

Utilization of rubber tire waste: A focus on the circular economy

Llauce-Chapoñan Raiza Fiorella, Estudiante de Ingeniería Industrial¹, Terán-Chomba Jhossi Lucero, Estudiante de Ingeniería Industrial², Chávez-Romero Zaida Brenilda, Doctora en Fluidodinámica y Procesos de Ingeniería Ambiental³

^{1,3}Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, U20214843@utp.edu.pe, zchavez@utp.edu.pe,

²Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, U20225684@utp.edu.pe

Abstract— *The inadequate disposal of rubber tire waste represents a significant environmental problem, with an annual production of 1.5 billion units of waste. The present Systematic Literature Review study sought to identify new technologies for the utilization of rubber tire waste, focused on the circular economy model. The PICOC methodology was used to formulate the research question and develop a search equation, allowing the collection of various articles in the Scopus and ScienceDirect databases, and then using the PRISMA methodology, inclusion and exclusion criteria were established, obtaining 31 articles. The results obtained indicate that the most promising technologies include pyrolysis, gasification, combustion and their use in the production of construction materials. Pyrolysis stands out for its efficiency in transforming tires into higher value by-products, while gasification and combustion stand out for helping to reduce greenhouse gas emissions, so it is necessary to implement these treatments for proper management of waste from rubber tires. It is concluded that the implementation of technologies focused on the circular economy model is essential to maximize the value of tire waste, given that its implementation is an effective solution that mitigates environmental impacts and optimizes the use of available resources.*

Keywords—Tire, environmental pollution, emerging technologies, sustainability, circular economy.

Aprovechamiento de los residuos de neumáticos de caucho: Un enfoque en la economía circular

Llauce-Chapoñan Raiza Fiorella, Estudiante de Ingeniería Industrial¹, Terán-Chomba Jhossi Lucero, Estudiante de Ingeniería Industrial², Chávez-Romero Zaida Brenilda, Doctora en Fluidodinámica y Procesos de Ingeniería Ambiental³

^{1,3}Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, U20214843@utp.edu.pe, zchavez@utp.edu.pe,

²Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, U20225684@utp.edu.pe

Resumen— *La inadecuada disposición de los residuos de neumáticos de caucho representa un problema ambiental significativo, evidenciándose una producción anual de 1.500 millones de unidades de desechos. El presente estudio de Revisión Sistemática de Literatura buscó identificar las nuevas tecnologías para el aprovechamiento de residuos de neumáticos de caucho, enfocadas en el modelo de economía circular. Para ello se utilizó la metodología PICOC que ayudó a formular la pregunta de investigación y desarrollar una ecuación de búsqueda, permitiendo recolectar diversos artículos en las bases de datos Scopus y ScienceDirect, posteriormente utilizando la metodología PRISMA se establecieron criterios de inclusión y exclusión, obteniéndose 31 artículos. Los resultados obtenidos indican que las tecnologías más prometedoras incluyen la pirólisis, gasificación, combustión y su uso en producción de materiales de construcción. La pirólisis sobresale por su eficiencia en la transformación de neumáticos en subproductos de mayor valor, mientras que la gasificación y combustión, destacan por ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que, se hace necesario implementar estos tratamientos para una adecuada gestión de los residuos procedentes de neumáticos de caucho. Se concluye que la implementación de tecnologías enfocadas en el modelo de economía circular es esencial para maximizar el valor de los residuos de neumáticos, dado que su implementación es una solución efectiva, que mitiga los impactos ambientales y optimiza el aprovechamiento de los recursos disponibles.*

Palabras clave—*neumático, contaminación ambiental, tecnologías emergentes, sostenibilidad, economía circular.*

I. INTRODUCCIÓN

El auge del sector automotriz y la creciente demanda de vehículos a nivel global, han impulsado la expansión en la industria de neumáticos de caucho; de hecho, la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Caucho (ETRMA), indica que alrededor del 65% de la producción total de esta materia se destina a dicho sector [1][2]. Sin embargo, al final de su ciclo de vida; previsto en 6 años [3], los neumáticos se convierten en desechos [4], de los cuales, cerca del 41% no son gestionados eficientemente [5]. La magnitud del problema es alarmante; solo en 2017, la producción de neumáticos a nivel mundial fue de 2.900 millones de unidades [6][7] y se estima que más de 1.500 millones de estos son desechados anualmente [1][8][9]. El desecho indiscriminado de esta materia trae consigo graves riesgos sanitarios y ambientales,

su acumulación en vertederos y espacios abiertos crea nichos ecológicos propicios para plagas [10][11], además, la quema de estos libera al aire, contaminantes como óxidos de nitrógeno, azufre, compuestos orgánicos volátiles y ácidos dañinos para el ser humano, como el sulfúrico y nítrico [4][6].

Existen diversas tecnologías para el uso y recuperación de neumáticos usados, como la incineración, valorización energética, pirólisis, producción de negro de carbón [1]; métodos de procesamiento como materia prima para gasificadores, microrrelleno, concreto y mezclas de construcción [7], en donde, a través de la adición de estamateria se mejora la resistencia a la dureza, impactos, fatiga, vibraciones y el aislamiento térmico [12]. De las tecnologías señaladas, la pirólisis es considerada una de las más eficientes para el tratamiento de estos desechos, debido a que el aceite obtenido de ella se puede refinar hasta ser un combustible similar al diésel; también se considera al negro de carbono y el gas pirolítico, ya que mejoran la producción de nuevos neumáticos [4][13]. Sin embargo, a pesar de que la pirólisis sea favorable desde el punto de vista ambiental, la viabilidad económica de los productos que produce (aceite y carbón) siguen siendo un desafío [14], es por ello que, a pesar de existir ventajas en el uso de las diferentes tecnologías, su implementación industrial aún presenta obstáculos [2].

Los neumáticos desechados son una valiosa fuente de recursos con un gran potencial [5]. Por lo que, diferentes investigaciones resaltan la amplia capacidad de aprovechamiento de estos desechos. Por ejemplo, su uso como materiales innovadores en la ingeniería, gracias a sus excelentes propiedades, su compleja estructura molecular, diferentes aditivos y potencial para sustituir materiales de construcción [15][11], dentro de ello, el caucho-asfalto se presenta como una opción óptima de aprovechamiento, ofreciendo ventajas como menor costo operativo y mayor durabilidad aplicada en construcción [16]. Además, la gestión adecuada presenta ventajas ambientales y económicas, permitiendo un ahorro significativo de energía, recursos y costos, produciendo materiales atractivos para diferentes industrias, convirtiéndose en gran potencial para el desarrollo de negocios sostenibles [17]. Asimismo, un modelo de economía circular para neumáticos maximiza el valor de los

recursos a lo largo de su ciclo de vida, desde el diseño hasta la recuperación, con estrategias como la reducción, reutilización, reparación, reciclaje e innovación tecnológica, promoviendo sostenibilidad ambiental y eficiencia económica [18].

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, el presente estudio pretende realizar una revisión sistemática de literatura para determinar las tecnologías de aprovechamiento de los residuos de neumáticos de caucho, teniendo como enfoque la economía circular.

II. METODOLOGÍA

En la presente investigación se empleó una metodología basada en una “Revisión Sistemática de Literatura”, la cual consistió en la búsqueda, selección y análisis de artículos científicos relevantes para el tema de investigación. Para garantizar la veracidad y la calidad de información, esta búsqueda se llevó a cabo en Scopus, una base de datos de renombre, incluyendo revistas científicas indexadas en español e inglés.

Para guiar la Revisión Sistemática y enfocar los resultados, se planteó la interrogante de investigación: ¿Qué tecnologías para la reutilización de neumáticos se utilizan para

darle valor agregado en el sector automotriz? Para precisar la búsqueda de los artículos, se descompuso la pregunta según la estrategia PICOC (Población, Intervención, Comparación, Resultado, Contexto) en cuatro interrogantes más concisas, tal como se presenta en la Tabla 1.

TABLA I
ESTRUCTURA PICOC

Componente	Pregunta
P	¿Cómo se han gestionado los residuos de neumáticos de caucho?
I	¿Cómo puede el sector automotriz implementar una economía circular en los residuos?
C	¿Qué tecnologías para la reutilización de neumáticos se han aplicado?
O	¿Cuán potenciales son los usos de residuos de neumáticos?
C	¿Qué tan eficientes han resultado las tecnologías de reutilización?

En la búsqueda de información se utilizaron palabras clave para cada componente del PICOC, apoyadas con los operadores booleanos AND, OR, resultando la ecuación de búsqueda que se muestra en la Tabla 2.

TABLA II
ECUACIÓN DE BÚSQUEDA

Base de datos	Ecuación
SCOPUS	(TITLE-ABS-KEY (tires OR "Out of use tires" OR "Waste management" OR disposal OR "Rubber tire" OR reuse OR "waste tire" OR sustainability OR "end-of-life tire" OR "Waste rubber")) AND TITLE-ABS-KEY ("Rubber compounds" OR "Rubber treatment" OR "Rubber thermolysis" OR trituration OR pyrolysis OR retread OR combustion OR "Carbon black recovery" OR

"Rubber recovery") AND TITLE-ABS-KEY ("Recycled tyre rubber" OR "Rubber reuse" OR "Environmental sustainability" OR "Circular economy" OR "Waste management" OR recycling) AND TITLE ABS-KEY ("Crumb Rubber" OR "Sustainable mobility" OR "Construction materials" OR tires) AND TITLE-ABS-KEY ("Waste tires" OR "end of life tire management" OR "Recycling of scrap tire")) AND(LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) (TITLE-ABS-KEY (tires OR "Out of use tires" OR "Waste management" OR disposal OR "Rubber tire" OR reuse OR "waste tire" OR sustainability OR "end-of-life tire" OR "Waste rubber") AND TITLE ABS-KEY (" Rubber compounds" OR "Rubber treatment" OR "Rubber thermolysis" OR trituration OR pyrolysis OR retread OR combustion OR "Carbon black recovery" OR "Rubber recovery") AND TITLE-ABS-KEY ("Recycled tyre rubber" OR "Rubber reuse" OR "Environmental sustainability" OR "Circular economy" OR "Waste management" OR recycling) AND TITLE-ABS-KEY ("Crumb Rubber" OR "Sustainable mobility" OR "Construction materials" OR tires) AND TITLE-ABS- KEY ("Waste tires" OR "end of life tire management" OR "Recycling of scrap tire")) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE , AND , "ar"))

A partir de la ecuación utilizada, se identificaron inicialmente 245 artículos aplicando la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), posteriormente, se aplicó un primer filtro con diversos criterios como el período de publicación, asegurando fuentes primarias actuales, palabras clave, tipo de documento, el libre acceso y otros, lo que redujo la cantidad inicial a 134 artículos, eliminando posteriormente 1 artículo duplicado de la cantidad mencionada anteriormente. Estos fueron revisados y evaluados minuciosamente para determinar su elegibilidad para el desarrollo de la Revisión Sistemática de Literatura, considerando la relación con el tema y el idioma de redacción, obteniendo una cantidad final de 31 artículos, los cuales serán de uso útil para el desarrollo y la presentación de resultados del presente estudio. En la Figura 1 se presenta gráficamente el proceso de desarrollo y selección de los artículos de investigación.

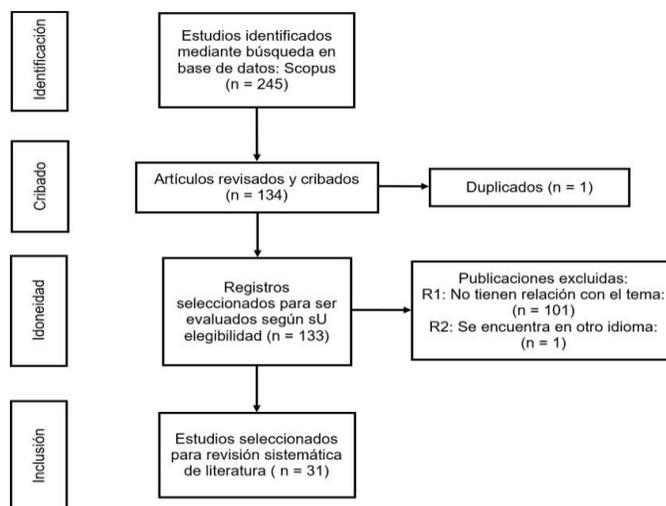


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA en cuatro niveles.

III. RESULTADOS

A. *Diagnóstico actual de la gestión de residuos de neumáticos*

La inadecuada disposición de los residuos de neumáticos se ha convertido en una problemática ambiental de gran magnitud generando preocupación en la sociedad [19]. Cada año, se estima que alrededor de 1.500 millones de neumáticos llegan al final de su vida útil [20], lo que equivale a un peso total de 17 millones de toneladas, cuyo manejo es difícil de llevar [21][22]; en el caso específico de la Unión Europea (UE), la generación anual de este tipo de residuos asciende a aproximadamente 2.7 millones de toneladas [23], sin embargo, a pesar de los esfuerzos por reutilizar esta materia en aplicaciones secundarias o convertirlos en productos de uso cotidiano, la mayoría eventualmente termina siendo desechada [24].

Los problemas ambientales que acarrea la maladquisición de esta materia se agravan debido a dos razones; a causa de su estructura y su composición compleja; esto, debido a la presencia de la gran cantidad de químicos utilizados durante su proceso de fabricación [20][25][26], el cual incluye caucho, negro de carbono, acero y fibras textiles, lo que dificulta la su degradación natural en el exterior [27][28][29]. Esta situación no solo afecta al medio ambiente, sino también representa un riesgo para la salud humana y obstaculiza el desarrollo sostenible a nivel mundial [11][30].

El arrojado de estos desechos en vertederos es considerado como el medio principal de eliminación de estos residuos [31], contribuyendo a la contaminación de aire, suelos y aguas subterráneas, mediante la liberación de elementos tóxicos al exterior, el aumento de efecto invernadero y el ambiente propicio para el desarrollo de plagas y roedores, impactando negativamente en la sociedad [22][25][30][32][33].

Estas circunstancias, se suman a la falta de opciones de desarrollo sostenible y rentable para erradicar estos problemas [25], por lo que, se destaca que cerca de la mitad o solo una fracción de estos residuos no reciben tratamientos óptimos [27][34], lo cual resalta la urgencia de mejorar la gestión de los neumáticos de desecho desarrollando tecnologías de tratamiento y políticas ambientales que promuevan su recuperación, reciclaje y sobre todo maximice su valor potencial como recurso [29][33].

B. *Tecnologías de aprovechamiento y la economía circular*

El aprovechamiento de residuos de neumáticos surge como una alternativa sostenible e innovadora para su gestión [23], debido a su potencial valor calorífico, a su alto contenido volátil y a su bajo nivel de ceniza [21], por lo que, el uso integral de neumáticos desechados como fuente renovable es crucial para mitigar el impacto ambiental derivado de su deficiente eliminación, contribuyendo al avance de una economía circular eficiente y respetuosa con el exterior [35][36][37].

Por ello, la recuperación de energía a raíz de los neumáticos desechados a través de las diferentes tecnologías y gracias a sus características potenciales para procesos de conversión termoquímica y otras, tiene una importancia significativa en cuanto al desarrollo sostenible en el sector industrial [21][29][35], pues esta conversión de los residuos se presenta como una solución óptima en cuanto a los desafíos ambientales que se presentan [24].

La tabla 3 que se mostrará en adelante, evidenciará las diferentes tecnologías de aprovechamiento que se han ido desarrollando a lo largo de los años, a partir de los residuos de neumáticos de caucho.

C. *Eficiencia y potencial uso de las tecnologías de aprovechamiento*

Existen diferentes tecnologías enfocadas en la adecuada gestión de los residuos de neumáticos [38], por lo que muchas de ellas, han despertado gran interés, en cuanto a la investigación de ellas como parte de rutas termoquímicas, para poder tratar estos residuos [42]. A raíz de ello, se identificó que este material de desecho se aplica en usos relacionados a la manufacturación de asfalto, aplicaciones en pavimentos y demás aplicaciones muy relacionadas en su mayoría a la construcción [30][31].

Se puede destacar que la gran complejidad de la composición de las llantas de caucho hace que su recuperación de energía y material sea económicamente rentable [7], por lo que, el caucho de neumáticos puede involucrarse en diferentes procesos de aprovechamiento, contribuyendo al sector industrial mediante la valorización de estos residuos [26][36].

La Tabla 3 evidenciará los resultados obtenidos de las tecnologías de aprovechamiento de los residuos de neumáticos, con relación a las potenciales mejoras que estas brindan a partir del uso óptimo de los subproductos rescatados a partir de ellas.

TABLA III
TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS A PARTIR DE LA ECONOMÍA CIRCULAR Y SUS APLICACIONES

Tecnología	Descripción	Ventajas	Subproductos	Aprovechamiento/Aplicación	Beneficios	Autor
Pirólisis y Copiralización	Descomposición térmica a bajas temperaturas en ausencia total de oxígeno	Tecnologías eficientes y ecológicas con relación a la producción de biocombustibles. Disminución de la emisión de gases de efecto invernadero	Aceite pirolítico, carbón negro	Subproductos como combustibles y materia prima para la elaboración de nuevos subproductos e incorporación de asfalto	Las propiedades físicas y químicas del biocarbón, se optimizan y son más eficientes como adsorbentes y mejora las propiedades mecánicas a través del carbón activado del caucho	[21][23][26][32]
Recauchutado	Alternativa de reutilización directa	Extiende la vida útil del neumático	Renovación de neumáticos y materia prima	Aplicaciones de sus partículas en pavimentación y hormigón	Reduce la liberación de gases tóxicos y productos químicos	[38]
Reciclaje	Reutilización de los materiales	Transformación de neumáticos de desecho en nuevos materiales	Granulado de caucho y materia prima	Materia prima y subproductos relacionados a la ingeniería civil	Reducción de residuos y cuidado del ambiente	[22][38]
Desvulcanización	Proceso químico o físico que permite revertir el proceso de vulcanización	Reducción de residuos, obtención de material valioso para la industria	Materiales compuestos y nuevos neumáticos	Fabricación de nuevos productos de caucho	Proceso responsable con el cuidado del medio ambiente	[11]
Gasificación	Oxidación parcial de la materia orgánica a altas temperaturas	Producción de energía renovable y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero	Producción de Syngas y coproducción de carbones activados	Producción de combustibles líquidos, generación de electricidad y tratamiento de gases	Tecnología innovadora para producir hidrógeno sin emisiones a partir de residuos de neumáticos	[22][24][39]
Trituración	Proceso mecánico para reducir el tamaño del caucho	Mejora de la superficie y seguridad	Caucho granulado	Aplicaciones en campos deportivos sintéticos y pavimentación	Recuperación y reutilización de componentes de neumáticos usados	[8][39]
Combustión	Reacción química exotérmica entre un combustible y oxidante	Reduce el consumo de combustibles fósiles y las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero	Generación de energía térmica, eléctrica y obtención de cenizas	Fabricación de cemento, asfalto y otros materiales de construcción	Capacidad de obtener el máximo rendimiento energético utilizando tecnologías modernas y métodos avanzados	[29][35][41][43]

La Tabla 3 presenta un panorama de diversas tecnologías de valorización para la gestión de neumáticos fuera de uso. Las cuales permiten gestionar los residuos de manera ambientalmente responsable y eficiente, tanto en términos de recuperación de materiales como de factibilidad económica [38][22][19]. Diversas investigaciones avalan la implementación de estas tecnologías como alternativas potenciales para la producción de nuevos recursos o fuentes de materia prima para diversas aplicaciones [23][37][40], destacando la mejora de las propiedades de otros materiales y la obtención de subproductos de nuevo valor [41], asimismo, esta tabla también muestra los aportes significativos de estas tecnologías, aportando valores altos de rendimiento en otros materiales [24], y aumentando la eficiencia energética [22], destacando dentro de todas ellas, la pirólisis como la tecnología más sobresaliente, debido a su tratamiento óptimo y a la recuperación de energía [20][21][44][45].

IV. DISCUSIÓN

La deficiente gestión de los neumáticos desechados sigue aumentando, alcanzando cifras alarmantes de miles de millones de unidades al año [40]. A nivel global, la Unión Europea, Norteamérica y el Sudeste Asiático son responsables aproximadamente del 90% de estos desechos [23], lo que representa un desafío crucial para fabricantes, usuarios y autoridades ambientales, en este contexto, la recuperación y el reciclaje de neumáticos ha ganado valor y mayor relevancia en la última década [29]. Es por ello, que esta situación subraya la urgencia de implementar tratamientos de aprovechamiento efectivos, para abordar los impactos ambientales, que amenazan la salud humana [10], y los impactos económicos derivados de esta problemática, considerando a su vez, que una de las razones principales de esta situación, parte de su alta resistencia a la degradación natural [6][46].

En base a las diferentes tecnologías de aprovechamiento de los residuos de neumáticos resaltaron la pirólisis y la gasificación. Por un lado, la pirólisis es un proceso termoquímico realizado a una temperatura media entre 450 y 600 °C y en un ambiente libre de oxígeno [14][45], siendo que, este parámetro sea considerado el más importante como pretratamiento de este residuo [37], resultando una tecnología muy atractiva con gran potencial para generar nuevos productos [44]. Esta tecnología, tiene grandes ventajas con respecto a las demás, y es que puede usar una abundante gama de biomasa y residuos, para convertirlos en nuevos productos y mejorar la calidad y rendimiento de otros materiales [21][35]. Por otro lado, podemos destacar, la gasificación de los residuos de neumáticos con el uso de CO₂, dado que potencian y mejoran el rendimiento del syngas [24] y en su mayoría se centran en la gasificación con vapor usando partículas pequeñas de neumáticos triturados (3mm-5mm) aprovechando el valor del residuo [29]. Adicional a ello, esta tecnología es de potencial uso, ya que permite el desarrollo de productos químicos valiosos con una diversa gama de aplicaciones en la industria de la construcción, a través de la descomposición de los residuos de neumáticos, y en la producción de electricidad de alta eficiencia [22][37].

Referente a la eficiencia de las tecnologías de aprovechamiento, se evidencian mejores resultados en el proceso de pirólisis, debido que, esta tecnología se posiciona como una tecnología de vanguardia en la economía circular, destacando su efectividad para el tratamiento de neumáticos de desecho, permitiendo un aprovechamiento integral de los residuos sin generar impactos ambientales adversos [28][35][41][45]. Sin embargo, pese a que esta tecnología se presente como una tecnología atractiva de aprovechamiento, en el marco de la economía circular, aún existen limitaciones que perjudican su implementación a escala industrial [38], esto, debido a que el proceso aún no se controla adecuadamente,

generando emisiones de gases nocivos, perjudicando el medio ambiente y restando valor a los residuos [31][34].

V. CONCLUSIÓN

Del análisis desarrollado en el presente estudio, se evidenció que los residuos de neumáticos de caucho tienen un gran potencial de aprovechamiento dentro del modelo de la economía circular. Tal es así que las tecnologías existentes garantizan la reducción del impacto ambiental, así como también, la generación de un valor agregado a partir de los desechos obtenidos. Asimismo, se identificó que la pirólisis es una tecnología prometedora para la gestión de residuos, ofreciendo soluciones sostenibles que minimizan el impacto ambiental, valorizan recursos, impulsan el desarrollo económico y contribuyen a un futuro más sostenible. Sin embargo, esta tecnología enfrenta varias limitaciones significativas, como la alta demanda energética, la necesidad de controlar estrictamente las emisiones tóxicas, la variabilidad en la calidad de los subproductos obtenidos, la gestión de residuos sólidos generados, los desafíos de escalabilidad, y las posibles barreras regulatorias y de aceptación social. Por lo tanto, es de vital importancia promover la innovación e implementación de estrategias integrales que apoyen la gestión sostenible de los residuos de neumáticos de caucho.

REFERENCIAS

- [1] M. Zakerzadeh, B. Shahbodagh, J. Ng, y N. Khalili, «The use of waste tyre rubber in Stone Mastic Asphalt mixtures: A critical review», *Constr. Build. Mater.*, vol. 418, p. 10.1016/j.conbuildmat.2024.135420.
- [2] K. Formela, «Waste tire rubber-based materials: Processing, performance properties and development strategies», *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 5, n.o 4, pp. 234-247, oct. 2022, doi: 10.1016/j.aiepr.2022.06.003.
- [3] K. McCarty, H. R. Mian, G. Chhipi-Shrestha, K. Hewage, y R. Sadiq, «Ecological risk assessment of tire and road wear particles: A preliminary screening for freshwater sources in Canada», *Environ. Pollut.*, vol. 325, p. 10.1016/j.envpol.2023.121354.
- [4] V. Pretell, M. Astorayme, A. Pilco, y W. Ramos, «Producción De Combustibles Líquidos Por Pirólisis Al Vacío De Neumáticos Usados», en *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development" "Leveraging emerging technologies to construct the future"*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2021. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.70.
- [5] F. Valentini y A. Pegoretti, «End-of-life options of tyres. A review», *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 5, n.o 4, pp. 203-213, oct. 2022, doi: 10.1016/j.aiepr.2022.08.006.
- [6] A. A. Bernal-Figueroa, Z. E. Rocha-Gil, J. T. Medina-Moreno, Y. Casas-Martínez, y L. P. Buitrago-Ramírez, «Gestión de llantas usadas en la ciudad de Tunja, Boyacá (Colombia)», *Rev. UDCA Actual. Divulg. Científica*, vol. 24, n.o 1, Art. n.o 1, jun. 2021, doi: 10.31910/rudca.v24.n1.2021.1627.
- [7] G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoj, M. V. Purin, A. V. Zenkov, D. V. Gvozdyakov, y K. B. Larionov, «Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal-water composites», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, n.o 10.1016/j.jece.2020.104741.
- [8] A. Mohajerani et al., «Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 155, p. 104679, abr. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104679.

- [9] J. D. Martínez, «An overview of the end-of-life tires status in some Latin American countries: Proposing pyrolysis for a circular economy», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 144, p. 111032, jul. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111032.
- [10] L. A. Fernandez-Torrez, J. H. Aquino-Rocha, y N. G. Cayo-Chileno, «Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del residuo de caucho de neumático como reemplazo parcial del agregado fino en el hormigón», *Hábitat Sustentable*, pp. 52-65, dic. 2022, doi: 10.22320/07190700.2022.12.02.04.
- [11] A. S. Abdulrahman y F. H. Jabrail, «Treatment of Scrap Tire for Rubber and Carbon Black Recovery», *Recycling*, vol. 7, n.o 3, Art. n.o 3, jun. 2022, doi: 10.3390/recycling7030027.
- [12] D. Singaravel, P. Veerapandian, S. Rajendran, y R. Dhairiyasamy, «Enhancing high-performance concrete sustainability: integration of waste tire rubber for innovation», *Sci. Rep.*, vol. 14, feb. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-55485-9.
- [13] Z. Xiao, A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, y S. Shankar, «Material recovery and recycling of waste tyres-A review», *Clean. Mater.*, vol. 5, p. 100115, sep. 2022, doi:10.1016/j.clema.2022.100115.
- [14] P. Caputo et al., «Physical Chemistry Supports Circular Economy: Toward a Viable Use of Products from the Pyrolysis of a Refuse Derived Fuel and Granulated Scrap Tire Rubber as Bitumen Additives», *Eurasian Chem.-Technol. J.*, vol. 25, pp. 173-181, nov. 2023, doi: 10.18321/ectj1520.
- [15] S. N. Moghaddas Tafreshi, A. Amiri, y A. R. Dawson, «Sustainable use of End-of-Life-Tires (ELTs) in a vibration isolation system», *Constr. Build. Mater.*, vol. 405, p. 10.1016/j.conbuildmat.2023.133316.
- [16] C. G. L. Nunes, P. H. dos S. Pereira, R. A. de Melo, J. K. G. Rodrigues, y L. C. de F. L. Lucena, «Influence of unserviceable tiresâ€™TM rubber on the mechanical performance of hot mix asphalt», *Rev. ALCONPAT*, vol. 12, n.o 3, Art. n.o 3, sep. 2022, doi: 10.21041/ra.v12i3.575.
- [17] Remanufactured waste tire by-product valorization: Quantitative–qualitative sustainability-based assessment -ScienceDirect». Accedido: 17 junio de 2024. [En línea]. Disponible <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024004845?via%3Dihub>
- [18] J. Araujo-Morera, R. Verdejo, M. A. López-Manchado, y M. Hernández Santana, «Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model», *Waste Manag.*, vol. 126, pp. 309-322, may 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.03.025.
- [19] K. Lee y S. Kim, «Performance Improvement Effect of Asphalt Binder Using Pyrolysis Carbon Black», *Materials*, vol. 15, n.o 12, Art. n.o 12, ene. 2022, doi: 10.3390/ma15124158.
- [20] A. Kumar, R. Choudhary, y A. Kumar, «Aging characteristics of asphalt binders modified with waste tire and plastic pyrolytic chars», *PLOS ONE*, vol. 16, n.o 8, p. e0256030, ago. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0256030.
- [21] M. Hoseini, F. Atashi, M. Gholizadeh, y F. Clarens, «Coke Formation and Zeolite Catalyst Effects on Products from Co-pyrolysis of Waste Tyre and Poplar Wood in a Semi-Batch Reactor under N2 Atmosphere», *Energy Technol.*, vol. 12, n.o 4, p. 2300740, 2024, doi: 10.1002/ente.202300740.
- [22] P. Grzywacz, G. Czerski, y W. Gańczarczyk, «Effect of Pyrolysis Atmosphere on the Gasification of Waste Tire Char», *Energies*, vol. 15, n.o 1, Art. n.o 1, ene. 2022, doi: 10.3390/en15010034.
- [23] K. Frikha et al., «Potential Valorization of Waste Tires as Activated Carbon-Based Adsorbent for Organic Contaminants Removal», *Materials*, vol. 15, n.o 3, Art. n.o 3, ene. 2022, doi: 10.3390/ma15031099.
- [24] M. Santasnachok y T. Nakyai, «Exergetic and environmental assessments of hydrogen production via waste tire gasification with co feeding of CO2 recycled», *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 859-867, nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.08.144.
- [25] S. Pyshyev, Y. Lypko, T. Chervinsky, O. Fedevych, M. Kulazyński, y K. Pstrowska, «Application of tyre derived pyrolysis oil as a fuel component», *South Afr. J. Chem. Eng.*, vol. 43, pp. 342-347, ene. 2023, doi: 10.1016/j.sajce.2022.12.003.
- [26] X. Fan et al., «Biochar produced from the co-pyrolysis of sewage sludge and waste tires for cadmium and tetracycline adsorption from water», *Water Sci. Technol.*, vol. 83, n.o 6, pp. 1429-1445, mar. 2021, doi: 10.2166/wst.2021.058.
- [27] H. Fang, Z. Hou, L. Shan, X. Cai, y Z. Xin, «Influence of Pyrolytic Carbon Black Derived from Waste Tires at Varied Temperatures within an Industrial Continuous Rotating Moving Bed System», *Polymers*, vol. 15, n.o 16, Art. n.o 16, ene. 2023, doi: 10.3390/polym15163460.
- [28] Q. Ren et al., «Waste Tire Heat Treatment to Prepare Sulfur Self-Doped Char: Operando Insight into Activation Mechanisms Based on the Char Structures Evolution», *Processes*, vol. 9, n.o 9, Art. n.o 9, sep. 2021, doi: 10.3390/pr9091622.
- [29] L. Carmo-Calado, M. J. Hermoso-Orzáez, R. Mota-Panizio, B. Guilherme-Garcia, y P. Brito, «Co-Combustion of Waste Tires and Plastic-Rubber Wastes with Biomass Technical and Environmental Analysis», *Sustainability*, vol. 12, n.o 3, Art. n.o 3, ene. 2020, doi: 10.3390/su12031036.
- [30] C. Ince, B. M. H. Shehata, S. Derogar, y R. J. Ball, «Towards the development of sustainable concrete incorporating waste tyre rubbers: A long-term study of physical, mechanical & durability properties and environmental impact», *J. Clean. Prod.*, vol. 334, p. 130223, feb. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130223.
- [31] A. Mohan, S. Dutta, S. Balusamy, y V. Madav, «Liquid fuel from waste tires: novel refining, advanced characterization and utilization in engines with ethyl levulinate as an additive», *RSC Adv.*, vol. 11, n.o 17, pp. 9807-9826, mar. 2021, doi: 10.1039/D0RA08803J.
- [32] R. Abdallah, A. Juaidi, M. Assad, T. Salameh, y F. Manzano-Agugliaro, «Energy Recovery from Waste Tires Using Pyrolysis: Palestine as Case of Study», *Energies*, vol. 13, n.o 7, Art. n.o 7, ene. 2020, doi: 10.3390/en13071817.
- [33] A. J. Bowles, Á. Nievas, y G. D. Fowler, «Consecutive recovery of recovered carbon black and limonene from waste tyres by thermal pyrolysis in a rotary kiln», *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 32, p. 100972, may 2023, doi: 10.1016/j.scp.2023.100972.
- [34] Y. Wu et al., «Production of waste tyre pyrolysis oil as the replacement for fossil fuel for diesel engines with constant hydrogen injection via air intake manifold», *Fuel*, vol. 355, p. 129458, ene. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129458.
- [35] Y. Pan, Y. Pan, Z. Wang, S. Han, W. Han, y H. Bian, «Effect of Adding Pyrolysis Carbon Black (CBp) on Soft Friction and Metal Wear during Mixing», *Polymers*, vol. 14, n.o 7, Art. n.o 7, ene. 2022, doi: 10.3390/polym14071319.
- [36] L. J. R. Nunes, L. Guimarães, M. Oliveira, P. Kille, y N. G. C. Ferreira, «Thermochemical Conversion Processes as a Path for Sustainability of the Tire Industry: Carbon Black Recovery Potential in a Circular Economy Approach», *Clean Technol.*, vol. 4, n.o 3, Art. n.o 3, sep. 2022, doi: 10.3390/cleantechnol4030040.
- [37] K. Januszewicz et al., «Waste Rubber Pyrolysis: Product Yields and Limonene Concentration», *Materials*, vol. 13, n.o 19, Art. n.o 19, ene. 2020, doi: 10.3390/ma13194435.
- [38] M. Niesler, J. Stecko, D. Gierad, M. Nowak, y S. Stelmach, «Experimental Production of Iron-Bearing Sinters Using Chars from Waste Car Tires», *Processes*, vol. 11, n.o 1, Art. n.o 1, ene. 2023, doi: 10.3390/pr11010231.
- [39] B. Zhao, C. Wang, y H. Bian, «A “Wastes-Treat-Wastes” Technology: Role and Potential of Spent Fluid Catalytic Cracking Catalysts Assisted Pyrolysis of Discarded Car Tires», *Polymers*, vol. 13, n.o 16, Art. n.o 16, ene. 2021, doi: 10.3390/polym13162732.
- [40] E. Kocatürk, F. Şen, M. Zor, y Z. Candan, «Development and characterization of nanocellulose/ carbonized waste rubber nanocomposites», *BioResources*, vol. 19, n.o 2, pp. 2670-2684, mar. 2024, doi: 10.15376/biores.19.2.2670-2684.
- [41] Á. Muelas et al., «Properties and Combustion Characteristics of Bio Oils from Catalytic Co-Pyrolysis of Grape Seeds, Polystyrene, and Waste Tires», *Energy Fuels*, vol. 34, n.o 11, pp. 14190-14203, nov. 2020, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c02257.
- [42] Y. Hu, X. Yu, J. Ren, Z. Zeng, y Q. Qian, «Waste tire valorization: Advanced technologies, process simulation, system optimization, and

- sustainability», *Sci. Total Environ.*, vol. 942, p. 173561, sep. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173561.
- [43] E. Chaichana, W. Wiwatthanodom, y B. Jongsomjit, «Carbon-Based Catalyst from Pyrolysis of Waste Tire for Catalytic Ethanol Dehydration to Ethylene and Diethyl Ether», *Int. J. Chem. Eng.*, vol. 2019, n.o 1, p. 4102646, 2019, doi: 10.1155/2019/4102646.
- [44] J. Wang et al., «Catalytic degradation of waste rubbers and plastics over zeolites to produce aromatic hydrocarbons», *J. Clean. Prod.*, vol. 309, p. 127469, ago. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127469.
- [45] M. Shehata, M. A. Okeily, y A. S. Hammad, «Valorisation of shredded waste tyres through sequential thermal and catalytic pyrolysis for the production of diesel-like fuel», *Results Eng.*, vol. 21, p. 101718, mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101718.
- [46] A. S. Abdulrahman y F. H. Jabrail, «Treatment of Scrap Tire for Rubber and Carbon Black Recovery», *Recycling*, vol. 7, n.o 3, Art. n.o 3, jun. 2022, doi: 10.3390/recycling7030027.