

DE LA BIOMASA AL BIOCARBÓN: MATERIALES SOSTENIBLES PARA SU INCORPORACIÓN EN ELASTÓMEROS

FROM BIOMASS TO BIOCARBON: SUSTAINABLE MATERIALS FOR INCORPORATION INTO ELASTOMERS

PUENTE MEDELLÍN, Miguel Angel ¹

CASTAÑEDA FACIO, Adalí Oliva ¹

SÁENZ GALINDO, Aidé ¹

DÍAZ ELIZONDO, José Alejandro ²

DÍAZ DE LEÓN GÓMEZ, Ramón Enrique ²

RESUMEN

El uso de materiales sustentables se ha convertido en una prioridad frente a la creciente demanda de alternativas a los derivados del petróleo. En este contexto, el biocarbón, obtenido a partir de la pirólisis de biomasa, surge como un material versátil cuyas propiedades estructurales, térmicas y químicas lo hacen sumamente beneficioso como carga o refuerzo en prácticamente cualquier tipo de matriz polimérica. No obstante, su aplicación cobra un especial realce en los sistemas elastoméricos, donde su capacidad de refuerzo permite optimizar el desempeño de compuestos elásticos de manera sostenible. Este trabajo presenta el potencial del biocarbón como refuerzo alternativo y ecológico, destacando su capacidad para contribuir en el desempeño mecánico y la estabilidad de los elastómeros, al tiempo que reduce la huella ambiental mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos. Además, se aborda el concepto de refuerzo dual, en el cual el biocarbón actúa en sinergia con nanopartículas metálicas para conferir propiedades adicionales como conductividad y resistencia al desgaste. Finalmente, se discuten los retos y perspectivas futuras en torno a su escalamiento industrial, la optimización de sus propiedades y su papel dentro de las tendencias globales hacia una economía circular y materiales sostenibles. En conjunto, el biocarbón se perfila como un componente clave en el desarrollo de la nueva generación de elastómeros más eficientes y comprometidos con el medio ambiente.

Palabras clave: *biocarbón; elastómeros sostenibles; doble refuerzo; nanopartículas metálicas; economía circular.*

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.
2. Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
adalí.castaneda@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-3780-112X>

Fecha de recepción
1 de diciembre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

ABSTRACT

The use of sustainable materials has become a priority in the face of the growing demand for alternatives to petroleum-based products. In this context, biochar, obtained from the pyrolysis of biomass, emerges as a versatile material whose structural, thermal, and chemical properties make it highly beneficial as a filler or reinforcement in virtually any type of polymer matrix. However, its application is particularly noteworthy in elastomeric systems, where its reinforcing capacity allows for the sustainable optimization of elastic composite performance. This work presents the potential of biochar as an alternative and environmentally friendly reinforcement, highlighting its ability to contribute to the mechanical performance and stability of elastomers, while reducing the environmental footprint by utilizing organic waste. Furthermore, the concept of dual reinforcement is addressed, in which biochar acts synergistically with metallic nanoparticles to confer additional properties such as conductivity and wear resistance. Finally, the challenges and future prospects surrounding its industrial scaling, the optimization of its properties, and its role within global trends toward a circular economy and sustainable materials are discussed. Overall, biochar is emerging as a key component in the development of a new generation of more efficient and environmentally friendly elastomers.

Keywords: biochar, sustainable elastomers, dual reinforcement, metallic nanoparticles, circular economy.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los compuestos elastoméricos como el caucho son ampliamente utilizados en la fabricación de neumáticos y otros productos industriales debido a su resistencia a la fricción y la fatiga (Di Bernardo et al., 2025). Existen diversos tipos de caucho, como por ejemplo el natural, neopreno, estireno-butadieno (SBR), nitrilo butadieno y silicona, cada uno con propiedades específicas para distintas aplicaciones (Karunanayake et al., 2025). Sin embargo, la mayoría de estos materiales derivan de hidrocarburos, cuya producción genera entre 1.5 y 3 kg de CO₂ por cada kg de caucho fabricado. En México, los residuos de neumáticos representan una fuente importante de microplásticos urbanos (Secretaría de Medio Ambiente y

Recursos Naturales [SEMARNAT], 2023), y su reciclaje es mínimo. En 2025 solo el 3 % de los residuos plásticos fueron recuperados (SEMARNAT, 2023).

Ante este panorama, resulta necesario explorar alternativas sostenibles como la biomasa y el biocarbón. La biomasa, materia orgánica de origen vegetal o animal, constituye un sistema natural de almacenamiento de energía solar reciente (González Velasco, 2023). El biocarbón, obtenido mediante la pirólisis de biomasa en ausencia de oxígeno, es un material carbonoso altamente poroso y químicamente estable, caracterizado por una elevada área superficial y una estructura rica en sitios funcionales. Estas propiedades le confieren la capacidad de mejorar la calidad de los suelos al incrementar la retención de nutrientes y agua, así como de favorecer la actividad microbiana. Asimismo, debido a su alta estabilidad química, el biocarbón permite la incorporación y retención de carbono de origen biogénico durante largos periodos de tiempo, contribuyendo a la reducción de emisiones asociadas al ciclo del carbono y posicionándose como un material de interés en estrategias de mitigación del cambio climático. Este proceso termoquímico ocurre entre 300 y 700 °C (Escalante Rebolledo et al., 2016).

Investigaciones recientes destacan el potencial del biocarbón como refuerzo en elastómeros, en sustitución de aditivos derivados del petróleo como el negro de humo (Lubura et al., 2022). Dependiendo de sus condiciones de producción y tratamiento, el biocarbón puede mejorar la resistencia, rigidez y durabilidad de cauchos naturales y sintéticos (Bélanger et al., 2023). Con ello, se impulsa la economía circular al reducir la dependencia de recursos fósiles y promover materiales sostenibles.

El objetivo de este trabajo es mostrar que el biocarbón, obtenido a partir de biomasa, puede convertirse en un material alternativo y sostenible para el refuerzo de elastómeros, propiciando el desarrollo de una nueva generación de compuestos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

EL BIOCARBÓN

También conocido como biochar, es un material carbonoso sólido obtenido mediante la pirólisis de biomasa, es decir, la descomposición térmica de materia orgánica en ausencia de oxígeno o con muy poca presencia de él (Escalante Rebolledo et al., 2016). Su estructura porosa, alta estabilidad

química y capacidad de adsorción lo convierten en un recurso valioso para aplicaciones agrícolas, ambientales y energéticas (Teixeira De Lima et al., 2025). El biocarbón se caracteriza por ser una forma recalcitrante de carbono, lo que significa que puede permanecer en el suelo durante décadas o siglos sin degradarse, contribuyendo al secuestro de carbono y a la mitigación del cambio climático. Sus propiedades fisicoquímicas como la porosidad, el área superficial específica, el pH alcalino y la presencia de grupos funcionales dependen del tipo de biomasa utilizada y de las condiciones del proceso de pirólisis (temperatura, tiempo, atmósfera, etcétera) (Lehmann, 2007).

OBTENCIÓN DEL BIOCARBÓN

Todo inicia con la biomasa, la cual se define como materia orgánica de origen vegetal o animal que puede ser utilizada como fuente de energía. Esta incluye residuos agrícolas, forestales, industriales, urbanos y cultivos energéticos (Bustamante García et al., 2017). Desde una perspectiva biofísica, la biomasa representa una forma de energía solar almacenada mediante procesos fotosintéticos, en contraste con los combustibles fósiles que son biomasa transformada durante millones de años (González Velasco, 2023). A través de la fotosíntesis, las plantas convierten dióxido de carbono y agua en compuestos orgánicos ricos en energía, como carbohidratos, lípidos y proteínas, que constituyen la base de la biomasa utilizable. Aunado a su valor energético, la biomasa tiene un papel relevante en la transición hacia una economía circular, al permitir el reciclaje de residuos orgánicos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Si bien la biomasa es una fuente de carbono renovable, esta debe de ser procesada para obtener las propiedades que se requieren para su aplicación. Para ello se hace uso de la técnica más prometedora para dicha transformación, la cual es la "pirólisis". Este es un proceso termoquímico mediante el cual la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno o con cantidades mínimas de este, generando productos sólidos (como carbón o biocarbón), líquidos (bioaceites) y gaseosos (gases combustibles) como se observa en la figura 1. Este proceso ocurre típicamente a temperaturas entre 300 y 700 °C, y su eficiencia depende del tipo de biomasa, la temperatura, el tiempo de residencia y la atmósfera del reactor (Bridgwater, 2012).

El biocarbón representa una alternativa ambientalmente responsable frente a los rellenos de origen fósil, como el negro de humo. Su producción se enmarca en los principios de la economía circular al valorizar residuos orgánicos renovables, contribuyendo en gran medida a las estrategias de mitigación del cambio climático al favorecer la incorporación y estabilización de carbono biogénico dentro de las matrices poliméricas de larga vida útil. Además, su perfil de pureza con menor presencia de metales pesados y compuestos tóxicos lo hace especialmente adecuado para aplicaciones sensibles, reforzando su competitividad en sectores regulados y sostenibles.



Figura 14.
Obtención de
biocarbón vía
pirólisis.

DE LA BIOMASA AL BIOCARBÓN: LA CIENCIA DETRÁS DEL PROCESO

Como se mencionó previamente, mediante la pirólisis de residuos orgánicos, es posible obtener un material carbonoso denominado biocarbón, el cual se produce al calentar la biomasa sin presencia de oxígeno. Durante este proceso la materia prima (biomasa) se descompone en tres fracciones principales: gas, líquido (bioaceite) y un sólido con un alto contenido de carbono el cual es denominado biocarbón. La proporción de cada fracción depende de variables como el tipo de biomasa, la temperatura de pirólisis y la velocidad de calentamiento (Bélangier et al., 2023).

Una de las características más relevantes del biocarbón es su alta superficie específica, que puede alcanzar valores superiores a 300 m²/g, lo que favorece

la interacción con matrices poliméricas o con contaminantes en aplicaciones ambientales (Ahmad et al., 2014).

La superficie se relaciona con la porosidad interna. Esto convierte al biocarbón en una especie de “esponja de carbón” que cuenta con capacidad de adsorción. De igual forma, la estabilidad química del material es alta, debido a la formación de estructuras químicas aromáticas que se condensan durante la pirólisis, lo que le confiere resistencia a la degradación (Spokas, 2010).

Si comparamos a los materiales que se derivan del petróleo, por ejemplo, el negro de humo, el biocarbón representa una alternativa más sostenible. Mientras que el negro de humo ofrece un refuerzo mecánico probado en elastómeros, se produce mediante procesos intensivos en energía y es altamente contaminante (Kang et al., 2016), el biocarbón aprovecha residuos agrícolas y forestales, reduciendo la huella de carbono y aportando beneficios de circularidad en el uso de recursos (Guo et al., 2015). Estudios recientes han demostrado que el biocarbón puede funcionar como relleno alternativo o complementario en mezclas de caucho, mejorando propiedades físicas y mecánicas cuando se combina con nanopartículas inorgánicas, particularmente óxidos metálicos, que actúan como rellenos funcionales dentro de la matriz elastomérica (Sik Ok et al., 2015).

En este sentido, el biocarbón no solo destaca por su origen renovable, sino también por la posibilidad de ajustar sus propiedades mediante la selección de la biomasa de partida y las condiciones de pirólisis, lo que abre un amplio espectro de aplicaciones en la ciencia de materiales.

BIOCARBÓN COMO REFUERZO DE ELASTÓMEROS

Los elastómeros son polímeros con alta elasticidad, capaces de deformarse bajo esfuerzo y recuperar su forma original, lo que los convierte en materiales esenciales en aplicaciones cotidianas como llantas, guantes o empaques industriales (Kwietniewski & Miedzińska, 2019). Tradicionalmente, el negro de humo (carbon black), derivado de combustibles fósiles, ha sido el refuerzo principal para mejorar sus propiedades mecánicas, incrementando resistencia, dureza y durabilidad (Kyei-Manu et al., 2025). Sin embargo, la producción de negro de humo implica elevados costos energéticos y emisiones



contaminantes. En este contexto, el biocarbón surge como una alternativa sostenible, al ser obtenido mediante pirólisis de biomasa residual y presentar características similares en cuanto a estructura carbonosa, porosidad y estabilidad, lo que le permite actuar como sustituto parcial o total del negro de humo (Karunanayake et al., 2025).

Estudios recientes han explorado el concepto de refuerzo dual, combinando biocarbón con nanopartículas metálicas como óxidos de zinc o plata, con el objetivo de potenciar propiedades adicionales como conductividad eléctrica, resistencia al desgaste y funcionalidades antimicrobianas (Krainoi et al., 2023). Este enfoque busca generar un efecto sinérgico donde cada fase reforzante aporte características complementarias que mejoren el desempeño global del material compuesto.

En términos generales, la incorporación de partículas en matrices poliméricas permite incrementar la rigidez, estabilidad térmica y propiedades funcionales debido a su alta área superficial y capacidad de interacción interfacial (Sinha Ray & Okamoto, 2003). Sin embargo, uno de los principales retos es evitar la aglomeración de las partículas y asegurar una adecuada dispersión dentro de la matriz, ya que esto influye directamente en la transferencia de esfuerzos y en la eficiencia del refuerzo.

En este contexto, el biocarbón actúa como una plataforma estructural adecuada debido a su porosidad, área superficial y presencia de grupos funcionales superficiales, los cuales facilitan el anclaje o deposición de nanopartículas metálicas. Esta configuración jerárquica favorece una mejor distribución del refuerzo y promueve interacciones adicionales con la matriz elastomérica, mejorando propiedades mecánicas y funcionales (Ahmad et al., 2014). La figura 2 muestra de manera esquemática este mecanismo dual de la interacción interfacial generada en el sistema compuesto.

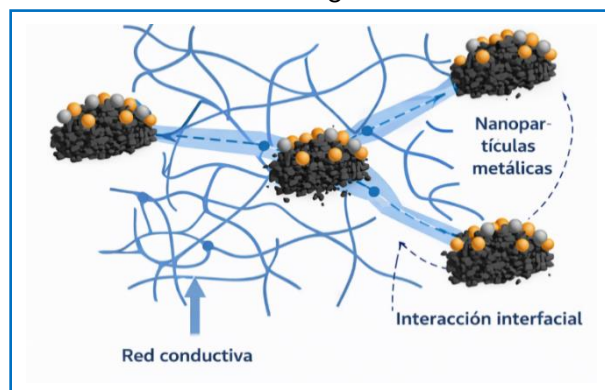


Figura 15. Elastómero reforzado con biocarbón y nanopartículas metálicas.

Particularmente en elastómeros, el sistema biocarbón–nanopartículas representa una alternativa sostenible frente a refuerzos tradicionales como el negro de humo, permitiendo no solo mejorar el módulo elástico y la resistencia al desgaste, sino también favorecer propiedades avanzadas como conductividad o actividad antimicrobiana. Esta sinergia posiciona al biocarbón como un refuerzo versátil y funcional en el desarrollo de elastómeros avanzados con aplicaciones en sectores automotriz, biomédico y de electrónica flexible (Krainoi et al., 2023).

APLICACIONES Y BENEFICIOS PRÁCTICOS

El uso de biocarbón como refuerzo en elastómeros permite explorar múltiples aplicaciones prácticas en distintos sectores. En la industria automotriz, diversos estudios han reportado mejoras cuantificables en propiedades mecánicas cuando el biocarbón se incorpora como sustituto parcial del negro de humo. Por ejemplo, se ha observado un incremento en el módulo elástico entre 15 y 35 %, así como aumentos en la resistencia a la tracción de hasta 20 %, dependiendo de la temperatura de pirólisis y el contenido de carga (Greenough et al., 2021). Asimismo, algunos trabajos reportan mejoras en estabilidad térmica, evidenciadas por aumentos en la temperatura de degradación superiores a 10–25 °C en comparación con elastómeros sin refuerzo.

Estos resultados indican que el desempeño mejorado se refleja principalmente en mayor rigidez, mejor transferencia de esfuerzos matriz–refuerzo y estabilidad térmica comparable a la obtenida con negro de humo convencional, especialmente cuando el biocarbón es producido a temperaturas superiores a 500 °C, donde se favorece una estructura más aromática y estable. De esta manera, el biocarbón no solo representa una alternativa sostenible, sino también técnicamente viable para aplicaciones como llantas, sellos y componentes elastoméricos sometidos a esfuerzos mecánicos cíclicos (Das et al., 2021).

En el ámbito médico, diversos estudios han reportado que la incorporación de biocarbón y nanopartículas metálicas en matrices elastoméricas puede incrementar la resistencia al desgaste y la estabilidad mecánica, prolongando la vida útil del material. Por ejemplo, compuestos elastoméricos reforzados

con biocarbón han mostrado reducciones en la tasa de desgaste superiores al 25 % y mejoras en resistencia a la tracción entre 15 y 30 %, dependiendo del porcentaje de carga y temperatura de pirólisis (Das et al., 2021; Di Bernardo et al., 2025). Cuando estos sistemas se combinan con nanopartículas metálicas como ZnO o Ag, además de mejorar propiedades mecánicas, se han observado efectos antimicrobianos significativos, particularmente frente a *E. coli* y *S. aureus*, lo que amplía su potencial en dispositivos biomédicos (Raghupathi et al., 2011).

En la industria de empaques, elastómeros y biocompuestos con biocarbón han propiciado mejoras en estabilidad térmica y reducción en permeabilidad a gases, asociadas a la formación de trayectorias tortuosas en la matriz polimérica. Por tanto, se han reportado incrementos en temperatura de degradación térmica de 10–30 °C y disminuciones en permeabilidad al oxígeno de hasta 20 % en sistemas poliméricos con biocarbón (Zhang et al., 2020), lo que puede traducirse en una mayor vida útil del producto y mejor conservación de alimentos.

En términos económicos, estudios de evaluación comparativa indican que la sustitución parcial del negro de humo por biocarbón puede reducir costos de materia prima entre 10 y 20 %, dependiendo de la fuente de biomasa y la escala de producción, además de fomentar cadenas de valor asociadas a la economía circular.

Entre los residuos agroindustriales comúnmente empleados para la obtención de biocarbón se encuentran las cáscaras de arroz, el bagazo de caña de azúcar, los residuos de maíz, el aserrín y los restos de poda forestal, los cuales han demostrado ser técnicamente viables para producir materiales carbonosos con propiedades adecuadas para aplicaciones en compuestos elastoméricos (Lehmann & Joseph, 2024).

RETOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesar de los avances recientes en el uso del biocarbón como refuerzo en elastómeros, aún existen diversos desafíos técnicos que limitan su implementación a gran escala. Uno de los principales retos radica en el escalamiento industrial del proceso de pirólisis, el cual requiere un control preciso de temperatura, atmósfera y tiempo de residencia para asegurar la

calidad y homogeneidad del biocarbón obtenido (Lehmann & Joseph, 2024). No obstante, estos desafíos constituyen un punto de partida para la generación de nuevas líneas de investigación orientadas a optimizar el conocimiento y las aplicaciones en este campo. En la actualidad, se exploran rutas para producir biocarbón funcionalizado mediante tratamientos químicos o físicos que optimicen su compatibilidad con matrices poliméricas, así como nuevas mezclas híbridas que integren nanopartículas metálicas, óxidos o grafeno para lograr refuerzos más eficientes y multifuncionales (Aboughaly et al., 2023). Estas innovaciones apuntan hacia materiales más ligeros, duraderos y con propiedades ajustables según la aplicación, desde la automoción hasta la biomedicina.

En un panorama global, la transición hacia materiales sostenibles se está consolidando como una prioridad industrial y ambiental. Organismos internacionales y grandes corporaciones impulsan políticas para sustituir progresivamente derivados del petróleo por alternativas renovables y de bajo impacto ambiental, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU y la economía circular. En este contexto, el biocarbón surge no solo como un material versátil, sino como un vector de innovación “verde” capaz de redefinir el futuro de los elastómeros y de la ingeniería de materiales.

CONCLUSIONES

El biocarbón, producido a partir de biomasa mediante procesos de pirólisis, constituye una alternativa viable y sostenible para el refuerzo de elastómeros. Su incorporación en matrices poliméricas permite contribuir a la mejora de propiedades mecánicas y térmicas, al tiempo que promueve el aprovechamiento de residuos orgánicos y reduce la dependencia de materiales derivados del petróleo. Esta evidencia respalda el potencial del biocarbón como componente clave en el desarrollo de una nueva generación de compuestos elastoméricos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente, en concordancia con los principios de sostenibilidad y economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila y al Posgrado de Ciencia y Tecnología de Materiales por el acceso a la información para desarrollar este trabajo; asimismo, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Gobierno de México por el apoyo con la beca número 2170506.

Se agradece el apoyo brindado a través del Proyecto Interno CIQA-6793: "Hacia una valorización superior de biomasa mediante pirólisis para la obtención de compuestos poliméricos semiconductores sustentables con un enfoque en aplicaciones emergentes".

REFERENCIAS

- Aboughaly, M., Babaei-Ghazvini, A., Dhar, P., Patel, R., & Acharya, B. (2023). Enhancing the potential of polymer composites using biochar as a filler: A review. *Polymers*, 15(19), 3981. <https://doi.org/10.3390/polym15193981>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Bélanger, N., Prasher, S., & Dumont, M. J. (2023). Tailoring biochar production for use as a reinforcing bio-based filler in rubber composites: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 62(1), 54–75. <https://doi.org/10.1080/25740881.2022.2089584>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2017). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 5–24. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i38.8>
- Das, C., Tamrakar, S., Kiziltas, A., & Xie, X. (2021). Incorporation of biochar to improve mechanical, thermal and electrical properties of polymer composites. *Polymers*, 13(16), 2663. <https://doi.org/10.3390/polym13162663>



- Di Bernardo, C., Messori, M., & Noè, C. (2025). Rethinking biochar reinforcement role in elastomer composites for greener tire manufacture. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(37), 15421–15434.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c05447>
- Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367–382.
<https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/155>
- González Velasco, J. (2023). Energía a partir de la biomasa: Un análisis técnico y contextual. *Encuentros Multidisciplinares*, 74, 1–66. <http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-74/jaime-velasco.pdf>
- Greenough, S., Dumont, M. J., & Prasher, S. (2021). The physicochemical properties of biochar and its applicability as a filler in rubber composites: A review. *Materials Today Communications*, 29, 102912.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102912>
- Guo, M., Uchimiya, S. M., & He, Z. (2015). Agricultural and environmental applications of biochar: Advances and barriers. In M. Guo, Z. He, & S. M. Uchimiya (Eds.), *Agricultural and environmental applications of biochar: Advances and barriers* (pp. 495–504). Soil Science Society of America.
<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub63.2014.0054>
- Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica
- Kang, M. J., Heo, Y. J., Jin, F. L., & Park, S. J. (2016). A review: Role of interfacial adhesion between carbon blacks and elastomeric materials. *Carbon Letters*, 18(1), 1–10.
<https://doi.org/10.5714/CL.2016.18.001>
- Karunanayake, L., Etampawala, T., de Silva, D. J., Bandara, J., Rajapaksha, A. U., & Vithanage, M. (2025). Role and potential of biochar as a sustainable alternative reinforcing filler to carbon black in rubber composites. *Biochar*, 7, 60.
<https://doi.org/10.1007/s42773-025-00429-3>
- Krainoi, A., Prasert, W., Kesakomol, P., Thongdee, P., Nitchaphanit, S., Sungsirin, N., Boonsiri, T., Watanaveeradej, V., Ounjai, K., & Nakaramontri, Y. (2023). Effect of modified zinc oxide nanoparticles on enhancement of mechanical, thermal and antibacterial properties of disinfectant natural rubber latex foams. *Materials Today Communications*, 35, 105601. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105601>
- Kwietniewski, M., & Miedzińska, D. (2019). Review of elastomeric materials for application to composites reinforced by auxetics fabrics. *Procedia Structural Integrity*, 17, 154–161.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.021>

- Kyei-Manu, W. A., Tunnicliffe, L. B., Herd, C. R., Akutagawa, K., Stoček, R., & Busfield, J. J. C. (2025). Effect of carbon black properties on cut and chip wear of natural rubber. *Wear*, 564–565, 205673. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205673>
- Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. *Nature*, 447(7141), 143–144. <https://doi.org/10.1038/447143a>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2024). Biochar for environmental management: An introduction. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (3rd ed., pp. 1–14). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003297673-1>
- Lubura, J., Kojić, P., Ikonić, B., Pavličević, J., Govedarica, D., & Bera, O. (2022). Influence of biochar and carbon black on natural rubber mixture properties. *Polymer International*, 71(11), 1347–1353. <https://doi.org/10.1002/pi.6439>
- Raghupathi, K. R., Koodali, R. T., & Manna, A. C. (2011). Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles. *Langmuir*, 27(7), 4020–4028. <https://doi.org/10.1021/la104825u>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica. Gobierno de México. https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.pdf
- Sik Ok, Y., Uchimiya, S. M., Chang, S. X., & Bolan, N. (2015). *Biochar: Production, characterization, and applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18920>
- Sinha Ray, S., & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science*, 28(11), 1539–1641. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002>
- Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289–303. <https://doi.org/10.4155/CMT.10.32>
- Teixeira de Lima, N., de Souza Carneiro Neto, T. F., Souza Pereira Matos, M., Freire de Oliveira, F., de Sousa Araújo, C. A., & Saraiva Tavares Filho, G. (2025). Biocarvão: Características químico-físicas e uso na agricultura. Uma revisão. *Research, Society and Development*, 14(6), e7114648949. <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i6.48949>
- Zhang, Q., Zhang, D., Xu, H., Lu, W., Ren, X., Cai, H., Lei, H., Huo, E., Zhao, Y., Qian, M., Lin, X., Villota, E. M., & Mateo, W. (2020). Biochar filled high-density polyethylene composites with excellent properties: Towards maximizing the utilization of agricultural wastes. *Industrial Crops and Products*, 146, 112185. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112185>