almagro-Herrera et al., 2024; Igliński et al., 2023).

El proceso de pirólisis se puede clasificar en tres categorías, denominadas pirólisis lenta, rápida y flash o instantánea, según los parámetros operativos, principalmente la temperatura de degradación aplicada a la materia prima (Aboelela et al., 2023; Domazetovska et al., 2023). La pirólisis lenta conduce a la formación de un sólido poroso conocido como biocarbón (Amalina et al., 2022). En contraste, la pirólisis rápida y flash producen líquidos derivados del proceso y gases de pirólisis (como hidrógeno y metano, respectivamente) (Afraz et al., 2024; Karkach et al., 2023).

Durante la pirólisis surgen rutas complejas que no pueden ser claramente definidas por un conjunto de reacciones químicas. Sin embargo, es posible representarlo mediante dos fases (Figura 1) (Osman et al., 2023). En la fase primaria, la descomposición térmica resulta en la creación de anillos de benceno que se combinan para formar biocarbón. Por otra parte, ocurre la liberación de moléculas de agua y sustancias volátiles como resultado de la despolimerización, y la generación de productos gaseosos a partir de la fragmentación (Al-Rumaihi et al., 2022; Osman et al., 2023). En la fase secundaria, los compuestos inestables sufren reacciones de cracking o recombinación y durante el cracking los compuestos inestables se descomponen en moléculas de menor peso molecular. En contraste, la recombinación transforma los compuestos de bajo peso molecular en compuestos inertes o volátiles de mayor peso y en algunas circunstancias carbón secundario (Al-Rumaihi et al., 2022; Amenaghawon et al., 2021; Osman et al., 2023).

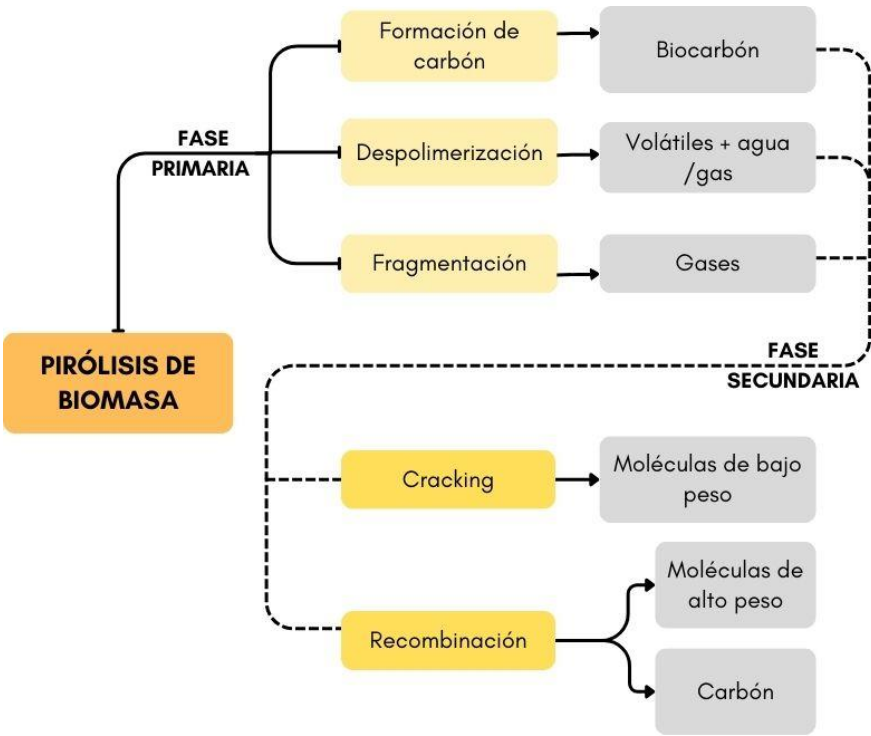


Figura 1. Esquema del proceso pirolítico en biomasa. Fuente: Autoría propia.



Materias Primas y Residuos Agrícolas

Las materias primas lignocelulósicas provenientes de residuos agrícolas destacan por ser una fuente de fácil acceso, económica y renovable (Cintura et al., 2024; Gaminian et al., 2024; Magalhães et al., 2024; Ojha et al., 2021). Las actividades agrícolas se caracterizan por ocupar extensas superficies a nivel global; países como Brasil, China, India y Estados Unidos se destacan por su alta actividad agrícola de cultivos como el trigo, maíz, arroz, entre otros, lo que los convierte en grandes generadores de residuos, incrementando potencialmente la disponibilidad de materia prima para la pirólisis y otras actividades industriales sostenibles (Antar et al., 2021; Deng et al., 2023; Giller et al., 2021; Rex et al., 2023).

Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica se compone principalmente de tres polímeros: celulosa (40-60 %), hemicelulosa (20-40 %) y lignina (10-25 %) (Deng et al., 2023), además de cierto contenido de ceniza y extractivo que corresponde a minerales y compuestos secundarios. Sin embargo, las proporciones de estos componentes no son fijas (Tabla 1), sino que dependen del tipo de residuo que será procesado, así como también de la parte del cultivo que se va a utilizar, ya que los tallos y hojas contienen más celulosa y hemicelulosa, mientras que las cáscaras y fibras suelen contener más lignina.

Los componentes lignocelulósicos destacan por sus diferentes estructuras; entre ellos, la celulosa se caracteriza por ser un macro polímero compuesto de cadenas largas de D-glucosa con enlaces glicosídicos (β -1-4) y posee una estructura cristalizada (C. Zhang et al., 2021). Por otro lado, la hemicelulosa es un polisacárido complejo que crea conexión entre la celulosa y la lignina, es naturalmente no cristalina y se disuelve fácilmente (Osman et al., 2023). La lignina es el polímero tridimensional más grande que aporta rigidez a la planta, es considerado el más complejo y difícil de degradar, componente más grande, es un polímero tridimensional que brinda rigidez, siendo este el más difícil de fracturar (Balk et al., 2023; Essel & Raynie, 2025; Mujtaba et al., 2023).

Cabe destacar que las fracciones lignocelulósicas de los residuos agrícolas se relacionan directamente con los productos resultantes. Algunos autores como Osman et al., (2024) concluyeron que la celulosa favorece a la producción de bioaceite, la hemicelulosa da una mayor generación de gas pirolítico y finalmente, la lignina, al ser la más difícil de quebrar, producirá mayormente biocarbón.

Tabla 1. Diferentes composiciones lignocelulósicas.

Biomasa	% Celulosa	% Hemicelulosa	% Lignina	% Ash	Referencia
Tallo seco de arroz (Paja)	32	22	19.2	17	(Goodman, 2020)
Cáscara de arroz	40	20	18	10	(Yan et al., 2021)
Rastrojo de maíz	45	28	19.6	9	(Liu et al., 2023)
Bagazo de caña de azúcar	38	39	20	4	(Glushkov et al., 2021)

Pretratamientos de la biomasa lignocelulósica

El pretratamiento de biomasa lignocelulósica se puede definir como el uso de un agente externo, ya sea químico, físico, térmico o biológico, para modificar o poner en riesgo la resistencia de los elementos de hemicelulosa y lignina (Figura 2). De esta forma aumenta la disponibilidad de los componentes lignocelulósicos para su procesamiento en productos valiosos (Essel & Raynie, 2025; S. Zhang et al., 2019).



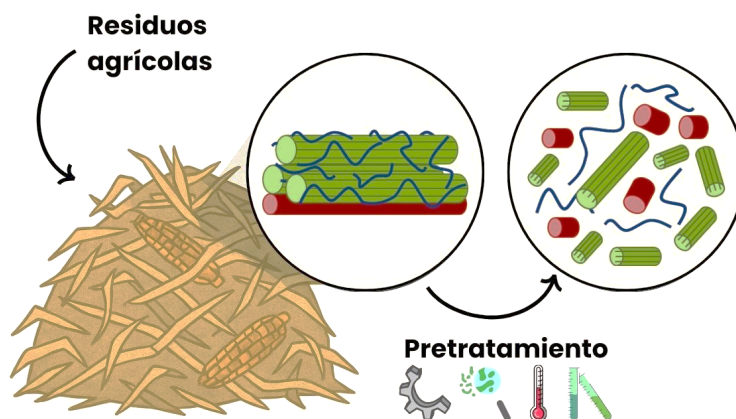


Figura 2. Efecto del pretratamiento en la estructura lignocelulósica. Fuente: Autoría propia.

Pretratamiento térmico

La mayoría de residuos agrícolas poseen un alto contenido de humedad, lo que conlleva un mayor consumo de energía, costes y duración del proceso pirolítico, por lo que se requiere de temperaturas controladas para evaporar el mayor contenido de agua posible. Uno de los tratamientos térmicos que destacan es el secado, que se lleva a cabo a temperaturas de hasta 150 °C (Amenaghawon et al., 2021; Hu & Gholizadeh, 2019). Entre los métodos térmicos utilizados, destaca también la torrefacción. Huang et al. (2020) la utilizaron en materia prima rica en lignina, logrando eliminar el 22,27 % de oxígeno a 300 °C, marcando una disminución notable de oxigenados innecesarios en el bioaceite obtenido.

Slezak et al. (2023) indicó que el pretratamiento térmico de la biomasa aporta múltiples beneficios adicionales, como facilitar la molienda y otros tratamientos mecánicos posteriores, debido a que las partículas secas son más quebradizas. Además, disminuye el riesgo de obstrucción de los equipos, tales como molinos debido a que la biomasa húmeda puede adherirse a estos, y mejora su alimentación al reactor.

Pretratamientos físicos

En este pretratamiento se requiere aplicar fuerzas mecánicas y técnicas físicas para lograr una reducción de tamaño de partícula (Deng et al., 2023), y que la transferencia de calor sea más eficiente y uniforme (Al-Rumaihi et al., 2022; Milićević et al., 2023; Zadeh et al., 2020), para fragmentar la biomasa en componentes más manejables y compactos, aumentando el área de contacto, facilitando su almacenamiento y transporte (Deng et al., 2023; Zadeh et al., 2020). Para Kumar et al., (2020) algunos procedimientos mecánicos constituyen un paso inicial para conseguir un tamaño de partícula apropiado previo al pretratamiento químico o biológico. Sin embargo, los autores indicaron que algunos pretratamientos mecánicos extensos como la molienda pueden actuar como un tratamiento previo independiente, rompiendo la cristalización de la celulosa y mejorando así la digestibilidad de la biomasa.

Pretratamientos químicos

Este tipo de procedimiento previo desempeña un rol importante en la mejora de las propiedades del producto resultante, al eliminar materiales inorgánicos no deseados (Cen et al., 2021). Este proceso implica la utilización de pretratamientos especializados, tales como hidrólisis ácida y básica, cada uno con funciones específicas que contribuyen a modificar la composición de la biomasa agrícola.

Los pretratamientos ácidos se destacan por liberar azúcares fermentables e hidrolizar la hemicelulosa, brindando una mejora a la materia prima. La acción selectiva de los ácidos degrada componentes específicos, mejorando tanto la eficiencia del proceso como la calidad del producto final (Hoang et al., 2021). Chen et al. (2021) investigaron



sobre el uso del lavado ácido (con ácido clorhídrico) en el tallo seco de maíz, obteniendo como resultado que este tratamiento eliminó la mayoría de metales presentes en la biomasa estudiada, redujo la energía de activación y mejoró el contenido de la celulosa y hemicelulosa.

Paralelamente, los pretratamientos alcalinos utilizan soluciones como hidróxido de sodio, calcio o potasio para mejorar la estructura de la biomasa, desencadenando la eliminación considerable de lignina y hemicelulosa (Zadeh et al., 2020). En cuanto a su viabilidad económica, dependerá del tipo de reactivo a utilizar, en comparación al método ácido en el cual todos los reactivos presentan costos elevados y se requiere de equipos especializados (Donkor et al., 2022).

Pretratamientos biológicos

El pretratamiento biológico es ventajoso frente a otros métodos, debido a los bajos costos de procesamiento, poco requerimiento de energía y al no emplear productos químicos evita la liberación de compuestos tóxicos, por ello se lo denomina proceso verde. Estos pretratamientos biológicos utilizan hongos y bacterias que pueden generar enzimas hidrolíticas y oxidativas capaces de descomponer la estructura lignocelulósica (Rusănescu et al., 2024).

La celulosa y la hemicelulosa se descomponen a través de procesos anaerobios, mientras que los hongos y bacterias degradan eficientemente la lignina (Ummalyma et al., 2019). Sin embargo, para cada componente lignocelulósico se debe seleccionar el medio biológico adecuado. Según la investigación de Amenaghawon et al., (2021) los hongos de podredumbre blanca son los encargados de descomponer principalmente la lignina de manera natural y en menor medida la celulosa y hemicelulosa. En cambio, los hongos de podredumbre oscura descomponen la celulosa y la hemicelulosa, dejando la lignina intacta. Ma et al., (2021) utilizaron hongos de podredumbre blanca en restos de madera de álamo, obteniendo una disminución de la celulosa, hemicelulosa y lignina en un 16 %, 48 % y 70 %, respectivamente, después de 7 días de fermentación.

Productos y aplicaciones de la pirólisis

Los productos obtenidos mediante pirólisis no solo destacan por su gran utilidad y versatilidad en la industria, sino también por tener un impacto ambiental equilibrado o favorable, en comparación con los combustibles fósiles. Esto los convierte en una opción relevante en cuanto a sus aplicaciones en la industria, ya que minimizan los efectos negativos en el medio ambiente, presentando un equilibrio entre su utilidad industrial y su impacto ambiental (Figura 3).

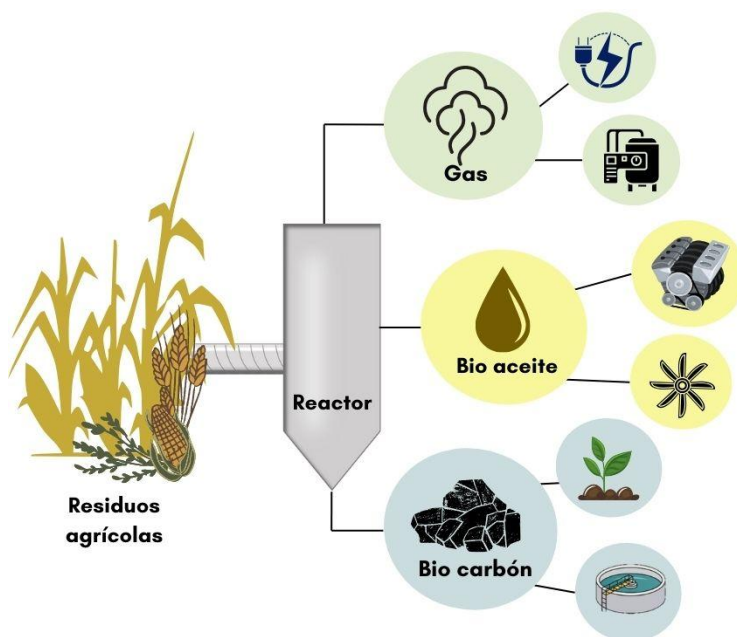


Figura 3. Aplicaciones de los diferentes productos obtenidos de la pirólisis. Fuente: Autoría propia.

Inicialmente, la biomasa lignocelulósica puede transformarse en diversos productos químicos conocidos como plataforma, son moléculas intermedias que sirven como base para la síntesis de una amplia gama de productos (Zielińska & Bułkowska, 2024). A partir de los plataforma se obtienen otros compuestos más complejos como el furfural, ácido láctico, el ácido succínico, el ácido maleico, el ácido levulínico, el ácido fumárico, glicerol, sorbitol, entre otros (Cho et al., 2020). A partir de los compuestos plataforma surgen los compuestos de valor agregado, que poseen aplicaciones específicas y comerciales.

Biocarbón

Como resultado de la pirólisis lenta, ocurre la degradación, descomposición y conversión de la biomasa con la formación de un producto sólido, que se caracteriza por ser permeable, altamente poroso, aromático, rico en carbono total y orgánico, así como también posee un contenido de cenizas y humedad (Campos et al., 2020; Gryta et al., 2024; Khuenkao & Tippayawong, 2020; Nie et al., 2021).

Nie et al. (2021) afirmaron que el biocarbón posee grandes áreas superficiales, alta capacidad de intercambio catiónico y abundantes grupos funcionales que contienen oxígeno. A su vez, Qin et al. (2022) señalaron que el biocarbón tiene potencial en la gestión ambiental como en el almacenamiento de energía gracias a su alta porosidad, capacidad de intercambio iónico y es un buen medio absorbente. Además, contribuye a mejorar la fertilidad del suelo, facilita la remoción de contaminantes y funciona como servidor de nutrientes, promoviendo así el crecimiento y desarrollo vegetal (Afraz et al., 2024). Panwar et al., (2019) resaltaron que la conversión de residuos agrícolas en biocarbón podría contribuir al mejoramiento de entre el 6,3 % y el 11,8 % del área de producción agrícola por año, lo que favorece la recuperación de suelos y la eficiencia productiva de manera sostenible. Mientras que en el estudio realizado por Mazurek et al., (2024), se afirma que el biocarbón es la gran promesa de adsorción en el tratamiento de aguas residuales. Los autores coinciden que gracias a su estructura, puede eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos. Resaltan que el biocarbón es un material que requiere de bajos costos y poca energía para su producción, lo que representa una ventaja tanto desde el punto de vista ambiental como económico, si bien cada estudio aborda el uso del biocarbón desde una perspectiva particular, sus hallazgos no se contradicen, sino que se complementan entre sí.

Bioaceite

El bioaceite se caracteriza por un tono marrón oscuro y elevada viscosidad, el bioaceite es un líquido con algunas partículas sólidas y un aroma penetrante (Gupta & Mondal, 2021). Este producto es apto para ser empleado como biocombustible en motores de combustión, quemadores, hornos y turbinas de gas. En un principio, este líquido es inestable, susceptible al envejecimiento y con niveles reducidos de azufre y nitrógeno, lo que demanda un proceso de mejora para enfrentar estas restricciones y potenciar su eficacia y adaptabilidad (Aboelela et al., 2023; Gupta & Mondal, 2021; Hu & Gholizadeh, 2019; Lachos-Perez et al., 2023; Srivastava et al., 2020).

Shah et al. (2021) pirolizó cáscara de nuez para obtener bioaceite, determinando que este producto está predominado por hidrocarburos ligeros, compuestos oxigenados y trazas de compuestos de azufre y nitrógeno. Además, en la investigación destacan que el bioaceite obtenido produce menos óxidos de nitrógenos, óxidos de azufre y monóxido de carbono que el diésel en una turbina. Los autores concluyeron que este producto puede ser utilizado en hornos, como combustible y como lubricante luego de ciertas modificaciones.

Entre los factores que afectan las características y el rendimiento del bioaceite, la temperatura pirolítica tiene una influencia directa, siendo más altos los rendimientos a temperaturas más elevadas, hasta alcanzar una temperatura máxima determinada. Zadeh et al., (2020) señalaron que la biomasa también es determinante para el rendimiento de la obtención del bioaceite, se ha demostrado que un mayor contenido de celulosa en la materia prima mejora el rendimiento del bioaceite.

Gas pirolítico

La fase de vapor no condensable se denomina gas de síntesis o gas pirolítico, que incluye dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), propano (C_3H_8), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (N_xO_y) y amoníaco (NH_3) (Hu & Gholizadeh, 2020; Osman et al., 2023). Estos gases pirolíticos se pueden clasificar en tres categorías: gases incombustibles, gases combustibles y gases que contienen nitrógeno (Volpi et al., 2024; Zadeh et al., 2020).



El gas de síntesis presenta una composición rica en hidrógeno y monóxido de carbono, es por ello que puede figurar en múltiples aplicaciones. Como lo hacen notar Gupta et al., (2019), su uso potencial se destaca en diversas tecnologías, como las pilas de combustible y las turbinas de gas, en donde se aprovecha la generación combinada de calor y electricidad. Igliński et al., (2023) mencionan que este gas puede ser empleado en el mismo proceso pirolítico, debido a que es capaz de cubrir los requisitos energéticos del sistema y ejercer como precalentador del gas inerte, mejorando la eficacia global del proceso.

Tecnologías y Reactores de Pirólisis:

El reactor es la parte principal de cualquier proceso de pirólisis, siendo denominado como el corazón del proceso (Yan & Salman, 2023). Existe una amplia variedad de reactores, los cuales pueden ser clasificados según diferentes criterios, incluyendo la velocidad de calentamiento, el modo de funcionamiento (discontinuo o continuo), el sistema de calentamiento (directo o indirecto), la presión dentro del reactor y su portabilidad. Su selección es un factor determinante de la calidad, cantidad y propiedades del producto a obtener (Amenaghawon et al., 2021; Hu & Gholizadeh, 2019; Slezak et al., 2023).

La elección del reactor adecuado va acorde al tipo de pirólisis, debido a las diferentes condiciones de operación y características físicas de la materia prima. Además, la elección del reactor indicado favorece a la de-composición térmica eficiente y la obtención de los productos deseados (Lewandowski et al., 2019; Slezak et al., 2023).

Los reactores utilizados en la pirólisis de residuos cumplen funciones características en el desarrollo del proceso. Generalmente, el reactor de lecho fijo, utilizado a escala de laboratorio, se distingue por calentar la biomasa a temperaturas específicas mientras se eliminan los subproductos de la pirólisis con la ayuda de un gas inerte (Igliński et al., 2023; Yan & Salman, 2023). Shah et al., (2021) pirolizaron cáscara de nuez en un reactor de lecho fijo a 550 °C, con una velocidad de calentamiento de 0,33K/seg y un tamaño de partícula de 0,5–1,5mm, obteniendo bioaceite, biocarbón y gas en un 44,7 %, 37,6 % y 40,4 % en peso respectivamente.

En cambio, los reactores de tornillo resaltan por su habilidad para garantizar una distribución uniforme de la biomasa y transferir calor eficazmente por medio de la combinación de biomasa y vapor, alcanzando temperaturas de pirólisis entre 400 °C y 800 °C (Campuzano et al., 2019; Sharifzadeh et al., 2019; Yan & Salman, 2023).

Al usar vapores sobrecalentados o gas inerte a alta velocidad, los reactores ablativos, facilitan la pirólisis rápida mediante el calentamiento de la biomasa a través de contacto con una superficie caliente (Sharifzadeh et al., 2019; Yan & Salman, 2023). Al contrario, los reactores de pirólisis al vacío, operando con material calentado en presencia de gas, son utilizados para estudiar los cambios termoquímicos (Raza et al., 2021; Slezak et al., 2023).

Por su parte, los reactores de lecho fluidizado burbujeante destacan en la obtención de bioaceite, donde la biomasa se encuentra con un medio de arena caliente. Los reactores de lecho fluidizado circulante se diferencian de los reactores de lechos fluidizados burbujeantes por sus tiempos de residencia más breves y velocidades de gas más altas y reciclan gas para proporcionar el calor necesario (Hu & Gholizadeh, 2019; Raza et al., 2021; Yan & Salman, 2023). Mientras, los reactores de cono rotatorio inician la pirólisis con alta presión y transferencia de calor, utilizando un cono giratorio para desplazar las partículas de biomasa y generar productos como bioaceite y biocarbón (Slezak et al., 2023; Yan & Salman, 2023).

Condiciones de operación óptimas

En el proceso de pirólisis, se han establecido factores esenciales como la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de permanencia y la utilización de catalizadores. A través del ajuste de estos parámetros se mejora el proceso y, consecuentemente, los productos que se obtienen.

Temperatura pirolítica

El proceso de pirólisis de biomasa consta de tres rangos de temperatura, cada uno favorece la formación de diferentes productos específicos. Slezak et al. (2023) indica que el primer rango es de <200 °C, donde se evidencia la evaporación de agua y sustancias volátiles. A partir de 200 °C hasta los 600 °C se da netamente el proceso pirolítico, donde se descomponen los compuestos biodegradables y no biodegradables. Finalmente, a más de 600 °C se evidencia el último rango de temperatura, donde se observa la mayor descomposición de compuestos orgánicos.

La temperatura es considerada la variable más importante en la pirólisis debido a la influencia que tiene en la composición de los productos resultantes. Chen et al. (2022) en un estudio experimental de pirólisis de biomasa lignocelulósica con temperaturas de 400 y 800 °C, determinaron el efecto de la temperatura en la generación de productos de pirólisis, obteniendo que en un rango de 450 a 700 °C se da la mayor producción de bioaceite, mientras que a mayor temperatura se generan más gases. Otros estudios como el de Stegen & Kaparaju (2020) investigaron el efecto de la temperatura (300-650 °C) sobre la calidad del bioaceite y los rendimientos durante la pirólisis del bagazo de caña de azúcar. Los resultados mostraron que la temperatura tuvo una profunda influencia en el rendimiento de los productos de pirólisis y en la calidad del bioaceite. Los análisis de laboratorio reflejaron que el mayor rendimiento de bioaceite fue 56,6 % en peso y se alcanzó a 500°C, mientras que las cantidades máximas de biocarbón y gas fueron 53,5 % y 32,9 % en peso respectivamente, se obtuvieron a 300 °C, seguidas de 400 °C.

La temperatura también influye en parámetros como la velocidad de las reacciones químicas, el control de la degradación térmica y la optimización del proceso. El control de la temperatura es importante para evitar la degradación excesiva de la materia prima y maximizar la eficiencia y rendimiento del proceso, adaptándolo a las características específicas del material y los objetivos de producción (Al-Rumaihi et al., 2022; Amenaghawon et al., 2021; Usino et al., 2020; Wang et al., 2022).

Velocidad de calentamiento y tiempo de residencia

La tasa de calentamiento es el principal indicador del tipo de pirólisis (lenta o rápida). Las bajas velocidades de calentamiento provocan que la materia prima tenga un tiempo de residencia mayor para poder alcanzar la temperatura a la cual se desea pirolizar (Aboelela et al., 2023). En cuanto a la influencia en la generación de productos pirolíticos, se ha determinado que las altas tasas de calentamiento incitan la fragmentación, aumentando el rendimiento del aceite y el gas. Además, las tasas de calentamiento reducidas inician la etapa secundaria de la pirólisis, promoviendo la generación del biocarbón (Ahmad et al., 2021).

Se ha establecido que la tasa de calentamiento es de 1-100 °C/min en pirólisis lenta, mientras que en pirólisis rápida se requieren tasas de calentamiento que van de 100-1000 °C/min. La pirólisis flash no está incluida en este parámetro debido a que las velocidades de calentamiento mayores a 1000 °C/min son difíciles de lograr a escala industrial (Hu & Gholizadeh, 2019; Slezak et al., 2023). Atakoohi et al., (2023) investigaron el efecto del aumento de la velocidad de calentamiento (de 5 a 50 K min⁻¹) en huesos de aceituna, encontrando un aumento del 22 % en la producción de líquido y gas pirolítico, y la disminución del 20 % de rendimiento del biocarbón.

Durante la transformación pirolítica, el tiempo también desempeña un papel importante en la distribución de los productos finales, ya que las variaciones en este parámetro pueden aumentar o disminuir los rendimientos de producción (Aboelela et al., 2023; Raza et al., 2021). Estudios previos permiten afirmar que períodos más prolongados aumentan el rendimiento del gas pirolítico, aunque al mismo tiempo reducen de manera significativa el rendimiento del biocarbón. Investigaciones recientes indican que el mayor rendimiento de carbón se alcanza a una temperatura de 600 °C durante un periodo de 30 minutos. Sin embargo, este rendimiento disminuyó al aumentar la temperatura a 800 °C durante 60 minutos, lo que favoreció la producción de gases (Amenaghawon et al., 2021; Suresh et al., 2021).

Catalizadores

En el proceso de pirólisis de biomasa se puede hacer uso o no de catalizadores, debido a que cada catalizador ofrece ventajas y limitaciones específicas (Bharti et al., 2021). Las zeolitas, óxidos metálicos y metales alcalinos son algunos de los catalizadores más utilizados (Amenaghawon et al., 2021; W. H. Chen et al., 2024; Margellou et al., 2021) (Tabla 2). Los catalizadores disminuyen la energía de activación de las reacciones químicas deseadas, de este modo aumenta su velocidad de forma significativa y, en consecuencia, reducir los tiempos requeridos para que estas se produzcan (Bharti et al., 2021; Bohlouli & Mahdavian, 2021). Dentro de los beneficios de los agentes catalíticos también destaca su capacidad para modificar la distribución de productos, aumentando el rendimiento de los compuestos deseados (Muhammad & Manos, 2021). Generalmente, los catalizadores aumentan el rendimiento del biogás, mejoran la calidad del bio aceite y reducen la generación de carbón (W. H. Chen et al., 2024).

Aboelela et al. (2023) resaltaron que los catalizadores desempeñan un buen trabajo en la reducción de la formación de productos no deseados, como el coque y el alquitrán, al catalizar reacciones secundarias que los convierten en productos más valiosos o al promover su gasificación. De igual forma, destacan que este parámetro también favorece la viabilidad económica del proceso, debido a que algunos de estos catalizadores pueden ser regenerados y reutilizados, de esta forma se reducen los costos del catalizador y se afina la sostenibilidad global del proceso.





Tabla 2. Características de los catalizadores.

Catalizador	Características	Referencia
Zeolitas	Mejora el rendimiento y calidad del bioaceite y vapores. Destaca por su intercambio iónico e hidrataciones/deshidrataciones reversibles.	(Đang et al., 2021; Nisar et al., 2021; Ong et al., 2019)
Óxidos metálicos	Tienen una gran cantidad de sitios activos, por lo que ofrecen una alta actividad catalítica. Proporcionan una catálisis eficaz de diferentes reacciones.	(Vasić et al., 2020)
Haluros	Pueden ser usados en su forma metálica o iónica. Los catalizadores de haluros muestran los mejores resultados.	(Nisar et al., 2021)

Aplicaciones industriales y escalabilidad

La escalabilidad pirolítica permanece en desarrollo constante; sin embargo, es importante resaltar que persisten desafíos que limitan su establecimiento a nivel industrial (Blasi et al., 2023). A gran escala, se requiere producir de manera constante y continua grandes volúmenes de los productos deseados, por lo que se demanda de una gran cantidad de materia prima procesada, del caudal de gas y la energía requerida. Son estos factores los que influyen en el incremento de los costos de operación y mantenimiento de la planta (Hossain et al., 2024). El procesamiento de grandes cantidades de residuos también presenta retos logísticos adicionales, como el almacenamiento, transporte y preparación previa del material, siendo influyente en la eficiencia general del proceso. A nivel mundial, se han establecido algunas instalaciones de pirólisis dedicadas tanto a la investigación como a la producción a escala comercial e industrial (Tabla 3). A través de estas plantas piloto y comerciales se demuestra la viabilidad técnica de la pirólisis de biomasa, aunque su replicabilidad a gran escala aún depende de superar las barreras tecnológicas, económicas y logísticas mencionadas.

Tabla 3. Plantas de pirólisis que operan en el mundo (Amenaghawon et al., 2021; Glushkov et al., 2021; Hu & Gholizadeh, 2020; Raza et al., 2021).

Organización	Locación	Reactor	Feed Rate	Producto
DynaMotive	Canadá	Lecho fluidizado burbujeante	400 kg h ⁻¹	Aceite, carbón y gas pirolítico
BTG	Malasia	Cono giratorio	50 t d ⁻¹	Bioaceite
Ensyn	Canadá	Lecho fluidizado circulante	100 t d ⁻¹	Bioaceite
Choren	Alemania	Horno calentado	180 t d ⁻¹	Gas pirolítico
Fortum	Finlandia	Lecho fluidizado circulante	274 t d ⁻¹	Bioaceite
Anellotech	Texas, USA	Lecho fluido	500 t d ⁻¹	Combustibles

Otro aspecto crítico en la escalabilidad es la necesidad de mantener la calidad y la estabilidad de los productos obtenidos, ya que la variabilidad en las características de la biomasa a gran escala puede afectar la reproducibilidad de los resultados. Esto requiere no solo de un control riguroso de las condiciones de operación (temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia), sino también de innovaciones en el diseño de reactores que permitan operar de manera eficiente bajo diferentes condiciones de carga.

Por estos motivos, resulta indispensable realizar evaluaciones tecno económicas detalladas y análisis de ciclo de



vida que consideren no sólo la eficiencia del proceso, sino también los impactos ambientales y la sostenibilidad a largo plazo (Blasi et al., 2023; Venkatramanan et al., 2021). Estas herramientas permiten identificar puntos críticos de mejora y estrategias para potenciar el balance energético y económico del proceso.

4. Conclusiones

La pirólisis se presenta como una alternativa innovadora en cuanto a la valorización de residuos agrícolas, proporcionando un método sostenible para la elaboración de materiales con valor ligados a la economía circular. A pesar de esto, la pirólisis se enfrenta con múltiples retos tanto técnicos como operativos que impactan su desempeño y eficacia. Uno de ellos radica en los líquidos derivados directamente de pirólisis, que muestran variables negativas significativas que interfieren en su aplicación a escala industrial, a causa de su elevado contenido de oxígeno y humedad, escasa estabilidad, una intensa acidez y bajo poder calorífico. Sin embargo, estas restricciones pueden ser mitigadas mediante el empleo de pretratamientos para mejorar la obtención de productos líquidos o químicos de gran valor. Los desafíos económicos que enfrentan los productores al querer dar inicio a una planta operativa de pirólisis, son los costos tan elevados que se necesitan para montar toda una planta pirolítica. Como respuesta a este problema, aparecen los análisis tecno económicos orientados a las instalaciones de pirólisis, los cuales aportan al crecimiento y expansión de más plantas de operación; no obstante, se necesita un mayor desarrollo de esta tecnología. En este estudio se han recopilado y comparado datos experimentales que puedan contribuir a superar los desafíos que actualmente presenta la pirólisis. Además, se ha determinado que pese a los retos técnicos y financieros que limitan la implementación de la pirólisis a escala industrial, se prevé que estos desafíos sean vencidos. En este contexto, la constante investigación y desarrollo de nuevas tecnologías serán piezas fundamentales para fortalecer el proceso pirolítico de residuos agrícolas, permitiendo un incremento en la escalabilidad y brindando posibilidades para la sostenibilidad a largo plazo.

5. Conflicto de intereses

El autor declara que no existe ningún conflicto de intereses.

6. Referencias

- Aboeela, D., Saleh, H., Attia, A. M., Elhenawy, Y., Majoz, T., & Bassyouni, M. (2023). Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. *Sustainability*, 15(14), 11238. <https://doi.org/10.3390/SU151411238>
- Afraz, M., Muhammad, F., Nisar, J., Shah, A., Munir, S., Ali, G., & Ahmad, A. (2024). Production of value added products from biomass waste by pyrolysis: An updated review. *Waste Management Bulletin*, 1(4), 30-40. <https://doi.org/10.1016/J.WMB.2023.08.004>
- Ahmad, J., Patuzzi, F., Rashid, U., Shahabz, M., Ngamcharussrivichai, C., & Baratieri, M. (2021). Exploring untapped effect of process conditions on biochar characteristics and applications. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101310. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.101310>
- Almagro-Herrera, N., Lozano-Calvo, S., Palma, A., García, J. C., & Díaz, M. J. (2024). Assessing the influence of biomass origin and fractionation methods on pyrolysis of primary biomass fractions. *Fuel*, 367, 131501. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.131501>
- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112715. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>
- Amalina, F., Razak, A. S. A., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications – A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100134. <https://doi.org/10.1016/J.HAZADV.2022.100134>



- Amenaghawon, A. N., Anyalewechi, C. L., Okieimen, C. O., & Kusuma, H. S. (2021). Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review. *Environment, Development and Sustainability*, 23(10), 14324-14378. <https://doi.org/10.1007/S10668-021-01276-5>
- Antar, M., Lyu, D., Nazari, M., Shah, A., Zhou, X., & Smith, D. L. (2021). Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110691. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110691>
- Atakoohi, S. E., Spennati, E., Casazza, A. A., Riani, P., & Garbarino, G. (2023). Investigating the Effect of Operational Variables on the Yield, Characterization, and Properties of End-of-Life Olive Stone Biomass Pyrolysis Products. *Molecules*, 28(18), 6516. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28186516>
- Balk, M., Sofia, P., Neffe, A. T., & Tirelli, N. (2023). Lignin, the Lignification Process, and Advanced, Lignin-Based Materials. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14), 11668. <https://doi.org/10.3390/IJMS241411668>
- Bharti, M. K., Chalia, S., Thakur, P., Sridhara, S. N., Thakur, A., & Sharma, P. B. (2021). Nanoferrites heterogeneous catalysts for biodiesel production from soybean and canola oil: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(5), 3727-3746. <https://doi.org/10.1007/S10311-021-01247-2>
- Blasi, A., Verardi, A., Lopresto, C. G., Siciliano, S., & Sangiorgio, P. (2023). Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview. *Recycling*, 8(4), 61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>
- Bohlouli, A., & Mahdavian, L. (2021). Catalysts used in biodiesel production: a review. *Biofuels*, 12(8), 885-898. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1558836>
- Campos, P., Miller, A. Z., Knicker, H., Costa-Pereira, M. F., Merino, A., & De la Rosa, J. M. (2020). Chemical, physical and morphological properties of biochars produced from agricultural residues: Implications for their use as soil amendment. *Waste Management*, 105, 256-267. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.013>
- Campuzano, F., Brown, R. C., & Martínez, J. D. (2019). Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (pp. 372-409, Vol. 102). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014>
- Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Ma, Z., Li, M., & Chen, D. (2021). Effect of the combined pretreatment of leaching and torrefaction on the production of bio-aromatics from rice straw via the shape selective catalytic fast pyrolysis. *Energy Reports*, 7, 732-739. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.031>
- Chen, D., Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Zhou, J., Zhang, Y., & Zhang, H. (2022). Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. *Combustion and Flame*, 242, 112142. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142>
- Chen, D., Gao, D., Huang, S., Capareda, S. C., Liu, X., Wang, Y., Zhang, T., Liu, Y., & Niu, W. (2021). Influence of acid-washed pretreatment on the pyrolysis of corn straw: A study on characteristics, kinetics and bio-oil composition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, 105027. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2021.105027>
- Chen, W. H., Ho, K. Y., Aniza, R., Sharma, A. K., Saravanakumar, A., & Hoang, A. T. (2024). A review of noncatalytic and catalytic pyrolysis and co-pyrolysis products from lignocellulosic and algal biomass using Py-GC/MS. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.01.020>
- Cho, E. J., Trinh, L. T. P., Song, Y., Lee, Y. G., & Bae, H. J. (2020). Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. *Bioresource Technology*, 298, 122386. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122386>
- Cintura, E., Faria, P., Molari, L., Barbaresi, L., D'Orazio, D., & Nunes, L. (2024). A feasible re-use of an agro-industrial by-product: Hazelnut shells as high-mass bio-aggregate in boards for indoor applications. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140297. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.140297>



- Colodel, C., Reichembach, L. H., & Petkowicz, C. L. O. (2023). Value-Added Products from Agricultural Wastes: Pectins from Cocoa Husk, Coffee Pulp, Soybean Hulls and Grape Pomace. En *Value-Added Products from Agricultural Wastes* (pp. 43-86). https://doi.org/10.1007/978-981-19-8774-8_3
- Dang, T. H., Nguyen, X. H., Chou, C. L., & Chen, B. H. (2021). Preparation of cancrinite-type zeolite from diatomaceous earth as transesterification catalysts for biodiesel production. *Renewable Energy*, 174, 347-358. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.04.068>
- Deng, W., Feng, Y., Fu, J., Guo, H., Guo, Y., Han, B., Jiang, Z., Kong, L., Li, C., Liu, H., Nguyen, P. T. T., Ren, P., Wang, F., Wang, S., Wang, Y., Wang, Y., Wong, S. S., Yan, K., Yan, N., & Zhou, H. (2023). Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into chemicals and fuels. *Green Energy & Environment*, 8(1), 10-114. <https://doi.org/10.1016/J.GEE.2022.07.003>
- Domazetovska, S., Strezov, V., Filkoski, R. V., & Kan, T. (2023). Exploring the Potential of Biomass Pyrolysis for Renewable and Sustainable Energy Production: A Comparative Study of Corn Cob, Vine Rod, and Sunflower. *Sustainability*, 15(18), 13552. <https://doi.org/10.3390/SU151813552>
- Donkor, K. O., Gottumukkala, L. D., Lin, R., & Murphy, J. D. (2022). A perspective on the combination of alkali pre-treatment with bioaugmentation to improve biogas production from lignocellulose biomass. *Bioresource Technology*, 351, 126950. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.126950>
- El-Ramady, H., Brevik, E. C., Bayoumi, Y., Shalaby, T. A., El-Mahrouk, M. E., Taha, N., Elbasiouny, H., Elbehiry, F., Amer, M., Abdalla, N., Prokisch, J., Solberg, S., & Ling, W. (2022). An Overview of Agro-Waste Management in Light of the Water-Energy-Waste Nexus. *Sustainability*, 14(23), 15717. <https://doi.org/10.3390/SU142315717>
- Energy, Climate and Tenure Division (FAO). (2011). *Energy-Smart Food for People and Climate - Issue Paper* (inf. téc.). Food y Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i2454e>
- Essel, V., & Raynie, D. E. (2025). Systematic Isolation and Characterization of Regenerated Hemicellulose and Lignin from Soybean Feedstocks Using Ionic Liquids. *Separations*, 12(2), 37. <https://doi.org/10.3390/SEPARATIONS12020037>
- Gaminian, H., Ahvazi, B., Vidmar, J. J., Ekuere, U., & Regan, S. (2024). Revolutionizing Sustainable Nonwoven Fabrics: The Potential Use of Agricultural Waste and Natural Fibres for Nonwoven Fabric. *Biomass*, 4(2), 363-401. <https://doi.org/10.3390/BIOMASS4020018>
- Giller, K. E., Delaune, T., Vasco Silva, J., Descheemaeker, K., van de Ven, G., Schut, A. G., van Wijk, M., Hammond, J., Hochman, Z., Taulya, G., Chikowo, R., Narayanan, S., Kishore, A., Bresciani, F., Mancini Teixeira, H., Andersson, J. A., & van Ittersum, M. K. (2021). The future of farming: Who will produce our food? *Food Security*. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01184-6>
- Glushkov, D., Nyashina, G., Shvets, A., Pereira, A., & Ramanathan, A. (2021). Current status of the pyrolysis and gasification mechanism of biomass. *Energies*, 14(22), 7541. <https://doi.org/10.3390/en14227541>
- Goodman, B. A. (2020). Utilization of waste straw and husks from rice production: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(3), 143-162. <https://doi.org/10.1016/J.JOBAB.2020.07.001>
- Gryta, A., Skic, K., Adamczuk, A., Skic, A., Marciniak, M., Józefaciuk, G., & Boguta, P. (2024). The Importance of the Targeted Design of Biochar Physicochemical Properties in Microbial Inoculation for Improved Agricultural Productivity—A Review. *Agriculture (Switzerland)*, 14(1), 37. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010037>
- Gupta, S., Gupta, G. K., & Mondal, M. K. (2019). Slow pyrolysis of chemically treated walnut shell for valuable products: Effect of process parameters and in-depth product analysis. *Energy*, 181, 665-676. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.214>
- Gupta, S., & Mondal, P. (2021). Catalytic pyrolysis of pine needles with nickel doped gamma-alumina: Reaction kinetics, mechanism, thermodynamics and products analysis. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124930. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124930>



- Hoang, A. T., Nizetic, S., Ong, H. C., Chong, C. T., Atabani, A. E., & Pham, V. V. (2021). Acid-based lignocellulosic biomass biorefinery for bioenergy production: Advantages, application constraints, and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 296, 113194. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113194>
- Hossain, M. A., Rashid, F., Akhter, M. S., Aziz, M., & Hoque, M. E. (2024). Liquid Fuel Generation from Onion Shell: An Experimental Approach of Pyrolysis Process. *Energies*, 17(9), 2171. <https://doi.org/10.3390/EN17092171>
- Hu, X., & Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*, 39, 109-143. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>
- Hu, X., & Gholizadeh, M. (2020). Progress of the applications of bio-oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110124>
- Huang, M., Ma, Z., Zhou, B., Yang, Y., & Chen, D. (2020). Enhancement of the production of bio-aromatics from renewable lignin by combined approach of torrefaction deoxygenation pretreatment and shape selective catalytic fast pyrolysis using metal modified zeolites. *Bioresource Technology*, 301, 122754. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.122754>
- Igliński, B., Kujawski, W., & Kiełkowska, U. (2023). Pyrolysis of Waste Biomass: Technical and Process Achievements, and Future Development—A Review. *Energies*, 16(4), 1829. <https://doi.org/10.3390/en16041829>
- Karkach, B., Tahiri, M., Haibi, A., Bouya, M., & Kifani-Sahban, F. (2023). Review on Fast Pyrolysis of Biomass for Biofuel Production from Date Palm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(18), 10463. <https://doi.org/10.3390/app131810463>
- Khuenkao, N., & Tippayawong, N. (2020). Production and characterization of bio-oil and biochar from ablative pyrolysis of lignocellulosic biomass residues. *Chemical Engineering Communications*, 207(2), 153-160. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1574769>
- Kumar, A., Saini, K., & Bhaskar, T. (2020). Advances in design strategies for preparation of biochar based catalytic system for production of high value chemicals. *Bioresource Technology*, 299, 122564. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122564>
- Lachos-Perez, D., Martins-Vieira, J. C., Missau, J., Anshu, K., Siakpebru, O. K., Thengane, S. K., Morais, A. R. C., Tanabe, E. H., & Bertuol, D. A. (2023). Review on Biomass Pyrolysis with a Focus on Bio-Oil Upgrading Techniques. *Analytica*, 4(2), 182-205. <https://doi.org/10.3390/analytica4020015>
- Lewandowski, W. M., Januszewicz, K., & Kosakowski, W. (2019). Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type—A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 25-53. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.018>
- Li, S. (2024). Reviewing Air Pollutants Generated during the Pyrolysis of Solid Waste for Biofuel and Biochar Production: Toward Cleaner Production Practices.
- Liu, L., Gerard, G., Peng, Z., & Yu, Z. (2023). The Use of Corn Stover-Derived Nanocellulose as a Stabilizer of Oil-in-Water Emulsion. *Polymers*, 15(3), 757. <https://doi.org/10.3390/POLYM15030757/S1>
- Ma, J., Yue, H., Li, H., Zhang, J., Zhang, Y., Wang, X., Gong, S., & Liu, G. Q. (2021). Selective delignification of poplar wood with a newly isolated white-rot basidiomycete *Peniophora incarnata* T-7 by submerged fermentation to enhance saccharification. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/S13068-021-01986-Y>
- Magalhães, D., Cavailles, J., Vaca-Medina, G., Wu-Tiu-Yen, J., Peydecastaing, J., & Pontalier, P.-Y. (2024). Influence of Thermocompression Conditions on the Properties and Chemical Composition of Bio-Based Materials Derived from Lignocellulosic Biomass. *Materials*, 17(8), 1713. <https://doi.org/10.3390/MA17081713>
- Margellou, A. G., Lazaridis, P. A., Charisteidis, I. D., Nitsos, C. K., Pappa, C. P., Fotopoulos, A. P., Van den Bosch, S., Sels, B. F., & Triantafyllidis, K. S. (2021). Catalytic fast pyrolysis of beech wood lignin isolated by different



- biomass (pre)treatment processes: Organosolv, hydrothermal and enzymatic hydrolysis. *Applied Catalysis A: General*, 623, 118298. <https://doi.org/10.1016/J.APCATA.2021.118298>
- Mazurek, K., Drużyński, S., Kielkowska, U., Wróbel-Kaszanek, A., Igliński, B., & Cichosz, M. (2024). The Application of Pyrolysis Biochar Obtained from Waste Rapeseed Cake to Remove Copper from Industrial Wastewater: An Overview. *Energies*, 17(2), 498. <https://doi.org/10.3390/en17020498>
- Milićević, A., Belošević, S., Žarković, M., Tomanović, I., Crnomarković, N., Stojanović, A., Stupar, G., Deng, L., & Che, D. (2023). Effects of biomass particles size and shape on combustion process in the swirl-stabilized burner reactor: CFD and machine learning approach. *Biomass and Bioenergy*, 174, 106817. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106817>
- Muhammad, I., & Manos, G. (2021). Improving the Conversion of Biomass in Catalytic Pyrolysis via Intensification of Biomass—Catalyst Contact by Co-Pressing. *Catalysts*, 11(7), 805. <https://doi.org/10.3390/CATAL11070805>
- Mujtaba, M., Fernandes Fraceto, L., Fazeli, M., Mukherjee, S., Savassa, S. M., Araujo de Medeiros, G., do Espírito Santo Pereira, A., Mancini, S. D., Lipponen, J., & Vilaplana, F. (2023). Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 402. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815>
- Nie, T., Yang, X., Chen, H., Müller, K., Shaheen, S. M., Rinklebe, J., Song, H., Xu, S., Wu, F., & Wang, H. (2021). Effect of biochar aging and co-existence of diethyl phthalate on the mono-sorption of cadmium and zinc to biochar-treated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124850. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124850>
- Nisar, S., Hanif, M. A., Rashid, U., Hanif, A., Akhtar, M. N., & Ngamcharussrivichai, C. (2021). Trends in Widely Used Catalysts for Fatty Acid Methyl Esters (FAME) Production: A Review. *Catalysts*, 11(9), 1085. <https://doi.org/10.3390/CATAL11091085>
- Ojha, D. K., Viju, D., & Vinu, R. (2021). Fast pyrolysis kinetics of lignocellulosic biomass of varying compositions. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100071. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100071>
- Ong, H. C., Chen, W. H., Farooq, A., Gan, Y. Y., Lee, K. T., & Ashokkumar, V. (2019). Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109266. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109266>
- Osman, A. I., Fang, B., Zhang, Y., Liu, Y., Yu, J., Farghali, M., Rashwan, A. K., Chen, Z., Chen, L., Ihara, I., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2024). Life cycle assessment and techno-economic analysis of sustainable bioenergy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(3), 1115-1154. <https://doi.org/10.1007/S10311-023-01694-Z>
- Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Elgarahy, A. M., Ayyad, A., Mehta, N., Ng, K. H., Abd El-Monaem, E. M., Eltaweil, A. S., Hosny, M., Hamed, S. M., Fawzy, S., Yap, P. S., & Rooney, D. W. (2023). Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1419-1476. <https://doi.org/10.1007/S10311-023-01573-7>
- Panwar, N. L., Pawar, A., & Salvi, B. L. (2019). Comprehensive review on production and utilization of biochar. *SN Applied Sciences*, 1(2), 168. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0172-6>
- Qin, F., Zhang, C., Zeng, G., Huang, D., Tan, X., & Duan, A. (2022). Lignocellulosic biomass carbonization for biochar production and characterization of biochar reactivity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112056. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112056>
- Raza, M., Inayat, A., Ahmed, A., Jamil, F., Ghenai, C., Naqvi, S. R., Shanableh, A., Ayoub, M., Waris, A., & Park, Y.-K. (2021). Progress of the Pyrolyzer Reactors and Advanced Technologies for Biomass Pyrolysis Processing. *Sustainability*, 13(19), 11061. <https://doi.org/10.3390/su131911061>
- Rex, P., Mohammed Ismail, K. R., Meenakshisundaram, N., Barmavatu, P., & Sai Bharadwaj, A. V. S. L. (2023). Agricultural Biomass Waste to Biochar: A Review on Biochar Applications Using Machine Learning Approach and Circular Economy. *ChemEngineering*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/CHEMENGINEERING7030050>



- Rusănescu, C. O., Ciobanu, M., Rusănescu, M., & Dinculoiu, R. L. (2024). Pretreatments Applied to Wheat Straw to Obtain Bioethanol. *Applied Sciences*, 14(4), 1612. <https://doi.org/10.3390/APP14041612>
- Shah, M. A., Khan, N. S., Kumar, V., & Qurashi, A. (2021). Pyrolysis of walnut shell residues in a fixed bed reactor: Effects of process parameters, chemical and functional properties of bio-oil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105564. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105564>
- Sharifzadeh, M., Sadeqzadeh, M., Guo, M., Borhani, T. N., Murthy Konda, N. V. S. N., Garcia, M. C., Wang, L., Hallett, J., & Shah, N. (2019). The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 71, 1-80. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.006>
- Slezak, R., Unyay, H., Szufa, S., & Ledakowicz, S. (2023). An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Reactors Torrefaction vs. Biomass Pyrolizers—Part 2. *Energies*, 16(5), 2212. <https://doi.org/10.3390/EN16052212>
- Srivastava, R. K., Shetti, N. P., Reddy, K. R., & Aminabhavi, T. M. (2020). Biofuels, biodiesel and biohydrogen production using bioprocesses. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(4), 1049-1072. <https://doi.org/10.1007/S10311-020-00999-7>
- Stegen, S., & Kaparaju, P. (2020). Effect of temperature on oil quality obtained through pyrolysis of sugarcane bagasse. *Fuel*, 276, 118112. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118112>
- Suresh, A., Alagusundaram, A., Kumar, P. S., Vo, D. V. N., Christopher, F. C., Balaji, B., Viswanathan, V., & Sankar, S. (2021). Microwave pyrolysis of coal, biomass and plastic waste: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(5), 3609-3629. <https://doi.org/10.1007/S10311-021-01245-4>
- Ummalyma, S. B., Supriya, R. D., Sindhu, R., Binod, P., Nair, R. B., Pandey, A., & Gnansounou, E. (2019). Biological pretreatment of lignocellulosic biomass—Current trends and future perspectives. En *Second and Third Generation of Feedstocks* (pp. 197-212). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815162-4.00007-0>
- Usino, D. O., Supriyanto, Ylitervo, P., Pettersson, A., & Richards, T. (2020). Influence of temperature and time on initial pyrolysis of cellulose and xylan. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 147, 104782. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2020.104782>
- Vasić, K., Podrepšek, G. H., Knez, Ž., & Leitgeb, M. (2020). Biodiesel Production Using Solid Acid Catalysts Based on Metal Oxides. *Catalysts*, 10(2), 237. <https://doi.org/10.3390/CATAL10020237>
- Venkatramanan, V., Shah, S., Prasad, R., & Shah, M. (2021). Life Cycle Assessment of Lignocellulosic Waste Biorefinery. En *Life Cycle Assessment of Lignocellulosic Waste Biorefinery* (pp. 327-347). https://doi.org/10.1007/978-981-15-9696-4_15
- Volpi, M. P. C., Silva, J. C. G., Hornung, A., & Ouadi, M. (2024). Review of the Current State of Pyrolysis and Biochar Utilization in Europe: A Scientific Perspective. *Clean Technologies*, 6(1), 152-175. <https://doi.org/10.3390/CLEANTECHNOL6010010>
- Wang, S., Shi, Z., Jin, Y., Zaini, I. N., Li, Y., Tang, C., Mu, W., Wen, Y., Jiang, J., Jönsson, P. G., & Yang, W. (2022). A machine learning model to predict the pyrolytic kinetics of different types of feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 260, 115613. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.115613>
- Yan, J., Liu, J., Sun, Y., Song, G., Ding, D., Fan, G., Chai, B., Wang, C., & Sun, L. (2021). Investigation on the Preparation of Rice Straw-Derived Cellulose Acetate and Its Spinnability for Electrospinning. *Polymers*, 13(20), 3463. <https://doi.org/10.3390/POLYM13203463>
- Yan, J., & Salman, C. A. (2023). Waste-to-energy (WtE): Current technologies and their future potential. En *Waste Biorefineries* (pp. 25-61). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91761-2.00005-2>



Zadeh, Z. E., Abdulkhani, A., Aboelazayem, O., & Saha, B. (2020). Recent Insights into Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Pretreatment, Characterization, and Products Upgrading. *Processes*, 8(7), 799. <https://doi.org/10.3390/pr8070799>

Zhang, C., Chao, L., Zhang, Z., Zhang, L., Li, Q. H., Fan, H., Zhang, S., Liu, Q., Qiao, Y., Tian, Y., Wang, Y., & Hu, X. (2021). Pyrolysis of cellulose: Evolution of functionalities and structure of bio-char versus temperature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110416>

Zhang, S., Zhu, S., Zhang, H., Liu, X., & Zhang, H. (2019). Evaluation of pyrolysis behavior and products properties of rice husk after combined pretreatment of washing and torrefaction. *Biomass and Bioenergy*, 127, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105293>

Zielińska, M., & Bułkowska, K. (2024). Agricultural Wastes and Their By-Products for the Energy Market. *Energies*, 17(9), 2099. <https://doi.org/10.3390/EN17092099>

7. Contribución de Autores

Autor	Contribución
Maria Eliceth Rodriguez Alcivar	Recopilación de la bibliografía clave para el artículo, seleccionando los estudios y artículos más pertinentes. Su contribución principal fue la redacción, revisión crítica y edición del texto, asegurando que el artículo estuviera bien estructurado, fuera coherente y tuviera una narrativa fluida.
Joamely Dayana Vinces Martinez	Colaboró en la búsqueda y análisis de la literatura, participando en la selección de estudios y artículos clave, así como en la identificación de las fuentes más relevantes para la revisión. También contribuyó a la redacción del manuscrito, organizando las ideas y presentando los hallazgos de la literatura revisada.
Michael Anibal Macias Pro	Revisión crítica del artículo en diversas etapas, proporcionando retroalimentación clave para guiar el trabajo, asegurar su rigor académico y la calidad del resultado final.