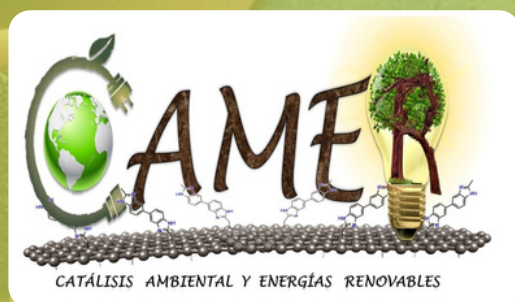


Materiales carbonosos a partir de caucho de llantas residuales: una estrategia de valorización



Grupo de Investigación



Autores

M. Ortiz-Quiceno, Alba N. Ardila A.*, Erasmo Arriola Villaseñor

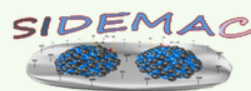
*Email: anardila@elpoli.edu.co



Semillero de Investigación en
Sensores Poliméricos (SISEPOL)



Semillero de Investigación en
Valorización de Residuos (SIVARE)



Semillero de Investigación en Desarrollo
de Materiales Catalíticos (SIDEMAC)

CONTENIDO

El desafío de los residuos de caucho provenientes de llantas en desuso

Problemática ambiental

Composición de la banda de rodadura

Importancia del reciclaje y transformación de estos residuos en materiales útiles

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de llantas

El desafío de los residuos de caucho provenientes de llantas en desuso

La acumulación de residuos sólidos provenientes de caucho, especialmente neumáticos usados, representa un problema ambiental crítico a nivel mundial. La superproducción estimada de 3.100 millones de unidades para 2030 agrava esta situación. Se estima que se generan casi mil millones de neumáticos usados anualmente, representando más del 2% de los residuos sólidos totales. Esta cifra aumenta constantemente, generando un billón de neumáticos al final de su vida útil (NFVU) cada año.

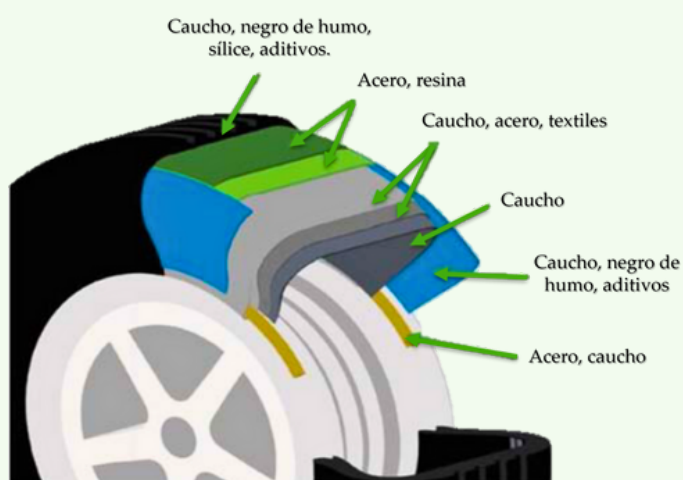


Figura 1 Composición de neumáticos al final de su vida útil.

Tabla 1

Generación aproximada de neumáticos al final de su vida útil en algunos países de América Latina en 2018.

País	Población aproximada (millones de personas)	Generación (toneladas/año)
Brasil	210	588.000
Chile	18	180.000
Argentina	44	150.000
Colombia	45.5	120.000
México	130	468
Uruguay	3.5	15

Fuente: Adaptado de An overview of the end-of-life tires status in some Latin American countries: Proposing pyrolysis for a circular economy, por J. Martínez, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021.

A pesar de los esfuerzos por fomentar el reciclaje y la reutilización, la gestión inadecuada persiste, especialmente en países en vías de desarrollo y economías emergentes. Cerca del 50% de los neumáticos desechados terminan en vertederos sin tratamiento.

Problemática ambiental

La acumulación de residuos de caucho, principalmente neumáticos usados, representa un desafío ambiental significativo debido a su volumen, baja biodegradabilidad y persistencia. Esto conlleva una serie de impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana.

Contaminación de suelos y aguas subterráneas

La lixiviación libera metales pesados (zinc, cadmio, cobre) y compuestos orgánicos (benzotiazoles, ftalatos) presentes en los rellenos, agentes de vulcanización y aditivos, contaminando el suelo y el agua.

Contaminación de suelos y aguas subterráneas

La combustión de los neumáticos libera partículas de hollín, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles, contribuyendo a la contaminación atmosférica.

Contaminación acuática

Las partículas de caucho y los lixiviados liberan metales pesados y compuestos orgánicos, afectando a organismos acuáticos y provocando toxicidad, teratogenicidad y mutagenicidad.



Figura 2 Problemáticas de la generación de neumáticos de desecho

Problemática ambiental

Contaminación terrestre

El caucho molido y los aditivos presentes en la banda de rodadura pueden alterar las propiedades del suelo e inhibir el crecimiento de plantas.

Riesgos para la salud humana

Los neumáticos al aire libre acumulan criaderos de mosquitos y otros insectos, lo que aumenta el riesgo de enfermedades.

Efectos en la salud humana

Estudios in vitro muestran daño en el ADN y efectos inflamatorios en células pulmonares humanas.

Estudios en animales muestran toxicidad pulmonar, estrés oxidativo cardíaco y respuestas inflamatorias.

Las partículas más pequeñas pueden penetrar profundamente en los pulmones y causar efectos citotóxicos.

Ingesta a través de la cadena alimentaria

Aunque existe preocupación, no hay suficiente información disponible sobre el riesgo de ingesta de partículas de neumáticos a través de los alimentos.

Composición de la banda de rodadura del neumático

La composición del caucho de llantas es compleja, resultado de una mezcla precisa y controlada de diversos materiales. Cada componente desempeña un papel específico, asegurando el rendimiento, la durabilidad y la seguridad del neumático.

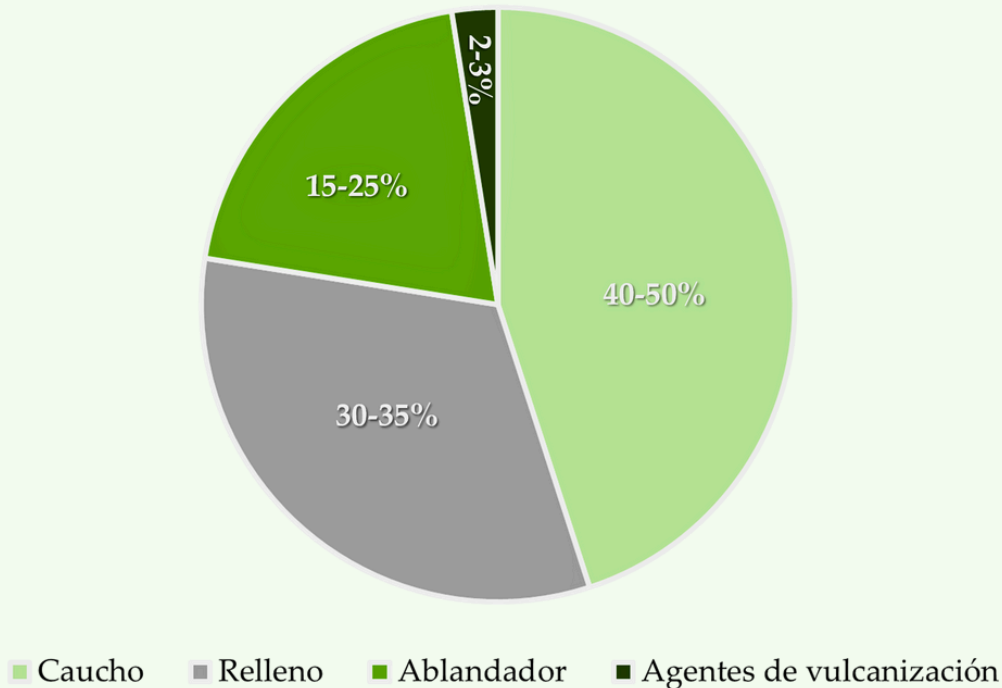


Figura 3 Composición porcentual en masa de la banda de rodadura del neumático

Caucho (40-50% en masa): caucho natural (poliisopreno [C_5H_8]_n) y caucho sintético, por ejemplo, caucho estireno-butadieno o caucho butadieno.

Relleno (30-35% en masa): generalmente hollín/negro de carbono, sílice (SiO_2) y tiza ($CaCO_3$).

Ablandador (15-25% en masa): consiste en aceite y resina.

Agentes de vulcanización (2-3% en masa): azufre (S) y óxido de zinc (ZnO).

Aditivos (5-10% en masa): conservantes (cianoalcanos halogenados), antioxidantes (aminas, fenoles), desecantes (arcillas, óxidos), plastificantes (ésteres aromáticos y alifáticos) y agentes de procesado (aceites minerales, peptizantes).

Importancia del reciclaje y transformación de estos residuos en materiales útiles

La reutilización de neumáticos posconsumo reconvertidos, en contraposición al uso de materias primas vírgenes, ofrece beneficios tanto ambientales como económicos. Específicamente, el costo de producción de bienes manufacturados, parcial o totalmente, con material reciclado es generalmente inferior al de aquellos que emplean materias primas sin procesar. Esta ventaja económica, sumada a la reducción del impacto ambiental, consolida su reutilización como una práctica sostenible y ventajosa.

Materiales carbonosos: una alternativa de valorización

En este contexto, el reciclaje de caucho de llantas en desuso ha emergido como una alternativa prometedora para la obtención de materiales carbonosos de alto valor agregado. Los materiales carbonosos han sido objeto de una intensa investigación debido a sus diversas aplicaciones en campos como la catálisis, la adsorción y el almacenamiento de energía. Tradicionalmente, estos materiales se han obtenido a partir de fuentes naturales como el carbón mineral o mediante procesos de carbonización de materiales orgánicos, entre otros. Sin embargo, en los últimos años, se han explorado nuevas rutas de síntesis con el objetivo de obtener materiales carbonosos con propiedades más controladas y adaptadas a aplicaciones específicas.

Definición y propiedades básicas:

Los materiales carbonosos son compuestos sólidos, predominantemente a base de carbono, de estructura amorfa o cristalina, lo cual les confiere una notable estabilidad térmica y química, así como una amplia gama de propiedades texturales y morfológicas.

Entre estas, destaca su capacidad de adsorción, directamente relacionada con su área superficial. La distribución de poros, clasificados en microporos, mesoporos y macroporos, juega un papel crucial en la selectividad del carbón activado, permitiendo la adsorción de moléculas de diferentes tamaños.

Importancia del reciclaje y transformación de estos residuos en materiales útiles

Además, la química de la superficie, caracterizada por la presencia de grupos funcionales, influye significativamente en las interacciones con los adsorbatos, facilitando diversos mecanismos de adsorción.

Importancia en aplicaciones como adsorbentes y soportes catalíticos

Adsorción de contaminantes: El carbón activado derivado de caucho de neumáticos, gracias a su elevada porosidad y gran área superficial, exhibe una excepcional capacidad para adsorber una amplia gama de contaminantes, incluyendo metales pesados y compuestos orgánicos de alto peso molecular. Estudios como los de N. Mutil y otros han demostrado que posee una estructura de mesoporos bien desarrollada, lo cual lo hace particularmente adecuado para la adsorción de moléculas grandes y complejas.

Soportes catalíticos: Los carbones derivados de llantas, especialmente aquellos sometidos a un tratamiento ácido previo, presentan propiedades texturales y químicas que los hacen excelentes soportes para catalizadores metálicos utilizados en procesos químicos y ambientales. Estas características son fundamentales para una buena dispersión del catalizador y, en consecuencia, para una mayor actividad catalítica, lo que los posiciona como una alternativa prometedora en diversas aplicaciones catalíticas.

Procesos de conversión del caucho:

Pirólisis térmica: proceso, tipos y ventajas

El proceso de pirólisis consiste en la degradación térmica: neumáticos enteros o triturados se calientan en un recipiente reactor que contiene una atmósfera libre de oxígeno, sufriendo craqueo térmico a temperaturas de alrededor de 500-600 °C, descomponiéndose en una parte sólida (carbón) y una parte volátil, parcialmente condensable.

La fracción sólida, se compone principalmente de carbono y cenizas, por lo cual, dependiendo de su aplicación, esta suele someterse a tratamientos de remediación de impurezas o activación (química o física con vapor).

Importancia del reciclaje y transformación de estos residuos en materiales útiles

Adicionalmente, su rendimiento depende de factores como la temperatura, el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y el tipo de reactor utilizado, así como de la variabilidad en la composición de los neumáticos usados como materia prima.

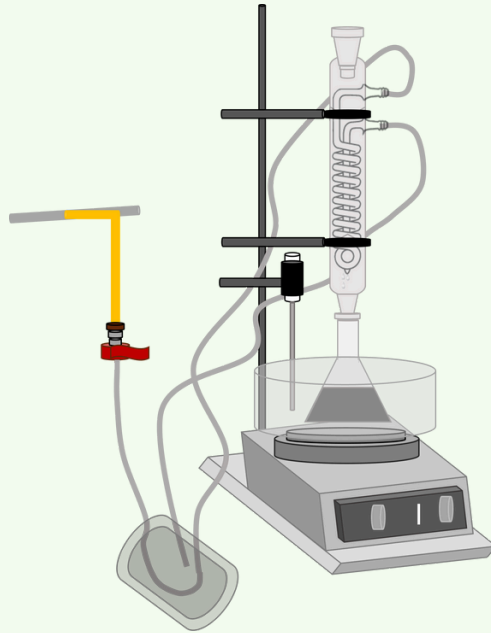


Figura 4 Montaje experimental para el proceso de remediación de impurezas

Tipos de pirólisis

Pirólisis lenta:

La pirólisis lenta se caracteriza por bajas velocidades de calentamiento ($0.1-1$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) y temperaturas moderadas ($400-500$ $^{\circ}\text{C}$), con tiempos de residencia prolongados. Estas condiciones favorecen la producción de materiales carbonosos de alta calidad, maximizando el rendimiento de carbón sólido y permitiendo un control preciso de la porosidad.

Pirólisis rápida:

La pirólisis rápida se caracteriza por altas velocidades de calentamiento ($10-200$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) y temperaturas elevadas ($500-800$ $^{\circ}\text{C}$), con tiempos de residencia muy cortos. Estas condiciones extremas favorecen la formación de productos líquidos y gaseosos, en detrimento del carbón sólido.

Importancia del reciclaje y transformación de estos residuos en materiales útiles

Pirólisis catalítica:

La pirólisis catalítica es una variante avanzada de la pirólisis que utiliza catalizadores para acelerar y optimizar la descomposición térmica de materiales orgánicos, como los neumáticos fuera de uso. A diferencia de la pirólisis convencional, que se basa únicamente en el calor para romper los enlaces químicos.

Remediación de impurezas

El tratamiento ácido es una etapa crucial en la preparación de materiales carbonosos a partir de llantas. Este proceso se realiza mediante el lavado con ácidos fuertes, siendo los más comunes el ácido clorhídrico (HCl), el ácido nítrico (HNO₃) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Mecanismos y efectos:

Eliminación de impurezas inorgánicas:

Los ácidos fuertes disuelven óxidos metálicos, sales y otros compuestos inorgánicos presentes en el material carbonoso. Esto mejora la pureza del material y aumenta su área superficial.

Modificación de la superficie:

La oxidación ácida implica la reacción del ácido con los átomos de carbono de la superficie, introduciendo grupos funcionales ácidos como carboxilos (-COOH), fenoles (-OH) y lactonas. Estos grupos polares aumentan la afinidad del material hacia adsorbatos polares e iónicos, facilitando la adsorción a través de interacciones electrostáticas y puentes de hidrógeno.

Aumento de la porosidad:

La disolución de componentes minerales y la creación de nuevos poros incrementan la porosidad del material, aumentando el área superficial disponible para la adsorción.

Importancia del reciclaje y transformación de estos residuos en materiales útiles

Activación:

La activación de materiales carbonosos, busca optimizar su porosidad y área superficial, cualidades determinantes para sus aplicaciones. Esta activación se logra mediante dos estrategias principales: la activación química y la activación física, cada una con mecanismos y efectos distintivos.

Activación química:

Este proceso emplea agentes químicos para inducir la formación de poros y modificar la superficie del material carbonoso. La reacción de estos agentes con el carbono, a elevadas temperaturas, genera una estructura porosa altamente desarrollada.

Mecanismos y efectos:

Generación de porosidad:

Agentes como el hidróxido de potasio (KOH) reaccionan con el carbono, creando microporos y mesoporos, lo que resulta en áreas superficiales excepcionalmente elevadas. Otros agentes, como el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el cloruro de zinc ($ZnCl_2$), actúan como deshidratantes, generando mesoporos y macroporos.

Modificación superficial

La activación química introduce grupos funcionales en la superficie del carbono, alterando sus propiedades de adsorción. KOH tiende a generar grupos básicos, mientras que H_3PO_4 y $ZnCl_2$ inducen grupos ácidos.

Activación física:

La activación física utiliza gases como el vapor de agua o el dióxido de carbono (CO_2) a altas temperaturas para inducir la porosidad del material. La reacción de estos gases con el carbono genera una estructura porosa controlada.

Importancia del reciclaje y transformación de estos residuos en materiales útiles

Mecanismos y efectos:

Generación de porosidad:

El vapor de agua y el CO₂ reaccionan con el carbono, creando microporos y mesoporos mediante la eliminación de átomos de carbono.

Control de porosidad:

Ajustando la temperatura y el tiempo de reacción, se modula la distribución del tamaño de los poros, adaptando el material a aplicaciones específicas.

Sostenibilidad:

Al no emplear agentes químicos corrosivos, este proceso es más limpio y respetuoso con el medio ambiente.

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de llantas

Materiales carbonosos derivados de neumáticos de desecho para aplicaciones ambientales y catalíticas:

Durante el periodo 2019-2023, diversos estudios exploraron diferentes estrategias de obtención y activación de estos materiales, así como su desempeño en la remoción de contaminantes de aguas residuales y como soportes catalíticos en procesos químicos relevantes.

Adsorción de contaminantes orgánicos:

La activación química con hidróxido de potasio (KOH) se consolidó como un método eficaz para generar carbones activados de neumáticos de desecho con propiedades texturales sobresalientes. Mireya y colaboradores (2019) [9], en su investigación, prepararon ocho carbones variando la concentración de KOH (10-40%) y la temperatura de activación (700-900 °C). Los rendimientos de carbonización fueron notables (40-46%), y la caracterización física reveló estructuras porosas mixtas (micro-mesoporosas) con áreas superficiales BET que oscilaron entre 42 y 528 m²/g, incrementándose con la temperatura. El volumen mesoporoso también se vio favorecido por una mayor concentración de KOH (hasta 0.67 cm³/g). Estos materiales demostraron una significativa capacidad de adsorción para el surfactante no iónico tritón X-100 (hasta 220 mg/g), atribuyéndose este rendimiento a la optimización de la porosidad y al desarrollo de una superficie más básica tras la activación con KOH. Los datos de adsorción se ajustaron a las isothermas de Langmuir y Freundlich, indicando una superficie heterogénea.

En una línea similar, Mozaffarian (2019) [10] exploraron un método híbrido de activación físico-química, combinando la impregnación con KOH asistida por sonicación y la activación física con dióxido de carbono (CO₂) a temperaturas moderadas (550-750 °C) y tiempos de activación cortos (0.25-1.25 horas). La optimización mediante diseño experimental (RSM) permitió alcanzar áreas superficiales específicas impresionantes, llegando hasta 928 m²/g con un volumen de poro de 1.10 cm³/g. La temperatura de activación emergió como el factor más crítico. La detección de compuestos de azufre en estos carbones activados sugirió una aplicación potencial en la remoción de metales pesados como el mercurio de aguas residuales.

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de llantas

Adsorción de contaminantes inorgánicos:

La activación física también demostró ser una estrategia viable. Niksirat y colaboradores (2019) [11] produjeron carbón activado a partir de neumáticos oxidados mediante pirólisis (600 °C) seguida de activación con vapor de agua a altas temperaturas (719-930 °C) durante 1-3 horas. El material resultante presentó un área superficial de 550 m²/g y una estructura micro-mesoporosa (volumen de poro de 1.22 cm³/g), mostrando una capacidad máxima de adsorción de 120 mg/g para iones permanganato (MnO₄⁻), con una cinética que siguió el modelo de pseudo-segundo orden y un equilibrio descrito por la isoterma de Freundlich.

En otro enfoque para la remoción de contaminantes inorgánicos, Chigova y otros (2022) [13], trabajando en Zimbabue, prepararon carbón activado a partir de neumáticos de desecho mediante activación química con cloruro de zinc (ZnCl₂) a una temperatura de 250 °C. El material resultante fue dopado con nanopartículas de óxido de zinc (nZnO-STAC), obteniendo un adsorbente predominantemente amorfo con una capacidad máxima de adsorción de Langmuir de 152.2 mg/g para iones cromo hexavalente (Cr(VI)). La eficiencia de remoción se optimizó bajo condiciones ácidas (pH 3.0) y con una dosis adecuada de adsorbente.

Aplicaciones catalíticas:

Más allá de la adsorción, los materiales carbonosos derivados de neumáticos también encontraron aplicaciones como soportes catalíticos. Ayoob y colaboradores (2020) [12] desarrollaron un catalizador básico de carbono (50K400/WTAC) utilizando carbón activado obtenido por activación física con vapor de agua (área superficial de 590 m²/g), seguido de impregnación con KOH y calcinación. Este catalizador demostró una notable actividad y reusabilidad en la producción de biodiésel a partir de aceites no comestibles, alcanzando rendimientos superiores al 93% bajo condiciones optimizadas.

En Colombia, Amar-Gil y otros (2023) [14] se enfocaron en la obtención de materiales catalíticos para el proceso de Fischer-Tropsch.

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de llantas

El caucho de neumático fue pretratado con ácido sulfúrico para eliminar cargas inorgánicas y posteriormente pirolizado para obtener un material carbonoso (C-tire) con un área superficial de 209 m²/g y un volumen de poro de 1.11 cm³/g. Este material, con presencia de grupos funcionales oxigenados y especies de azufre, se utilizó como soporte para catalizadores de hierro, mostrando características prometedoras para la catálisis heterogénea.

Tabla 2

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos derivados de neumáticos de desecho para aplicaciones ambientales y catalíticas.

Autores, año	Rendimiento de síntesis (%)	Tipo de activación o tratamiento	Temperatura de activación/tratamiento (°C)	Tiempo de activación/tratamiento (h)	Área superficial (m ² /g) y volumen de poro (cm ³ /g)	Aplicación
Mireya y otros., 2019 [9]	40-46	Química (KOH)	700 y 900	3	42 a 528 y 0.31 a 0.67	Remoción de triton X-100 (surfactante no iónico) de aguas residuales
Mozaffarian., 2019 [10]	15-46	Físico-Química (KOH /sonicación+CO ₂)	550-750	0.25 a 1.25	928 y 1.10	Potencial remoción de mercurio de aguas residuales
Niksirat y otros., 2019 [11]	-	Física (vapor de agua)	719-930	1 a 3	550 y 1.22	Remoción de manganeso de aguas residuales
Ayoob y otros., 2020 [12]	392	Física (vapor de agua)	800-900	2	590	Soporte catalítico (KOH/WTA) para la transesterificación de aceites no comestibles
Chigova y otros., 2022 [13]	-	Química (ZnCl ₂) + dopaje ZnO	250	24	-	Remoción de Cr(VI) de aguas residuales
Amar-Gil y otros., 2023 [14]	646	Pirólisis (pretratamiento H ₂ SO ₄)	110	12	209 y 1.11	Soporte catalítico para el proceso de Fischer-Tropsch

La revisión de los estudios comprendidos entre 2019 y 2023 revela un panorama diverso y prometedor en la valorización de neumáticos de desecho para la obtención de materiales carbonosos destinados a la adsorción de contaminantes y como soportes catalíticos. La comparación crítica de estos trabajos permite identificar tendencias, evaluar la efectividad de las diferentes técnicas empleadas, y señalar los desafíos y futuras direcciones de investigación.

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de llantas

En cuanto a las técnicas de activación, la activación química con KOH, empleada por Mireya y otros (2019) y Mozaffarian y otros (2019), se destaca por su capacidad para generar carbones activados con elevadas áreas superficiales y porosidad controlada, alcanzando hasta $528 \text{ m}^2/\text{g}$ y $928 \text{ m}^2/\text{g}$ respectivamente. Esta eficiencia en el desarrollo de la estructura porosa contrasta con las desventajas inherentes al uso de un agente activante corrosivo como el KOH, que demanda un lavado exhaustivo y puede generar efluentes alcalinos, impactando los costos operativos y la sostenibilidad. La activación físico-química híbrida (KOH y CO_2), explorada por Mozaffarian y otros (2019), representa un intento por sinergizar los beneficios de ambos enfoques, buscando altas porosidades a condiciones menos extremas, aunque el rendimiento sigue siendo una consideración importante.

Por otro lado, la activación física con vapor de agua, utilizada por Niksirat y otros (2019) y Ayoob y otros (2020), emerge como una alternativa más limpia y ambientalmente benigna, aunque con áreas superficiales ligeramente inferiores ($550 \text{ m}^2/\text{g}$ y $590 \text{ m}^2/\text{g}$). Su sostenibilidad a largo plazo se ve favorecida por el uso de un agente activante no tóxico, si bien podría requerir condiciones de operación más exigentes en términos de temperatura y tiempo. La activación química con ZnCl_2 , investigada por Chigova y otros (2022) a baja temperatura ($250 \text{ }^\circ\text{C}$), ofrece la ventaja de un menor consumo energético y la posibilidad de dopar el material con nano-ZnO para una adsorción selectiva, aunque su estructura predominantemente amorfa dificulta la comparación directa con carbones activados convencionales. Finalmente, la pirólisis del caucho pretratado con H_2SO_4 (Amar y otros, 2023), enfocada en la obtención de un soporte catalítico (C-tire), prioriza la eliminación de inorgánicos, resultando en un material con menor área superficial ($209 \text{ m}^2/\text{g}$) pero con propiedades inherentes del neumático pirolizado, como la presencia de azufre, potencialmente relevante para la catálisis.

En cuanto a los rendimientos y propiedades, se observa una variabilidad significativa entre los estudios. La activación química con KOH, si bien efectiva para la porosidad, puede presentar rendimientos moderados (40-46% y 15-46%).

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de llantas

La pirólisis (64.6% en Amar y otros, 2023) tiende a ofrecer rendimientos más altos, aunque a menudo con áreas superficiales menores. La activación con $ZnCl_2$ no se centra en el rendimiento del carbón activado en sí mismo. Las propiedades texturales, como el área superficial y el volumen de poro, se ven directamente influenciadas por la intensidad de las condiciones de activación, pero las propiedades óptimas dependen de la aplicación específica, ya sea la adsorción de moléculas orgánicas o inorgánicas, o el soporte de catalizadores. La caracterización química revela la presencia de diversos grupos funcionales superficiales que modulan la interacción con los adsorbentes y la actividad catalítica, resaltando la necesidad de optimizar los pretratamientos para eliminar componentes no deseados, como los residuos de vulcanización identificados por Mireya y otros (2019).

Las implicaciones ambientales y económicas de la valorización de neumáticos de desecho son significativas, ofreciendo una alternativa a la disposición tradicional. La utilización de un residuo de bajo costo puede generar materiales competitivos, aunque es fundamental realizar análisis de ciclo de vida para evaluar la sostenibilidad global de los procesos, considerando el consumo energético y el uso de agentes activantes. La elección de métodos de activación más limpios y la optimización de los rendimientos son cruciales para maximizar los beneficios ambientales y económicos.

A pesar de los avances, existen limitaciones y retos actuales. La variabilidad de la materia prima requiere un control de calidad estricto. La optimización de los procesos de activación para lograr propiedades deseadas con altos rendimientos y bajo costo sigue siendo un desafío, al igual que la escalabilidad a nivel industrial. La caracterización detallada de los sitios activos y los mecanismos de acción es esencial para el diseño racional de materiales mejorados.

Finalmente, entre los aspectos que requieren mayor investigación, se incluyen el desarrollo de métodos de activación más sostenibles, la optimización de pretratamientos, la profundización en la relación estructura-propiedad-desempeño, estudios de escalabilidad y costos, la exploración de aplicaciones especializadas y la investigación sobre la reusabilidad y regeneración de los materiales. En conclusión, la valorización de neumáticos

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de llantas

de desecho en materiales carbonosos representa un campo con un gran potencial, pero requiere un esfuerzo continuo en investigación y desarrollo para superar las limitaciones actuales y alcanzar su plena implementación.

Referencias:

[1] Global Industry Analysts Inc, "The Global Tire Market (MCP-2798)," StrategyR. Accessed: Nov. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.strategyr.com/market-report-tires-forecasts-global-industry-analysts-inc.asp#>

[2] B. Baensch-Baltruschat, B. Kocher, F. Stock, and G. Reifferscheid, "Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment," *Sci. Total Environ.*, vol. 733, p. 137823, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137823.

[3] M. Battista, A. Gobetti, S. Agnelli, and G. Ramorino, "Post-consumer tires as a valuable resource: review of different types of material recovery," *Environ. Technol. Rev.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–25, Jan. 2021, doi: 10.1080/21622515.2020.1861109.

[4] 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.

[5] J. Xu et al., "High-value utilization of waste tires: A review with focus on modified carbon black from pyrolysis," *Sci. Total Environ.*, vol. 742, p. 140235, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140235.

[6] J. Li, D. Yin, and Y. Qin, "Carbon materials: structures, properties, synthesis and applications," *Manuf. Rev.*, vol. 10, no. 13, p. 13, Jul. 2023, doi: 10.1051/mfreview/2023011.

Estudios enfocados en la obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de llantas

[7] N. Muttill, S. Jagadeesan, A. Chanda, M. Duke, and S. K. Singh, "Production, Types, and Applications of Activated Carbon Derived from Waste Tyres: An Overview," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 1, p. 257, Dec. 2022, doi: 10.3390/app13010257.

[8] S. Amar Gil, "Uso de llantas residuales como materia prima para la elaboración de catalizadores de hierro y su aplicación en la síntesis Fischer-Tropsch," Universidad de Antioquia, 2022. [Online]. Available: www.udea.edu.co

[9] A. Mireya, R. Arias, J. Carlos, M. Piraján, and L. Giraldo, "Adsorption of Triton X - 100 in aqueous solution on activated carbon obtained from waste tires for wastewater decontamination," *Adsorption*, no. 0123456789, 2019, doi: 10.1007/s10450-019-00157-8.