

# Hacia la economía circular del negro de carbono por medio de la pirólisis de neumáticos fuera de uso

## Towards the circular economy of carbon black through pyrolysis of end-of-life tyres

Alberto Sanchís<sup>1</sup>, Alberto Veses<sup>1\*</sup>, Juan Daniel Martínez<sup>1</sup>, Tomás García<sup>1</sup>, Ramón Murillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC), Zaragoza

\* Autor de correspondencia: a.veses@icb.csic.es

### Resumen

El negro de carbón o negro de carbono (CB por sus siglas en inglés, *Carbon Black*) es un material carbonoso amorfo producido por la combustión incompleta de hidrocarburos derivados del petróleo. Por sus características como reforzante, la producción de este material se destina mayoritariamente a la fabricación de neumáticos, por lo que resulta razonable enfocar la atención a la recuperación del mismo una vez los neumáticos han terminado su vida útil. Adicionalmente, la producción de CB supone un serio impacto ambiental en forma de emisiones de CO<sub>2</sub> de origen fósil (del orden de 2.4 kg de CO<sub>2</sub> por kg de CB producido). El coste de producción de CB mediante el proceso más común (*Furnace Black*) es bastante volátil pues está altamente ligado al precio del barril de crudo de petróleo, provocando variaciones importantes en las industrias que trabajan con este material y que finalmente repercuten en el consumidor final. Por otro lado, la economía del CB supone retos importantes en materia de sostenibilidad debido al origen fósil de las materias primas, y al desafío asociado con su recuperación una vez terminada la vida útil del producto elaborado con CB. Con base en lo anterior, este trabajo presta especial atención al proceso de pirólisis de neumáticos fuera de uso (NFU) como estrategia de recuperación del CB, y expone algunas de las aplicaciones que actualmente se vienen estudiando para la incorporación del negro

de carbono recuperado (rCB) en diferentes sectores productivos. Asimismo, se resaltan los desafíos asociados no solo con el proceso de pirólisis mencionado, sino también con el rCB de cara a su uso como alternativa al CB comercial.

### 1. Introducción

Desde los comienzos de la revolución industrial en el siglo XIX, se instaló en la sociedad un modelo de economía de tipo lineal. Este modelo de economía consiste en la sucesión de distintas etapas claramente marcadas (Figura 1): un producto es fabricado a partir de las materias primas previamente extraídas de la naturaleza y, después, este producto se distribuye hasta el punto de venta o usuario final. Una vez el producto termina su vida útil, se deshecha generalmente en vertederos o, en el mejor de los casos, por medio de técnicas como la incineración o la digestión aerobia o anaerobia. Solo una pequeña parte de los productos que han terminado su vida útil son reutilizados, reparados, renovados, recuperados o reciclados, en función de las características del mismo y de las tecnologías disponibles. Sin embargo, este modelo económico lineal promueve la producción y transformación de nuevas materias primas extractivas, la gran mayoría de origen fósil, lo cual conlleva un importante impacto ambiental incompatible con la visión de sostenibilidad ambiental que impera en la actualidad.



Figura 1. Modelo general de economía lineal.

Por otro lado, el modelo de economía circular surge como alternativa al modelo clásico de economía lineal, y se fundamenta en la recuperación de materias primas a partir de los productos fuera de uso con el fin de utilizarlos en la fabricación de otros bienes o servicios, o en la siguiente generación del mismo producto (Figura 2). De esta forma, es posible reducir los consumos energéticos y las materias primas asociadas a las etapas de extracción, procesamiento y disposición final, disminuyendo considerablemente la huella ambiental de la manufactura del producto.

La transición hacia la economía circular presenta una solución eficaz para el problema ambiental que supone la acumulación de residuos en vertederos.

Además, esta transición de los modelos productivos potencialmente es capaz de acelerar la economía creando nuevos modelos de negocios y puestos de trabajos. En los últimos años, debido al incremento en la sensibilidad ambiental de la población y de nuevas regulaciones, los esfuerzos para la transición de los modelos económicos de producción han sido impulsados en gran medida. De forma más concreta, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible adoptada por la Asamblea General de la ONU que incluye 17 objetivos y 169 metas, indica que la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías para las economías circulares deberá ser uno de los pilares fundamentales del desarrollo tecnológico de la próxima década. De forma más precisa, el objetivo

número 12 de los objetivos de desarrollo sostenible expone la importancia de la transición hacia modelos de producción y consumo sostenibles, destacando el modelo de economía circular como el principal motor del cambio.



Figura 2. Modelo general de economía circular.

Con esta transición, algunos de los residuos sólidos más relevantes en la actualidad como pueden ser los productos plásticos, electrónicos y de construcción que han terminado su ciclo de vida, entre otros, están llamados a convertirse en recursos para la fabricación de nuevos elementos útiles en la sociedad. Particularmente, la reutilización de los neumáticos fuera de uso (NFU) puede dar lugar a la formación de nuevos productos como suelas de zapatos, pavimentos de zonas deportivas o infantiles o en diferentes materiales para la construcción, entre otros. Además, están formados por componentes muy valiosos como el negro de carbón o negro de carbono (CB por sus siglas en inglés, *Carbon Black*), cuya recuperación tras su uso, se plantea como uno de los mayores desafíos. Para el caso concreto de la economía circular del CB, es importante resaltar que la manufactura de neumáticos concentra el mayor mercado, por lo que resulta razonable pensar en estrategias de recuperación una vez terminada la vida útil del neumático. En este sentido, la pirólisis de los NFU se consolida como una de las técnicas más prometedoras desde la perspectiva de economía circular, ya que permite la recuperación del CB embebido en los NFU, así como otros productos de alto valor añadido en forma de líquidos y gases. No obstante, el sólido carbonoso obtenido (rCB por sus siglas en inglés: *recovered Carbon Black*) presenta una serie de desafíos debido a la heterogeneidad en su composición, la presencia de inorgánicos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  y  $\text{CaO}$ , entre otros, y de carbono residual, que limita su uso en ciertas aplicaciones, al menos como sustituto del CB virgen.

## 2. La importancia del negro de carbono

El CB está compuesto fundamentalmente por carbono (90 – 95 % en peso) [2]. El CB es una forma de carbono amorfo con una relación superficie-volumen extremadamente alta, con partículas que van desde

los 10 nm a los 500 nm, formando generalmente agregados ramificados de tipo cadena, que definen la estructura y el grado del material. A groso modo, la producción anual de este material se encuentra entre 12 y 15 millones de toneladas [3].

Las propiedades físicas y mecánicas del CB convierten este material derivado del petróleo en un insumo fundamental para una extensa variedad de productos fabricados por moldeo y extrusión, como carcasas, mangueras, cintas transportadoras, cables, sellos, juntas, esteras y neumáticos, entre otros. Adicionalmente, el CB es ampliamente utilizado como pigmento en tintas de impresión y pinturas de revestimiento. Básicamente, todo producto de color negro tiene una cantidad importante de CB. Otras alternativas consideran su uso como agente de mejora de la conductividad eléctrica en baterías, absorbente de radiación o como nanomaterial funcionalizado para la eliminación de metales pesados [2]. No obstante, de todas estas aplicaciones, la más importante está en la manufactura de neumáticos. Se estima que cerca del 90% del CB producido a nivel mundial se utiliza en aplicaciones relacionadas con los neumáticos, cumpliendo funciones críticas en sus cualidades como el refuerzo de las gomas que los componen, mejora en la conducción térmica evitando sobrecalentamientos puntuales, y protección contra la oxidación y la radiación ultravioleta. Por ello resulta razonable enfocar la atención a la recuperación del CB a partir de NFU.

Brevemente, cabe mencionar que existen aproximadamente 30 grados de CB comercial que se usan normalmente en los procesos relacionados con la manufactura del neumático, los cuales están clasificados (según la norma ASTM [4]) en varias clases como son N100, N200, N300, N500, N600, N700 y N900 [5]. Como particularidad, el CB más utilizado en la manufactura de los neumáticos se sitúa entre las series de CB N100 hasta CB N700. Las series N100, N200 y N300 se utilizan generalmente en las bandas de rodadura para mejorar la resistencia a la abrasión, las series N300 y N500 se utilizan en las carcasas de los neumáticos, y las series N600 y N700 también se utilizan en carcasas de neumáticos, pero con especificaciones menos exigentes.

## 3. Producción de negro de carbono

La mayor parte del CB producido en el mundo proviene de hidrocarburos pesados de refinería como los procedentes del craqueo catalítico del fuel-oil, mediante el denominado *Furnace Black Process* [6]. Una planta típica de este proceso contiene un reactor tubular refractario de acero diseñado de tal manera que la sección de mayor temperatura esté lo más separada posible de la zona de producción de CB (Figura 3) [7]. Para ello, se usa gas natural que se quema con aire precalentado hasta obtener temperaturas entre 1300 °C – 1500 °C. El diseño de este reactor se hace de tal manera que exista un alto flujo turbulento en la zona de combustión de tal forma que el hidrocarburo precursor del CB sea pulverizado

en la zona central del reactor con el fin de favorecer el craqueo térmico. Al final del reactor, la corriente de gases y sólidos suspendidos se enfría hasta los 540 °C mediante contacto directo por agua. Finalmente, el efluente del reactor entra en la zona de separación para recuperar el producto final y separar los gases generados en el proceso, los cuales son tratados antes de ser emitidos a la atmósfera.

Las características del CB producido, como pueden ser el tamaño de partícula, el área superficial o la

porosidad, dependen principalmente de varios factores como el caudal de alimentación de la materia prima al reactor, la velocidad espacial en la zona de reacción, la temperatura, la cantidad de agua utilizada en el enfriamiento, o la adición de cantidades pequeñas de sales alcalinas, entre otros. Para un mayor conocimiento sobre los tipos de grados de CB, las estructuras, propiedades o procesos de fabricación pueden consultarse diferentes trabajos y capítulos en la literatura [8,9].

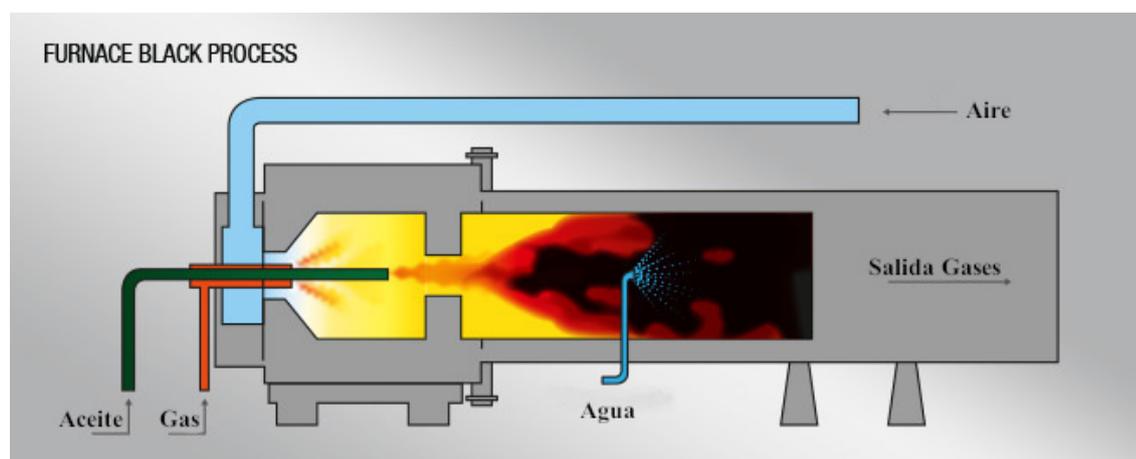


Figura 3. Diagrama de un reactor típico utilizado en la producción de CB [7].

Por lo tanto, con el objetivo de garantizar una producción de CB que sea más sostenible, urge identificar materias primas alternativas derivadas de recursos renovables o del reciclaje de materiales de desecho. La materia prima ideal para la fabricación de CB debe presentar un alto contenido en aromáticos y un bajo contenido en azufre, así como asfaltenos y resinas de alto peso molecular, además de estar libre de agua, cenizas y carbono suspendido [6]. En este sentido, existe en la bibliografía reciente diferentes trabajos donde se revisa el potencial para la fabricación de CB utilizando fuentes renovables como los llevados a cabo por Okoye et al. [2], Fan et al. [10] y Khodabakhsi et al. [11]. En estos trabajos se han identificado algunos aceites vegetales y biomasa lignocelulósica como posibles alternativas para la producción de CB, donde se resaltan diferentes factores como el bajo coste, bajo contenido de azufre y ceniza, entre otros. Sin embargo, el desafío que tienen que afrontar estos posibles precursores está relacionado con el alto contenido en oxígeno. Por otro lado, debido a su naturaleza y composición y, al hecho de que la mayor producción de CB a nivel mundial termina en los neumáticos, resulta de gran interés en términos de economía circular la recuperación del CB una vez los neumáticos hayan terminado su ciclo de vida útil.

#### 4. Neumáticos fuera de uso

Se estima que durante el año 2022, la producción mundial de neumáticos puede alcanzar los 2.4 billones de unidades [12]. Como consecuencia, la generación de NFU está en torno a 17 millones de toneladas [13]. Los neumáticos se componen

principalmente de caucho natural y sintético (60-65% en peso), CB (25-35% en peso) y una fracción menor de aditivos de carácter inorgánico, los cuales se añaden durante el proceso de fabricación [14]. Debido a su diseño orientado a resistir condiciones severas de rodadura, su reciclado o postratamiento supone un serio desafío. Por ejemplo, la degradación por microorganismos tardaría al menos 100 años para lograr una completa descomposición [15]. En términos generales, la valorización de NFU ha sido y continúa siendo un importante reto medioambiental, tecnológico y económico, que implica diferentes acciones por parte de la sociedad y la comunidad científica. Actualmente, la valorización de residuos se concentra en la recuperación de la mayor cantidad de los compuestos embebidos en su estructura; o al menos, en la producción de productos químicos intermedios que sirvan como precursores de nuevas materias primas, lo que resulta crucial para la aplicación de modelos basados en la economía circular [16,17]. En este sentido, la pirólisis es un proceso de reciclaje químico, de carácter ligeramente endotérmico, que es capaz de separar gran parte de los compuestos del neumático, dando lugar a compuestos más pequeños, sencillos y versátiles para su incorporación a nuevos procesos. De forma general, la pirólisis de NFU da origen a tres fracciones principales: una corriente gaseosa rica en hidrocarburos ligeros incluyendo el hidrógeno, la cual se puede utilizar para suplir el requerimiento energético del propio proceso de pirólisis; una corriente líquida de hidrocarburos con propiedades similares a un gasoil intermedio con una presencia importante de compuestos aromáticos de un solo anillo y, en función de las características del proceso,

de limoneno, todos ellos de gran interés para aplicaciones industriales. Finalmente, la pirólisis de NFU produce una fracción sólida denominada negro de carbono recuperado (rCB) [18], compuesto principalmente por los diferentes tipos de CB presentes en los neumáticos [19]. De este modo, el rCB representa un importante potencial para ser incorporado nuevamente en el proceso de fabricación de neumáticos, o en otras aplicaciones menores como sustituto de CB comercial [20]. Cabe destacar que, tanto los rendimientos como las propiedades de los productos obtenidos, dependen de las variables del proceso y de la configuración del reactor [21] por lo que la manera de cómo se lleve a cabo la pirólisis juega un papel fundamental en la incorporación del rCB en aplicaciones robustas, reales y de alto impacto.

### 5. Pirólisis de NFU: hacia la economía circular del negro de carbono

Existen en la actualidad varios proyectos internacionales para el desarrollo de la economía circular de los NFU. Un ejemplo de ello es el proyecto europeo BLACKCYCLE [22], cofinanciado por la Unión Europea a través del programa Horizon 2020. En este proyecto se busca crear, desarrollar y optimizar un proceso integral para la obtención de materias primas secundarias a partir de los NFU y que sirvan para la producción de nuevos neumáticos, como se muestra de manera esquematizada en la Figura 4. Este proyecto busca incluir, al menos, la mitad de la producción europea de neumáticos dentro de este modelo de economía circular. La base tecnológica de este proceso consiste en la pirólisis de NFU para la producción de hidrocarburos líquidos

y de rCB. Los primeros estarían destinados a la producción de plastificantes y negro de carbono con una calidad similar al de algunos negros de carbono tradicionales [2,23]. Por su parte, el rCB está llamado a presentar características adaptables al negro de carbono virgen [24,25]. A partir de esta base, existen múltiples tecnologías para el proceso de pirólisis que se están desarrollando en diferentes etapas y escalas, así como la optimización de las principales variables del proceso (temperatura y tiempo de residencia de los volátiles) para lograr obtener unos productos de alta calidad [26]. Asimismo, el proyecto VALUE-RUBBER [27], se enfoca en la desvulcanización del caucho de los NFU mediante tratamientos mecánicos de cizalladura y microondas. LIFE GREEN VULCAN [28] es otro proyecto que busca la desvulcanización del caucho de los NFU para la producción de gomas (naturales y sintéticas) con propiedades similares a sus equivalentes vírgenes. Por otro lado, el proyecto CBreCYCLE [29] se enfoca en la mejora de las propiedades del rCB a partir de estrategias que reducen la presencia de carbonilla en el mismo. Así, varios estudios preliminares han reportado la obtención de un producto con calidad suficiente para sustituir parcialmente algunos CB tradicionales para la fabricación de nuevos neumáticos. En términos generales todos estos proyectos pretenden reducir las materias primas de origen fósil necesarias en la producción de neumáticos, lo que supone una reducción importante de emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 6. Desafíos

Aunque las principales compañías de producción de CB tienen modelos de crecimiento responsables tanto con el capital como con los recursos naturales,

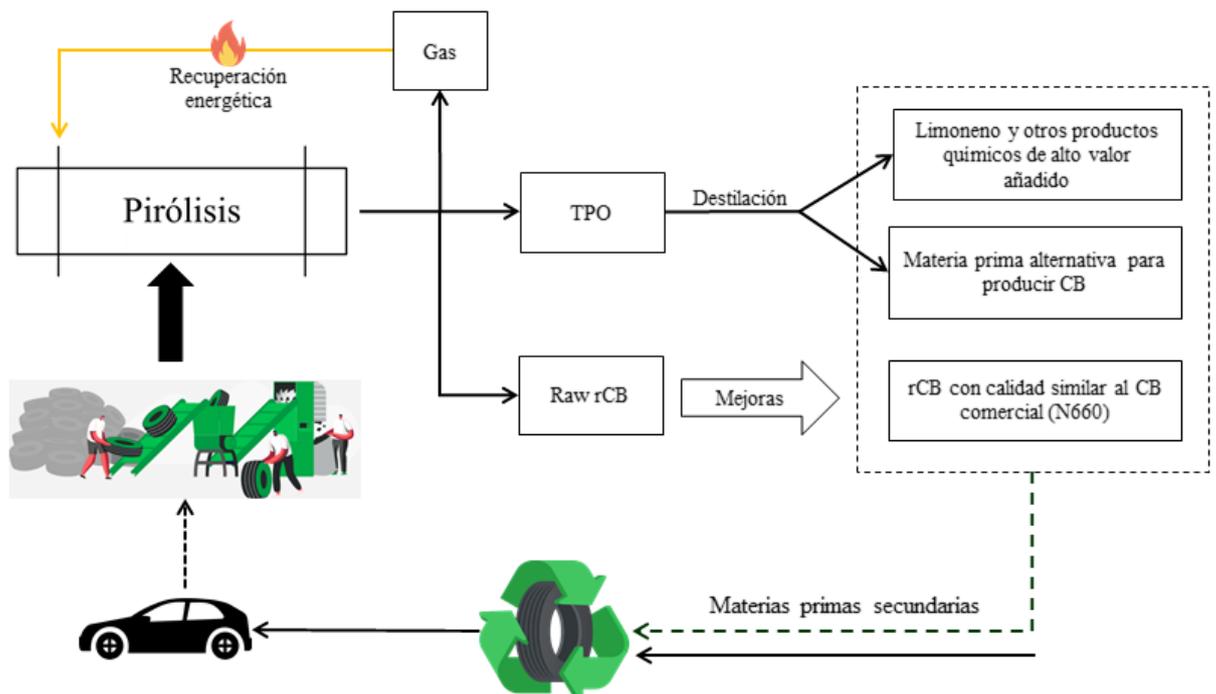


Figura 4. Esquema simplificado del proyecto Blackcycle.

la recuperación de CB por medio del proceso de pirólisis y su incorporación de nuevo en el mercado supondría un gran avance para potenciar en mayor medida la economía circular del mismo. Si bien cabe mencionar que existen ciertos productos que contienen CB y que pueden ser utilizados para su valorización material o energética, como puede ser el uso de neumáticos triturados en los asfaltos de las carreteras, estas estrategias no son suficientes para alcanzar una economía circular del CB sostenible, y no deja de ser un ejemplo de economía lineal con algún paso extra.

Sin embargo, aunque algunas compañías están dando un paso adelante en la incorporación del rCB en nuevas aplicaciones, aún quedan muchos desafíos que superar en los próximos años hasta llegar a consolidar el rCB dentro del mercado del CB. Uno de los principales se debe a que la composición de los NFU varía dependiendo de múltiples factores, como por ejemplo el tipo de neumático (neumático de coche, camión, vehículo agrícola, avión...), la parte del neumático que se procese (carcasa, banda de rodadura o mezclas de ambos) e incluso de las pequeñas diferencias en la composición que utilizan los distintos fabricantes [2]. Esto conlleva a que el rCB tenga algunas diferencias respecto a las características principales del CB virgen, como por ejemplo: tamaño de partícula, superficie específica, estructura, presencia de depósitos carbonáceos, etc. Además, y de forma general, el rendimiento del rCB varía significativamente con la composición.

A pesar de ser un material con un origen tan heterogéneo, la ASTM (American Society for Testing and Materials) está realizando importantes esfuerzos para poder estandarizarlo. En este sentido, la norma ASTM D8178 [18], publicada por primera vez en 2018 y actualizada en enero de 2022, define las bases para la nomenclatura de este material, diferenciando entre "raw rCB" como el producto bruto obtenido tras el tratamiento térmico de un material que contenga CB, y el rCB propiamente dicho el cual ha sido sometido a un proceso de molienda con el objetivo de aumentar sus propiedades como reforzante. La ASTM continúa desarrollando nuevos métodos para parametrizar las cualidades del rCB como la propuesta de norma WK81244 para la estandarización del rCB mediante termogravimetría (TGA) [30]. Así, uno de los grandes desafíos consiste en proporcionar una guía estándar para la determinación de los distintos parámetros y propiedades del rCB que sirvan para determinar su calidad. En este sentido, la norma ASTM D8466, publicada en 2022 [31], recoge varios métodos estándar usados en la caracterización del CB comercial, como por ejemplo el contenido de cenizas, pH, densidad, contenido de azufre, entre otros. Sin embargo, este comité concluyó que los métodos de caracterización de la estructura y superficie comúnmente utilizados para caracterizar el CB comercial, no muestran todavía una buena correlación al aplicarlos al rCB. Dichas propiedades, entre las que destacan el área superficial BET, resultan de gran importancia para cuantificar la

capacidad como reforzante del rCB y, por tanto, es necesario continuar las investigaciones que aborden esta falta de estandarización en determinadas propiedades clave.

Por otro lado, cabe mencionar que una de las principales diferencias en la composición entre los CB vírgenes y el rCB es la presencia de cenizas, que se sitúa entre el 10 y el 20 % en peso para el rCB, mientras que para el CB comercial no supera el 1% en peso [24]. Aunque se han estudiado y llevado a cabo estrategias de desmineralización para mejorar este parámetro [32], la viabilidad económica de este proceso aún no ha sido estudiada en profundidad. Otras diferencias fundamentales son: la alta heterogeneidad de su estructura debido a la variabilidad de los agregados, la presencia de depósitos carbonosos en el rCB que se relacionan con los aglomerados y que suelen ser difíciles de romper, y el mayor contenido en azufre, los cuales penalizan las propiedades como reforzante para su uso en neumáticos. Además, si bien aún no existen normas relativas a la química superficial para el rCB, la cual está principalmente vinculada con los grupos funcionales que contienen oxígeno (carboxilos, quinonas, lactonas...), ésta puede jugar un papel importante en su posterior aplicación [20,33]. Por otro lado, la actividad superficial parece estar muy relacionada con la presencia de los depósitos carbonáceos, los cuales reducen la superficie específica del material bloqueando su porosidad, a la vez que disminuyen su capacidad como reforzante [19,34]. Estas diferencias hacen que el rCB pueda presentar serias dificultades para llegar a una adecuada dispersión en la matriz polimérica. En la Figura 5 [35] se muestra una representación de la estructura típica del rCB donde se muestra la distribución de las cenizas y de depósitos carbonáceos alrededor de las partículas de CB.

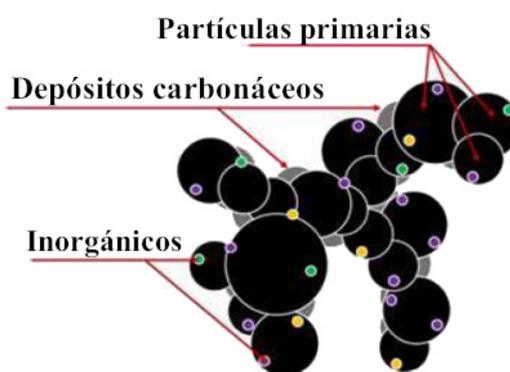


Figura 5. Esquema representativo de una estructura agregada de rCB [35].

Para mejorar el rendimiento del rCB como reforzante de polímeros se han estudiado diversos métodos. Uno de ellos es el ya mencionado proceso de desmineralización con ácidos. Aunque este proceso presenta desafíos, destacando la cantidad de ácido y la generación de gases, su implementación parece efectiva de cara a la funcionalización del rCB dada la adición de grupos funcionales que parecen

beneficiosos para mejorar su comportamiento como reforzante [19,36]. Existen otros tratamientos físicos que también mejoran el comportamiento del rCB como reforzante como son la molienda del material para reducir la presencia y el tamaño de aglomerados, y los tratamientos térmicos para eliminar parte de los depósitos carbonáceos del material.

En cualquier caso, en la Tabla 2 se muestra un resumen con la composición principal y algunas propiedades texturales tanto del rCB como de diferentes tipos de CB comerciales. Para el caso del tamaño de partícula del rCB, el promedio es muy

variable y la distribución del tamaño de partícula es muy amplia debido fundamentalmente a la presencia de una amplia variedad de agregados, tal y como se mencionó anteriormente. Adicionalmente, el rCB suele tener una mayor presencia de aglomerados por causa de los depósitos carbonosos generados en la pirólisis, y que reflejan la necesidad de realizar una molienda intensa para mejorar sus propiedades como reforzante de cara a su uso como alternativa al CB comercial, y que supone un punto clave para la estandarización del material [35].

**Tabla 2.** Algunas propiedades de diferentes tipos de CB comerciales y rCB.

	CB N220	CB N330	CB N550	CBN660	rCB
<i>Tamaño de partícula (nm)</i>	24-33	28-36	39-55	49-73	40-100
<i>S<sub>BET</sub> (m<sup>2</sup>/g)</i>	119	83	42	35	40-85
<i>Análisis inmediato (% en peso)</i>					
<i>Humedad</i>	0.85	0.59	0.55	0.32	~1
<i>Cenizas</i>	0.73	0.42	0.45	0.22	10-20
<i>Volátiles</i>	1.35	1.08	1.14	0.74	> 1.5
<i>Carbono fijo</i>	96.89	97.88	97.92	98.74	75-90
<i>Análisis elemental (% en peso)</i>					
<i>C</i>	95.2	97.6	98.7	98.1	80-90
<i>N</i>	0.3	0.28	0.3	0.3	0.1-0.7
<i>H</i>	0.3	0.26	0.3	0.3	0.5-2.0
<i>S</i>	1.1	0.74	0.6	1.1	1.5-2.5

A pesar de los retos que supone poner en marcha estos procesos, los esfuerzos académicos e industriales están consiguiendo avances muy rápidos en estos últimos años. Con esta perspectiva, se puede esperar la inclusión de algún tipo de rCB ya sea parcial o totalmente en la manufactura de productos tradicionalmente fabricados con CB. De esta manera, la economía circular del CB comenzará a ser una realidad. En cualquier caso, estudios recientes [24,25] han mostrado que el rCB puede utilizarse como sustitución parcial de algunos CB comerciales, como el N660 en proporciones de hasta el 20% en masa. Estos trabajos han mostrado que algunas de las propiedades mecánicas del producto final se mantienen inalterables, como la tensión de rotura, usando un polímero frecuente en la fabricación de neumáticos como el SBR (Styrene-Butadiene Rubber, por sus siglas en inglés). Así, no sólo es posible reducir el coste de los componentes del neumático, sino que su aplicación a escala industrial ofrece una solución sostenible a la generación de NFU.

Por otro lado, no se debe olvidar otros usos potenciales del rCB. Por un lado, este material se puede utilizar como precursor de carbón activado, particularmente para la eliminación de contaminantes

tanto en fase gas como acuosa debido a su estructura porosa [37]. También, presenta potencial para su aplicación en el campo de la agricultura, reduciendo la densidad del suelo, enriqueciendo de nutrientes el mismo y finalmente mejorando el rendimiento de los cultivos [37]. Adicionalmente, cabe destacar que se están explorando nuevas rutas alternativas para maximizar el aprovechamiento del material. Un ejemplo interesante es el uso del rCB en ánodos de batería Ion-Litio. El ánodo producido a partir de rCB ha demostrado tener un rendimiento superior al obtenido usando el CB convencional. Esta mejora en el rendimiento se asocia con la presencia de algunos de los compuestos que forman parte de las cenizas, principalmente el ZnS [38]. Este ejemplo prueba que, en algunos casos, la presencia de cenizas puede tener efectos sinérgicos positivos en algunos procesos, pudiendo llegar a convertir el rCB procedente de NFU en un material más deseable que el propio CB comercial.

En resumen, aunque un proceso rentable de recuperación del CB presente en los NFU parecía algo muy difícil de conseguir, gracias a los esfuerzos académicos e industriales que se vienen realizando en las últimas décadas, nos encontramos un paso más cerca de consolidar el desarrollo de una

economía circular del CB a través de la pirólisis de NFU, reduciendo sustancialmente el impacto ambiental de la industria del neumático, en forma de residuos, consumo energético y emisiones atmosféricas.

## Referencias

- [1] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, *Resources, Conservation and Recycling*. 127 (2017) 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- [2] C.O. Okoye, I. Jones, M. Zhu, Z. Zhang, D. Zhang, Manufacturing of carbon black from spent tyre pyrolysis oil – A literature review, *Journal of Cleaner Production*. 279 (2021) 123336. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123336>.
- [3] K. Pulidindi, S. Mukherjee, Carbon Black Market Size and Share | Statistics - 2027, Global Market Insights, Inc. (2020). <https://www.gminsights.com/industry-analysis/carbon-black-market> (accessed November 22, 2021).
- [4] D24 Committee, Standard Classification System for Carbon Blacks Used in Rubber Products, ASTM International, 2021. <https://doi.org/10.1520/D1765-21>.
- [5] L. Liang, Recovery and evaluation of the solid products produced by thermocatalytic decomposition of tire rubber compounds, Book, Texas A&M University, 2007. <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/4938> (accessed May 17, 2022).
- [6] R.W. Serth, T.W. Hughes, Source assessment: Carbon black manufacture, United States. Industrial Environmental Research Laboratory (Research Triangle Park, N.C.), 1977. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=91016QLH.txt>.
- [7] Our Wiki: Everything about Carbon Black, PentaCarbon GmbH. (n.d.). <https://pentacarbon.de/en/wiki/> (accessed June 20, 2022).
- [8] M. Ozawa, E. Ōsawa, Chapter 6 - Carbon blacks as the source materials for carbon nanotechnology, in: L. Dai (Ed.), *Carbon Nanotechnology*, Elsevier, Amsterdam, 2006: pp. 127–151. <https://doi.org/10.1016/B978-044451855-2/50009-7>.
- [9] A.A. Deshmukh, S.D. Mhlanga, N.J. Coville, Carbon spheres, *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 70 (2010) 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2010.06.017>.
- [10] Y. Fan, G.D. Fowler, M. Zhao, The past, present and future of carbon black as a rubber reinforcing filler – A review, *Journal of Cleaner Production*. 247 (2020) 119115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119115>.
- [11] S. Khodabakhshi, P.F. Fulvio, E. Andreoli, Carbon black reborn: Structure and chemistry for renewable energy harnessing, *Carbon*. 162 (2020) 604–649. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.058>.
- [12] Tire Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2022-2027, (n.d.). <https://www.researchandmarkets.com/reports/5577982/tire-market-global-industry-trends-share-size> (accessed May 17, 2022).
- [13] D.E. Ross, Use of Waste Tyres in a Circular Economy, *Waste Manag Res*. 38 (2020) 1–3. <https://doi.org/10.1177/0734242X19895697>.
- [14] J.D. Martínez, N. Puy, R. Murillo, T. García, M.V. Navarro, A.M. Mastral, Waste tyre pyrolysis – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 23 (2013) 179–213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>.
- [15] V. Torretta, E.C. Rada, M. Ragazzi, E. Trulli, I.A. Istrate, L.I. Cioca, Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review, *Waste Management*. 45 (2015) 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.018>.
- [16] I. Hita, M. Arabiourrutia, M. Olazar, J. Bilbao, J.M. Arandes, P. Castaño, Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 56 (2016) 745–759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.081>.
- [17] F. Xu, B. Wang, D. Yang, X. Ming, Y. Jiang, J. Hao, Y. Qiao, Y. Tian, TG-FTIR and Py-GC/MS study on pyrolysis mechanism and products distribution of waste bicycle tire, *Energy Conversion and Management*. 175 (2018) 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.013>.
- [18] D36 Committee, Standard Terminology Relating to Recovered Carbon Black (rCB), ASTM International, 2021. <https://doi.org/10.1520/D8178-18>.
- [19] J.D. Martínez, N. Cardona-Urbe, R. Murillo, T. García, J.M. López, Carbon black recovery from waste tire pyrolysis by demineralization: Production and application in rubber compounding, *Waste Management*. 85 (2019) 574–584. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.016>.
- [20] W. Urrego-Yepes, N. Cardona-Urbe, C.A. Vargas-Isaza, J.D. Martínez, Incorporating the recovered carbon black produced in an industrial-scale waste tire pyrolysis plant into a natural rubber formulation, *Journal of Environmental Management*. 287 (2021) 112292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112292>.
- [21] W.M. Lewandowski, K. Januszewicz, W. Kosakowski, Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type—A review, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 140 (2019) 25–53. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.018>.
- [22] Black Cycle | Move to the green revolution, (n.d.). <https://blackcycle-project.eu/> (accessed May 17, 2022).
- [23] Carbon Black from Tire-Derived Pyrolysis Oil – Orion | Black Cycle, (n.d.). <https://blackcycle-project.eu/scientific-publication-carbon-black-from-tire-derived-pyrolysis-oil-orion/> (accessed March 4, 2022).
- [24] F. Karabork, S.T. Tipirdamaz, Influence of pyrolytic carbon black and pyrolytic oil made from used tires on the curing and (dynamic) mechanical properties of natural rubber (NR)/styrene-butadiene rubber (SBR) blends, *Express Polym. Lett*. 10 (2016) 72–82. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2016.8>.
- [25] S.-M. Lai, Y.-L. Chu, Y.T. Chiu, M.-C. Chang, T.-Y. Hsieh, M.-H. Hsieh, Effect of pyrolysis carbon black from waste tires on the properties of styrene-butadiene rubber compounds, *Polymers and Polymer Composites*. 29 (2021) 75–86. <https://doi.org/10.1177/0967391120902882>.
- [26] N. Gao, F. Wang, C. Quan, L. Santamaria, G. Lopez, P.T. Williams, Tire pyrolysis char: Processes, properties, upgrading and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*. 93 (2022) 101022. <https://doi.org/10.1016/j.pecc.2022.101022>.
- [27] VALUE RUBBER | PROJECT, (n.d.). <https://valuerubber.eu/project/> (accessed July 28, 2022).

<sup>[28]</sup> Life Green Vulcan Project, Life Green Vulcan. (n.d.). <https://www.lifegreenvulcan.eu/project/> (accessed July 28, 2022).

<sup>[29]</sup> Recycling shredded used tyres and rubber waste into personalized recovered Carbon Black to limit use of fossil fuels and carbon dioxide emission | CBreCYCLE Project | Fact Sheet | H2020 | CORDIS | European Commission, (n.d.).

<https://cordis.europa.eu/project/id/101009283> (accessed July 28, 2022).

<sup>[30]</sup> Quality Parameters for Recovered Carbon Black, ASTM Standardization News. (2022). <https://sn.astm.org/?q=update/quality-parameters-recovered-carbon-black-mj22.html> (accessed June 28, 2022).

<sup>[31]</sup> D36 Committee, Standard Guide for Recovered Carbon Black—Carbon Black Test Methods for Testing rCB, 2022. <https://doi.org/10.1520/D8466-22>.

<sup>[32]</sup> X. Zhang, H. Li, Q. Cao, L. Jin, F. Wang, Upgrading pyrolytic residue from waste tires to commercial carbon black, *Waste Manag Res.* 36 (2018) 436–444. <https://doi.org/10.1177/0734242X18764292>.

<sup>[33]</sup> C. Dwivedi, S. Manjare, S.K. Rajan, Recycling of waste tire by pyrolysis to recover carbon black: Alternative & environment-friendly reinforcing filler for natural rubber compounds, *Composites Part B: Engineering.* 200 (2020) 108346. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108346>.

<sup>[34]</sup> C.J. Norris, M. Hale, M. Bennett, Pyrolytic carbon: factors controlling in-rubber performance, *Plastics, Rubber and Composites.* 43 (2014) 245–256. <https://doi.org/10.1179/1743289814Y.0000000088>.

<sup>[35]</sup> J.D. Martínez, C.G. Jung, P. Bouysset, Chapter 9. Pyrolysis, in: *Tire Waste and Recycling*, Elsevier, 2021: pp. 165–224. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820685-0.00028-4>.

<sup>[36]</sup> I. Iraola-Arregui, P. Van Der Gryp, J.F. Görgens, A review on the demineralisation of pre- and post-pyrolysis biomass and tyre wastes, *Waste Management.* 79 (2018) 667–688. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.034>.

<sup>[37]</sup> J. Xu, J. Yu, J. Xu, C. Sun, W. He, J. Huang, G. Li, High-value utilization of waste tires: A review with focus on modified carbon black from pyrolysis, *Science of The Total Environment.* 742 (2020) 140235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140235>.

<sup>[38]</sup> X. Wang, L. Zhou, J. Li, N. Han, X. Li, G. Liu, D. Jia, Z. Ma, G. Song, X. Zhu, Z. Peng, L. Zhang, The Positive Effect of ZnS in Waste Tire Carbon as Anode for Lithium-ion Batteries, *Materials.* 14 (2021) 2178. <https://doi.org/10.3390/ma14092178>.