

---

## Tratamientos sostenibles para la valorización de aceites usados del sector industrial y del transporte

---

**Adriana Páez Morales**

 <https://orcid.org/0000-0002-2898-9063>

**Claudio Moreno Arias**

 <https://orcid.org/0000-0001-6103-8238>

**Libardo Mendoza-Geney**

 <https://orcid.org/0000-0003-1343-509X>

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

**DOI:** <https://doi.org/10.29097/9789585303072.06>

### Resumen

En este capítulo se estudia la valorización de aceites lubricantes usados (ALU) a través de aplicaciones que tengan bajo consumo energético y con bajas emisiones que puedan afectar el medio ambiente. Este tipo de aplicaciones se enmarcan en el concepto de *economía circular*, que contribuye en la visión de ciudades sostenibles donde el transporte es uno de los mayores generadores de contaminación. Con este fin, se recopila información relacionada con las características fisicoquímicas de los aceites lubricantes usados, lo que permite definir una ruta de posibles aplicaciones sostenibles para este tipo de residuos. Dentro de las posibles aplicaciones identificadas para estos residuos, se encuentra la valorización energética y su uso como materia prima base para la producción de materiales de valor agregado. De forma específica, se describen los resultados obtenidos en la evaluación experimental del tratamiento biológico de ALU para la reducción de componentes contaminantes en estos residuos. Por último, se realiza un análisis comparativo de las diferentes vías de valorización o reutilización de ALU, teniendo en cuenta factores de normatividad, necesidades y requerimientos técnicos en los contextos nacional e internacional.

**Palabras clave:** aceites lubricantes usados; economía circular; propiedades fisicoquímicas; tratamientos biológicos; valorización energética.

## Introducción

La producción de energía es un insumo vital que se ha considerado como el principal eje de crecimiento de cualquier economía o industria en el mundo moderno. La fuente de energía con mayor participación en la matriz energética en el planeta corresponde a los recursos energéticos de origen fósil, que a su vez son los combustibles generadores de la mayor parte de gases de efecto invernadero (Goddin, 2020). El sector del transporte ha sido uno de los principales productores de huella de carbono durante el último siglo. Actualmente, casi el 20 % de las emisiones equivalentes de dióxido de carbono generadas en los sistemas de producción de energía, a escala global, provienen de dicho sector (Albuquerque *et ál.*, 2020). Estas se deben sobre todo a las emisiones directas ocasionadas por la combustión de gasolina y diésel, y a las indirectas, asociadas al gasto energético, los materiales y los insumos de base carbono usados para la operación y el mantenimiento de este sector (Albuquerque *et ál.*, 2020). Además de las emisiones de gases de efecto invernadero, en el sector del transporte hay una serie de contaminantes de carácter fósil que tienen un efecto negativo sobre diferentes ecosistemas, tanto en el contexto urbano como en el rural.

Uno de los productos residuales más importantes derivados del petróleo y que se utiliza en toda clase de vehículos y maquinarias es el aceite lubricante que se emplea en diversas funciones. Estas incluyen la lubricación, en la cual el aceite tiene el propósito de reducir la fricción y el desgaste al introducir una película lubricante entre las partes mecánicas móviles; el enfriamiento, que consiste en la acción del aceite como un disipador de calor en las partes móviles críticas, disminuyendo así el potencial de deformación y desgaste de los componentes; la limpieza y suspensión, que le permite al aceite facilitar el buen funcionamiento de la máquina al eliminar y suspender productos potencialmente dañinos, como trazas de carbón, lodo, pintura, barniz, etc.; y la protección, en la que el aceite evita daños en el material metálico debido a posibles procesos de oxidación, corrosión y desgaste (Minami, 2017). Sin embargo, durante su utilización, estos aceites adquieren impurezas y compuestos contaminantes como ácidos, fenólicos, metales pesados, entre

otros (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2012). Por ende, la disposición inadecuada de los *aceites lubricantes usados* (ALU) puede crear un impacto adverso en la salud humana, contaminar las fuentes de agua y el suelo, si se descarga en la tierra, y generar emisiones gaseosas contaminantes al aire cuando se quema como combustible —por tener una baja calidad como tal— (Yadav y Saravanan, 2015). En el capítulo 5 de este libro se presenta una amplia discusión alrededor del uso del agua desde una perspectiva medioambiental y de sostenibilidad de acuerdo con un análisis ecofeminista.

A pesar de las impurezas en ALU, la base de composición química del aceite generalmente se conserva. Por ello se requiere la búsqueda de alternativas sostenibles de bajo consumo energético y mínimo impacto ambiental para la adecuación y reutilización de estos aceites usados. Esto se puede convertir en una gran oportunidad de valorización y un propósito dentro de la aplicación del concepto de *economía circular*, en grandes ciudades donde el transporte es uno de los mayores generadores de contaminación. Además, se debe tener en cuenta que la expansión de la industria de manufactura de vehículos estimula el incremento de la cantidad de ALU (Li *et ál.*, 2020). Se deben buscar opciones para el diseño y la transición a ciudades sostenibles que incluyan la generación de valor a materiales residuales. Para tal fin se deben examinar conceptos relacionados con la economía circular.

Los materiales en una economía circular no se establecen como un producto disponible, sino como un activo de valor que se debe rastrear y conservar para su reutilización, de la misma manera que el capital financiero se invierte, se recupera como ingresos y se reinvierte (Ashby, 2016). Los materiales se producen y se convierten en productos que entran en servicio donde permanecen durante su vida útil. En el modelo circular, la eliminación al final de su vida útil como desechos no es una opción. En cambio, el producto se reutiliza de una manera menos exigente, o se reacondiciona para darle una segunda vida útil, o se desmantela en los materiales que lo componen para su reciclaje. Las tres opciones retienen los materiales del producto como *stock* activo (Ashby, 2016). También se puede considerar que una economía sostenible de materiales no solo está direccionada por

la creación exclusiva de una economía circular, sino que apunta a minimizar su impacto ambiental (Allwood, 2014), aumentar la responsabilidad de los fabricantes para la recuperación de los productos, reemplazar flujos de materiales técnicos con flujos biológicos (bioeconomía circular), estandarizar materiales y diseños en todas las plataformas de proveedores y promover el mejor uso general de los materiales, manteniendo los productos en su valor más alto durante más tiempo (Goddin, 2020). La valorización de ALU puede enmarcarse en el concepto de economía circular ligada a la química verde, que se amplía en el capítulo 4 del presente libro, y cuyo foco se centraliza en disminuir el consumo de energía de fuentes fósiles, proteger el agua, minimizar el uso de materiales peligrosos y establecer la producción sostenible de materiales y energía.

En Colombia, en los últimos años se han abierto diferentes espacios para definir lineamientos concernientes a buscar un crecimiento sostenible basado en la Agenda 2030, y que pueden confluir en la búsqueda de estrategias que incluyan sistemas de valorización de residuos como los ALU generados en el sector del transporte. En 2019 se creó una base fundamental de políticas públicas de Colombia a través del establecimiento y los resultados de la Misión Internacional de Sabios. A partir de esta, se consolidaron lineamientos en focos estratégicos, como *tecnologías convergentes-industrias 4.0, energía sostenible y biotecnología y medio ambiente y bioeconomía* (Misión Internacional de Sabios, 2020). Los resultados de análisis de estos focos coinciden en hacer factible la valorización de residuos, como los ALU, no solo como política pública aplicable en los diferentes sectores de Colombia, sino también como eje transversal de investigación en instituciones de educación superior.

La búsqueda de opciones para la valorización de ALU parte de su caracterización técnica. En este sentido, se debe tener información y claridad de sus propiedades fisicoquímicas, que se mencionan a continuación.

## Propiedades fisicoquímicas de aceites usados

Las propiedades fisicoquímicas más relevantes de los ALU son la densidad, la viscosidad, el índice de acidez, la saponificación, el análisis elemental y los grupos funcionales (Pinheiro *et al.*, 2017; Eleyedath y Swamy, 2020). Eleyedath y Swamy (2020) han realizado una revisión general de las propiedades fisicoquímicas de ALU para determinar su posible uso como material complementario en la producción de asfaltos (tabla 1).

**Tabla 1**

*Resumen de valores promedio de propiedades fisicoquímicas de ALU*

Propiedad	Valor reportado	Referencia
Temperatura de inflamabilidad / °C	120 - 220	Eleyedath y Swamy (2020)
Temperatura de ignición / °C	210 °C	Eleyedath y Swamy (2020)
Gravedad específica / 1	0,85 - 0,93	Eleyedath y Swamy (2020)
Densidad a 15 °C / g/cm <sup>3</sup>	0,756 - 0,912	Eleyedath y Swamy (2020)
Viscosidad a 40 °C / Centistoke	100 - 137	Eleyedath y Swamy (2020)
Viscosidad a 60 °C / Centipoise	33 - 39	Eleyedath y Swamy (2020)
Índice de viscosidad / 1	89 - 90	Eleyedath y Swamy (2020)
Índice de saponificación / mg KOH/g	5 - 13	Pinheiro et al. (2017)
Índice de acidez / mg KOH/g	0,5 - 3,41	Pinheiro et al. (2017)
Hidrógeno / % g/g	5 - 13	Eleyedath y Swamy (2020)
Carbono / % g/g	60 - 83	Eleyedath y Swamy (2020)
Nitrógeno / % g/g	15 - 31	Eleyedath y Swamy (2020)
Azufre / % g/g	1 - 3	Eleyedath y Swamy (2020)
Oxígeno / % g/g	2 - 15	Eleyedath y Swamy (2020)
Fósforo / ppm	800 - 1200	Pinheiro et al. (2017)
Zinc / ppm	1000 - 1200	Pinheiro et al. (2017)
Calcio / ppm	1800 - 2500	Pinheiro et al. (2017)
Hierro / ppm	124 - 264	Pinheiro et al. (2017)
Silicio / ppm	30 - 120	Pinheiro et al. (2017)

*Nota.* Los valores presentados corresponden a información recopilada por Eleyedath y Swamy (2020) y Pinheiro *et al.* (2017).

Los ALU pueden exhibir características del estado semisólido a líquido, dependiendo de la temperatura. Son más livianos que el agua; por tanto, se observan valores de densidad y gravedad específica más bajos. El poder calorífico, la temperatura de inflamabilidad y de ignición, determina la posible valorización energética. Los ALU exhiben un estado de fluido por encima de 0 °C, y por esta razón se puede establecer la viscosidad como indicador de sus propiedades generales (Eleyedath y Swamy, 2020). El índice de acidez está intrínsecamente relacionado con el tipo de aceite, la clase de aditivos, el tiempo de uso y el tipo de aplicación que tiene el ALU. El índice de saponificación es una medida de la materia saponificable que reaccionará con el hidróxido de potasio, y permite establecer posibles aplicaciones de reutilización, usando un pretratamiento para extracción de metales (Pinheiro *et ál.*, 2017).

El análisis elemental consiste en determinar la composición de elementos en los ALU, como hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno, azufre, fósforo y calcio, y metales pesados como hierro, manganeso, cobre, zinc, plomo, magnesio, cromo, estaño, cadmio y molibdeno (Eleyedath y Swamy, 2020). Las técnicas más usadas para la determinación de estos elementos son la fluorescencia de rayos X, la espectrometría por absorción atómica y la espectroscopia de emisión atómica de plasma (Eleyedath y Swamy, 2020). En la tabla 1 se encuentra un compendio de valores de la composición de ALU reportado por varios autores. El análisis elemental puede ser útil para comparar la composición de ALU de diferentes fuentes o aplicaciones, específicamente para detectar aditivos y contaminantes externos como metales de desgaste. Por ejemplo, el fósforo y el zinc son elementos que se encuentran típicamente en aditivos antidesgaste, antioxidantes e inhibidores de la corrosión, utilizados para proteger segmentos metálicos en condiciones operativas exigentes (Pinheiro *et ál.*, 2017). En el caso del calcio, se asocia principalmente con los detergentes, proporcionando acción limpiadora al suspender los materiales polares y neutralizar los ácidos en los lubricantes de los motores (Patel y Shadangi, 2020).

La determinación de propiedades fisicoquímicas de ALU permite establecer un camino para definir las posibles aplicaciones de este tipo de resi-

duos. A continuación, se hace una descripción de las posibles aplicaciones de ALU.

## Aplicaciones sostenibles de aceites usados

De acuerdo con el Convenio de Basilea, ratificado y adoptado en Colombia mediante la Ley 253 de 1996, los aceites usados de origen automotor e industrial se clasifican como desechos peligrosos de aceites minerales, no aptos para el uso al que estaban originalmente destinados, o mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua. Entre sus posibles componentes peligrosos se encuentran: el plomo, el cloro, el bario, el magnesio, el zinc, el fósforo, el cromo, el níquel, el aluminio, el cobre, el estaño, el azufre y los hidrocarburos aromáticos polinucleares, entre otros. Estos, si se liberan o manejan inadecuadamente, pueden tener efectos adversos inmediatos o retardados en el medio ambiente. Partiendo de ello, los principales contaminantes de los aceites lubricantes usados son los metales pesados y los sulfuros que estos adquieren a lo largo de su vida útil. Son considerados compuestos tóxicos, por lo cual es necesario removerlos.

En Colombia, según la Ley 253 de 1996, los aceites lubricantes usados se clasifican como un desecho peligroso que debe controlarse, debido a la alta concentración de contaminantes tóxicos que los componen: azufre, metales pesados, organometálicos, residuos de aditivos, entre otros. Si por cualquier motivo estos son liberados al medio ambiente sin un tratamiento adecuado, contaminan de manera irreversible las fuentes hídricas, el aire y los suelos, e incluso afectan la salud de los seres vivos y el ambiente. Cabe señalar que “un litro de aceite usado contamina 1000 m<sup>3</sup> de agua” (Asociación Colombiana de Petróleo y Gas, 2017a).

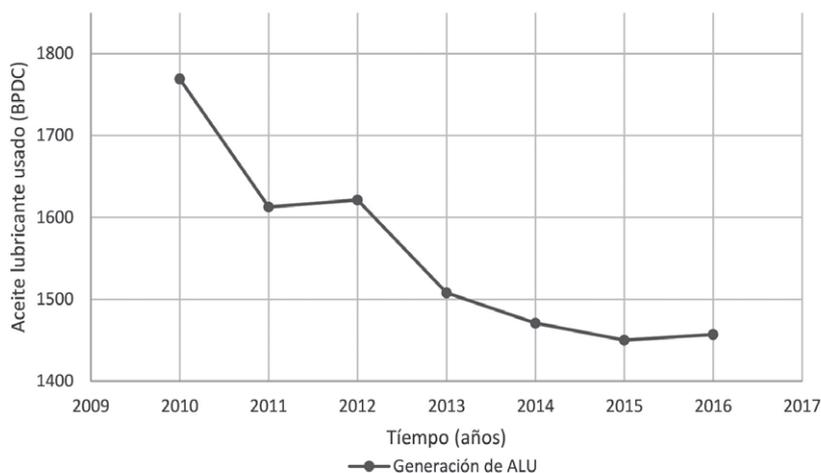
En 2016, se generaron aproximadamente “531.794 barriles de aceite lubricante usado” provenientes sobre todo del sector automotor de carga. Según la Asociación Colombiana del Petróleo, el 71 % de dichos aceites fue dispuesto o aprovechado correctamente; sin embargo, el 29 % restante no fue registrado, es decir que pudo ser utilizado sin tratamiento alguno como “combustible, desmoldante de piezas de ladrillo”, en ventas ilegales o vertido

al ambiente. A pesar del esfuerzo del Gobierno nacional y del sector privado, las cifras de aceite lubricante usado reintegrado al mercado son alarmantes: el Fondo de Aceites Usados estima que “entre el 15 y el 20 % del mercado de aceite lubricante es falsificado” (Asociación Colombiana de Petróleo y Gas, 2017a), siendo este otro mercado de procedencia del ALU.

En Colombia, del total de aceites lubricantes consumidos, el 53 % se convierte en ALU y el resto se pierde por fugaz, combustión del aceite, pérdidas por rozamiento, entre otras. Como consecuencia del servicio prestado por los aceites lubricantes durante su vida útil, estos pierden sus propiedades lubricantes y de protección, a la vez que adquieren grandes concentraciones de “metales pesados, solventes clorados, hollín, subproductos de la combustión incompleta, agua e impurezas exteriores” (Tormos, 2005). En la figura 1 se exhibe el histórico de ALU generado desde 2010 hasta 2016 en todo el territorio nacional.

**Figura 1**

*Generación de aceite lubricante usado entre 2010 y 2016*



*Nota.* La gráfica muestra la reducción que ha tenido la generación de ALU en los últimos años en Colombia, la cual se atribuye al aprovechamiento o reutilización. Tomado de Asociación Colombiana de Petróleo y Gas (2018).

Con esta perspectiva, se creó un proyecto de autogestión ambiental que busca la responsabilidad social de los fabricantes, con el fin de promover buenas prácticas ambientales y estructurar negocios económicamente sostenibles, para disponer de manera correcta el ALU, mediante el Fondo de Aceites Usados (Asociación Colombiana de Petróleo y Gas, 2017b).

Existen diversos tratamientos fisicoquímicos para la reutilización de estos aceites, que tienen la capacidad de disminuir contaminantes presentes en el aceite, como la sedimentación, el calentamiento, la centrifugación, la adsorción y el intercambio iónico, entre otros. También existen diversas tecnologías que la mayoría de las industrias siguen para la protección del medio ambiente y la minimización de las concentraciones de contaminación, que sirven para degradar los aceites usados, como el proceso de ácido arcilla, el proceso Meiken, la extracción por solvente, el proceso KTI y el proceso Berk (Ministerio del Medio Ambiente y el Desarrollo Sostenible [Minambiente], 2014). Sin embargo, estos procedimientos son muy costosos e inseguros para el medio ambiente, puesto que generan una serie de residuos que no se pueden manejar y conllevan mucho tiempo (Bhattacharya *et ál.*, 2015).

A continuación, se presentan algunas alternativas aceptadas en Colombia actualmente para el reciclaje y la regeneración de los ALU. Cabe señalar que antes de realizar cualquier tratamiento para el aprovechamiento de ALU, es necesario seguir una serie de pretratamientos en función de sus contaminantes, para evitar así cualquier daño en los equipos del tratamiento, su perturbación o la emisión accidental de sustancias indeseadas al ambiente. Los pretratamientos más utilizados son: “calentamiento, sedimentación, centrifugación, demulsificación, filtración, adsorción, intercambio iónico y destilación flash” (Minambiente, 2014).

1. Valorización energética. Para esta se considera el hecho de que los ALU tienen capacidad calorífica específica alta (aproximadamente 8500 kcal/kg) frente a la del carbón utilizado en Colombia (aproximadamente 6700 kcal/kg) (Núñez, 1997). Estos, para ser empleados, deben satisfacer los requisitos de la Resolución 1446

de 2005, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual implanta la realización de pretratamientos establecidos para evitar que el derivado de la combustión y los gases generados por esta no ocasionen un impacto ambiental.

2. Regeneración de bases lubricantes. Consiste en recuperar la base lubricante de los aceites usados, por medio de tratamientos fisicoquímicos que buscan la separación de los contaminantes presentes en este, y obtener una base purificada que puede ser empleada en la fabricación de nuevos aceites lubricantes. En Estados Unidos, según la Agencia de Protección de Estados Unidos (Environmental Protection Agency, 1996), los tratamientos fisicoquímicos de regeneración o re-refinación de bases lubricantes tienen la cualidad de ser muy eficientes, ya que por cada tres litros de aceite usado se pueden obtener dos litros de base para lubricante nuevo y tratado.

## **PRETRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE ALU**

Hasta la fecha, el aprovechamiento de los ALU no ha sido muy explorado desde una perspectiva biotecnológica, debido a que la mayor parte de la investigación realizada en este campo ha estado enfocada en la biorremediación de suelos y lodos contaminados con aceites de motor usado. Por esta razón, se han creado convenios interinstitucionales como los del grupo de investigación en Energías Alternativas de la Fundación Universidad de América y el Centro de Tecnología del Transporte (CTT)-SENA, para realizar un proyecto de investigación con el propósito de desarrollar una alternativa en el área de la biotecnología, que permita la remoción de azufre y metales pesados y así lograr la reutilización o valorización del ALU.

Este proyecto se focaliza en la biorremediación del aceite que se basa en la capacidad de degradación microbiana simple de los contaminantes presentes en los ALU, sin generación de residuos peligrosos (Bhattacharya *et ál.*, 2015). Este tipo de aplicaciones permite viabilizar un tratamiento integral de ALU, en el cual se pueda extraer un aceite re-refinado, que pueda reutilizarse como combustible o lubricante, y que no implique altos

costos y tratamientos complejos. A partir de los resultados de este proyecto, se establece la oportunidad de unificar dos técnicas complementarias para el tratamiento del aceite, que consisten en el tratamiento fisicoquímico y microbiológico para la generación de un proceso eficiente. El proyecto realizado por la Fundación Universidad de América y el CTT-SENA consideró dos fases, que se presentan a continuación.

En la fase I se hicieron dos tratamientos simultáneos para el ALU de motor. En primera instancia, se realizó un pretratamiento fisicoquímico, para el cual se utilizó el método de ácido-arcilla. Este pretratamiento consiste en la evaporación del agua y de hidrocarburos ligeros que forman parte del aceite. Luego el aceite se trata con ácido sulfúrico para que este reaccione y forme un lodo que tiene compuestos contaminantes, como los metales pesados, los hidrocarburos aromáticos y el ácido sulfúrico. Al producto que se obtuvo se le agrega arcilla y se filtra con el fin de mejorar el color y los niveles de acidez que contiene. Después el aceite se destila y de allí se obtienen las bases lubricantes para su posterior utilización en aceites lubricantes nuevos.

En la fase II, se realiza el tratamiento microbiológico de los ALU por medio de *bacterias sulfato reductoras* (BRS), las cuales tienen la capacidad de metabolizar contaminantes como sulfuros y nitritos, entre otros. La evaluación cualitativa y cuantitativa de la remoción de azufre y metales pesados se hizo durante 29 días. Tras esta se encontró que las cepas nativas de BRS son aptas para el propósito planteado, gracias a que llevan a cabo la ruta metabólica de reducción disimilativa de sulfatos. El tratamiento biológico propuesto alcanzó porcentajes de remoción promedio superiores al 70 % en los contaminantes hierro, silicio, aluminio y cobre. Además, removieron en su totalidad los compuestos de azufre presentes en la matriz del ALU.

Como resultado del análisis de las dos fases del proyecto, se llegó a la conclusión de que un proceso integral que considere un pretratamiento fisicoquímico en conjunto con un pretratamiento biológico mediante BRS permite mayores eficiencias en la adecuación de los ALU para su reutilización.

## Tratamiento de ALU en el contexto nacional e internacional

### TENDENCIAS EN COLOMBIA SOBRE EL APROVECHAMIENTO DE ALU

A continuación, se describen algunas de las experiencias en Colombia relacionadas con la reutilización de ALU, junto con las oportunidades que a partir de ella se generarían. De acuerdo con Muñoz *et ál.* (2019), del total de los aceites lubricantes que se consumen en Colombia, se estima que 8.283.200 galones por año, equivalentes al 38 % de la producción, son reutilizados principalmente como combustibles industriales. Esta cifra corresponde a lo que se reporta como recolectado y tratado en puntos de origen como talleres, centros de servicio e industrias manufactureras.

Según Minambiente (2014), en Colombia las cantidades generadas de ALU tienen el potencial para utilizarse como base para nuevos lubricantes, combustible industrial alternativo al fueloil, y como combustible en la industria del cemento. Este último escenario es el que ofrece el mejor panorama en el país para darle un uso útil a estos residuos, ya que las plantas cementeras necesitan alcanzar altas temperaturas para transformar las materias primas incorporadas en el Clinker, las cuales son altamente alcalinas. Los contaminantes como hidrocarburos clorados y aromáticos policíclicos se destruyen durante la producción. Además de esto, tampoco se producen incrementos significativos de las emisiones a atmósfera, en particular de dioxinas y furanos. La alcalinidad de las materias primas reduce las emisiones de gases como los SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y cloruros de hidrógeno. La legislación colombiana (Minambiente, 2014) establece que el ALU se puede utilizar puro o mezclado en hornos cementeros que incorporen sistemas de control de emisiones de material particulado de alta eficiencia (mayor al 95 %). Pero además establece que no pueden tener concentraciones de bifenilos policlorados (PCB) o terfenilos ploclorados (PCT) mayores a 50 ppm, ni concentración de halógenos totales (HCl) mayores a 1000 ppm.

Como consecuencia de la pandemia de la COVID-19, la producción de cemento en Colombia para 2020 ha disminuido en comparación con

2019. En diciembre, la producción fue de 1176,3 miles de toneladas, que corresponden a un decrecimiento del 1,2% en el mismo mes del año anterior (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2021). No obstante, teniendo en cuenta esta reducción, de acuerdo con Camacol (2021), para 2021 se espera un crecimiento en la industria de la construcción del 14%, equivalente aproximadamente a 195.000 unidades de vivienda.

A pesar de esta desaceleración en la producción de cemento, para el país vienen proyectos de infraestructura de vías, aeropuertos, puertos y ferrovías en los próximos años, los cuales reactivarán la economía y darán oportunidades tanto de empleo como de empresarismo (Agencia Nacional de Infraestructura [ANI], 2021; Garrigues, 2021). En todos estos proyectos se van a requerir grandes cantidades de cemento para producir el concreto. La fabricación de este insumo implica una gran demanda de combustibles convencionales como fueloil, diésel (ACPM) o carbón, que pueden sustituirse con la reutilización de los ALU. Obras como la Primera Línea del Metro de Bogotá, que incluye patio-taller, columnas y vigas para viaducto, así como las estaciones, requerirán también cantidades de cemento que puede ser elaborado utilizando los ALU como fuente de energía (Metro de Bogotá, 2021).

Proyectos ferroviarios como el Tren de Cercanías de Occidente entre Facatativá y Bogotá, el Regiotram del Norte entre Bogotá y municipios del norte de Cundinamarca, el tren ligero de Rionegro, el corredor férreo de La Dorada y Chiriguaná, entre otros, también ofrecen una gran oportunidad para usar este insumo como fuente de energía para producir el cemento que permitiría elaborar el concreto de estas obras. También habría que tener en cuenta proyectos aeroportuarios como la ampliación de los existentes en Cali, Cartagena, Neiva y Buenaventura, donde este insumo es muy requerido (ANI, 2021; Garrigues, 2021).

## **ECONOMÍA CIRCULAR ALREDEDOR DE LOS ACEITES USADOS DE MOTOR**

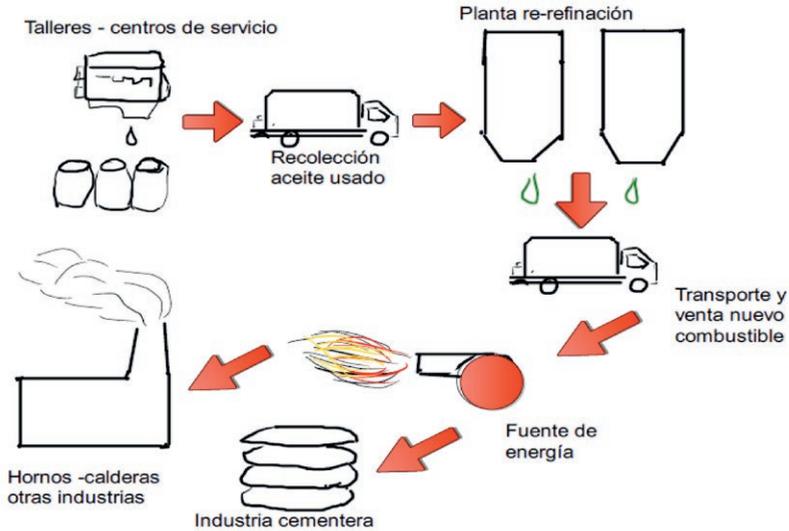
De acuerdo con Geisendorf y Pietrulla (2017), la economía circular es actualmente uno de los temas más discutidos dentro de la economía ambiental

y un foco de la estrategia Horizonte de la Unión Europea 2020. Tiene como núcleo el uso restaurativo de recursos y establece que las materias primas no deben seguir siendo residuos descartados. Mientras se han dado pasos grandes en el mejoramiento de la eficiencia de los recursos, cualquier sistema basado en consumo, en lugar del uso restaurativo de los recursos, implica pérdidas significativas en la cadena de valor (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

Los aceites de motor ofrecen una gran oportunidad de emprendimientos en el país; estos crearían nuevos puestos de trabajo y dinamizarían la economía en la pospandemia. Empresas como la firma Atica en Cartagena surgen como recolectoras de los ALU en grandes cantidades (a partir de 55 galones), para re-refinarlo y utilizarlo como combustible en calderas, hornos y en la industria cementera (Atica, 2021). En el corto plazo la aplicación que más podría implementarse como modelo de economía circular corresponde a su refinación como combustible alternativo al diésel, al fueloil, al crudo de Castilla, entre otros, donde efectivamente se aprovecha un residuo que genera bastantes problemas de contaminación por su inadecuada o inexistente disposición. En la figura 2 se muestra cuál sería el modelo de economía circular para los ALU, especialmente de motores de combustión.

El inicio del proceso se enfocaría principalmente en empresas del sector automotriz como talleres y centros de servicio, donde se hacen cambios de lubricante para un determinado número de vehículos. Estas empresas pueden reunir cantidades significativas, ya que además de sus clientes podrían oficiar como puntos de acopio, incentivando a otros a traer sus aceites usados. En el siguiente eslabón de esta cadena, microempresarios o independientes podrían dedicarse a la recolección de estos aceites en vehículos tipo cisterna o inclusive que puedan transportar varios contenedores. Estos se encargarían de transportarlos hasta las plantas de re-refinación, donde se les hace el tratamiento de purificación.

Las plantas de re-refinado son el eslabón más importante de esta cadena productiva, y requiere inversiones en equipos y tecnología para entregar un aceite lo suficientemente purificado para los clientes finales. De nuevo, pequeños transportadores se encargarían de distribuir este aceite re-refinado

**Figura 2***Economía circular alrededor de los aceites usados de motor*

*Nota.* La gráfica muestra la dinámica de los potenciales negocios que se generan alrededor de la recolección, refinación y aplicaciones de los ALU.

a las empresas interesadas en reducir costos por consumo de combustibles convencionales. En general son empresas que cuentan con hornos y calderas, pero en especial la industria cementera es la que más demanda el combustible alternativo.

Con este esquema se está minimizando la demanda de productos de la refinación del petróleo, ya que se está reutilizando o prolongando la vida útil de uno de ellos como es el ALU. Sin embargo, de todo este análisis de la cadena de transformación del ALU en combustible queda un reto adicional relacionado con garantizar que las emisiones de su combustión sean lo menos impactantes posible en cuanto a generación de gases de efecto invernadero y material particulado se refiere. En este aspecto les corresponde a las empresas implementar medidas de eficiencia energética que permitan hacer más limpios sus procesos de combustión en hornos, calderas y demás equipos térmicos.

La aplicación como aceite base a partir de la re-refinación del ALU supone desafíos en Colombia. Las empresas fabricantes deben realizar estudios más detallados sobre su desempeño como alternativa a los aceites tradicionales derivados del petróleo, ya que se corre el riesgo de dañar los componentes de los motores si no se cumple con los requisitos exigidos. Ante esta exigencia, se puede afirmar que no es un campo del interés en el corto plazo de las empresas que fabrican los lubricantes, ya que muchas de estas pertenecen o están vinculadas a las grandes multinacionales del petróleo, y no verían ninguna oportunidad de negocio para desarrollar este producto. Si la iniciativa partiera de un emprendimiento o un empresario, tendría que invertir bastante en investigación y desarrollo para poder entregar un producto confiable en un mercado acaparado por los grandes emporios del petróleo y sus compañías filiales. Resultaría difícil equilibrar la inversión en tecnología e infraestructura requerida para fabricar este producto y hacerlo competitivo en el mercado.

Por otro lado, la otra problemática que Muñoz *et ál.* (2019) describen es la falta de control en la falsificación de aceites de marcas registradas por medio de aceites usados, filtrados y envasados de forma inescrupulosa para venderlos como originales. Esta actividad delictiva debe controlarse con la destrucción de los recipientes y con la trazabilidad a todo el producto que es elaborado o importado para comercializarse en el país.

## **PANORAMA INTERNACIONAL PARA LA VALORIZACIÓN DE ALU**

Además de las aplicaciones mencionadas y que tienen buenas perspectivas de implementación en Colombia, a escala mundial desde la academia se han desarrollado investigaciones conducentes a caracterizar y evaluar el desempeño de estos aceites empleados como insumo en diversas aplicaciones.

Kamoto *et ál.* (2021) desarrollaron un estudio experimental en el que evaluaron la obtención de bitumen o betún modificado por medio de ALU, alquitrán de hulla y llantas desechadas. El método más común para su fabricación es la destilación fraccionada del residuo atmosférico de la destilación en vacío donde se emplean destilados cerosos. Este estudio propuso el reemplazo de estos últimos con el uso de materiales reciclados como el alquitrán de hulla, llantas desechadas y ALU. La incorporación de estos elementos

permitió obtener un bitumen con mejor resistencia a la deformación permanente, pero menor resistencia a la fatiga. Se obtuvo una mejor resistencia al cambio de temperatura, lo cual se requiere en los asfaltos que se aplican en climas cálidos. Adicionalmente, la mezcla resultó ser menos volátil, lo que reduce el riesgo de incendio.

Maceiras *et ál.* (2016) estudiaron la obtención de diésel a partir de ALU. Desarrollaron un proceso de tratamiento de destilación pirolítica junto con la adición de hidróxido de sodio y carbonato de sodio. Realizaron un determinado número de destilaciones, con lo cual obtuvieron los mejores resultados con dos de ellas consecutivas y 2 % de carbonato de sodio.

Qurasi y Swami (2018) analizaron el comportamiento de las propiedades viscoelásticas de mezclas de asfalto recicladas a las que se les agregaron ALU. Dentro de los resultados observaron que la adición de aceite ocasionó una reducción en el módulo dinámico complejo a todas las frecuencias de carga a que fueron sometidas. Por lo demás, se encontró que con la mezcla se obtenía un módulo de relajación más bajo al incrementarse la adición de ALU entre el 2 y el 4 %, actuando este como un rejuvenecedor al proveer mayor flexibilidad y elasticidad.

Santhoshkumar y Ramanathan (2020) analizaron la reutilización del ALU mediante el proceso de pirólisis y su uso en un motor diésel. El proceso de pirólisis aplicado al aceite recolectado se realizó a una temperatura de 350 °C, la cual mostró mejor rendimiento comparado con otra de tipo eléctrico —un ahorro del 56 % en la energía requerida—. El prospecto de diésel obtenido se seleccionó para realizar pruebas de desempeño en un motor diésel. Sus propiedades como valor calorífico, contenido de cenizas, punto de flama, entre otras, fueron muy próximas a las del diésel del petróleo. Sin embargo, este combustible obtenido de pirólisis presentó una alta viscosidad, lo que puede derivar en una pobre combustión. Para contrarrestar esta viscosidad se incrementaron las presiones de inyección a diferentes valores, siendo la óptima la de 280 bares. Como resultado importante de este estudio se destaca la mejora en la eficiencia térmica en 4 % en comparación con el diésel convencional. Además de esto, encontraron que las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos inquemados, NO<sub>x</sub> y emisiones de humos se redujeron en 0,6; 37,74; 17,4 y 43,69 %, respectivamente.

## Conclusiones

Los residuos que se pueden generar en las grandes urbes representan una oportunidad para transformar la base material de la economía de un sistema de producción lineal a un que minimiza la extracción y se basa en un enfoque de economía circular, lo que convierte los materiales residuales en materias primas de alto valor. Los ALU forman parte de la diversa gama de residuos generados en ciudades que pueden integrarse en el concepto de *economía circular*, con el objetivo de construir ciudades “circulares” más sostenibles que permitan el crecimiento económico y al mismo tiempo se contribuya a los desafíos ambientales y sociales en el nuevo milenio. En este capítulo se realizó una revisión y análisis de las diferentes vías de valorización de los ALU, cuya implementación depende principalmente de las características fisicoquímicas y el potencial de contaminación que se pueda presentar. La valorización de los ALU no solo permite evitar el vertido de este residuo en las redes de alcantarillado, suelos o fuentes hídricas, sino que al mismo tiempo se generan oportunidades de negocios y puestos de trabajo en las diferentes etapas de la cadena productiva, con lo que se dinamiza la economía del país.

En el ámbito internacional se está desarrollando cada vez más investigación sobre el uso del ALU como material aglomerante de las mezclas asfálticas para carreteras. Si bien se han obtenido mejoras en algunas propiedades, aún queda un gran camino por recorrer en la implementación en proyectos viales de gran importancia usando estos aceites como compuestos de las mezclas. En el contexto colombiano, un buen escenario para evaluar la calidad de los asfaltos con ALU como material complementario sería emplearlos en aplicaciones cuyas exigencias de calidad no son tan determinantes como en la construcción de carreteras con bajas cargas, parques, ciclorrutas y canchas deportivas. Se puede afirmar que la industria cementera nacional ofrece un buen panorama para la utilización del ALU debido a las perspectivas de crecimiento del sector de la construcción y los proyectos de infraestructura que se van a desarrollar en los próximos años en el país.

El ALU es un óptimo combustible para la industria manufacturera al emplearse en equipos como hornos y calderas. Sin embargo, trae consigo la generación de emisiones de gases de efecto invernadero y de elementos tóxicos asociados a la composición contaminante de los ALU que deben ser controlados por parte de las empresas en sus procesos de combustión. Una propuesta viable económica, ambiental y técnicamente factible para adecuar los ALU para su posible re-refinación y uso energético son los pretratamientos fisicoquímicos y biológicos de forma complementaria. Este tipo de procesos permite una reducción importante de metales pesados en la composición de ALU que viabilizan la re-refinación y su uso como combustible, de acuerdo con los resultados obtenidos en el proyecto realizado por la Fundación Universidad de América y el CTT-SENA. Dichas aplicaciones pueden mejorar el panorama actual de la producción de lubricantes con la re-refinación de ALU en Colombia. Este tipo de aplicaciones es coherente con los propósitos de la química verde (capítulo 4), específicamente en la búsqueda de minimizar residuos peligrosos que puedan tener un impacto negativo en el medio ambiente y en la salud humana.

La valorización de los ALU a través del proceso de pirólisis para la producción de diésel puede ser una aplicación con proyección de escalamiento industrial en grandes ciudades. Sin embargo, aún queda el reto de obtener un combustible diésel limpio, que no tenga una viscosidad muy alta, ya que este se espesaría en climas fríos, lo que afecta los sistemas de inyección de los motores.

## Referencias

- Agencia Nacional de Infraestructura. (2021). *Aeropuertos*. <https://www.ani.gov.co/aeropuertos-0>
- Albuquerque, F., Maraqa, M., Chowdhury, R., Mauga, T. y Alzard, M. (2020). Greenhouse gas emissions associated with road transport projects: current status, benchmarking, and assessment tools. *Transportation Research Procedia*, 48, 2018-2030.
- Allwood, J., (2014). Chapter 30 - Squaring the circular economy: the role of recycling within a hierarchy of material management strategies. En E. Worrell y M. A. Reuter (Ed). *Handbook of recycling* (pp. 445-477). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00030-1>

- Asociación Colombiana de Petróleo y Gas. (2017a). *Informe estadístico petrolero*. <https://acp.com.co/web2017/es/publicaciones-e-informes/informe-estadistico-petrolero>
- Asociación Colombiana de Petróleo y Gas. (2017b). *Fondo de Aceites Usados - FAU*. <https://acp.com.co/web2017/es/lubricantes/374-fondo-de-aceites-usados-fau>
- Asociación Colombiana de Petróleo y Gas. (2018). *Panorama general del aceite lubricante usado*. <https://acp.com.co/web2017/en/informes-estadistico-de-taladros/informes/informes-del-fau/609-fau-informe-2018-w/file>
- Ashby, M. (2016). Chapter 14 – The vision: a circular materials economy. *Materials and Sustainable Development* (pp. 211-239). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100176-9.00014-1>
- Atica. (2021). *Atica, Ingenio que Transforma*. [http://lp.atica.co/?gclid=Cj0KCQiApY6BBhC-sARIsAOI\\_GjafPpHwclZaXMnw6C8I4-qW88TRQ5ya9rj\\_1TkverKK5sVknmRMfhQaAv\\_EEALw\\_wcB#0](http://lp.atica.co/?gclid=Cj0KCQiApY6BBhC-sARIsAOI_GjafPpHwclZaXMnw6C8I4-qW88TRQ5ya9rj_1TkverKK5sVknmRMfhQaAv_EEALw_wcB#0)
- Bhattacharya, M., Biswas, D., Sana, S. y Datta, S. (2015). Biodegradation of waste lubricants by a newly isolated *Ochrobactrum* sp. C1. *3 Biotech*, 5(5), 807-817. <https://doi.org/10.1007/s13205-015-0282-9>
- Camacol. (2021). *Cámara Colombiana de la Construcción*. <https://img.lalr.co/cms/2021/01/19085350/Coordenada-Urbana-2020-Encuentro-medios-de-comunicaci%C3%B3n.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021, 8 de febrero). *Estadísticas de cemento gris*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris>
- Eleyedath, A. y Swamy, A. (2020). 3 - Use of waste engine oil in materials containing asphaltic components. En F. Pacheco-Torgal y S. Amirkhanian (Eds.), *Eco-efficient pavement construction materials* (pp. 33-50). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818981-8.00003-5>
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). *Circulytics - measuring circularity*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/circulytics-measuring-circularity>
- Environmental Protection Agency. (1996). *Managing used oil, advice for small businesses*. <https://archive.epa.gov/wastes/conserva/materials/usedoil/web/pdf/usedoil.pdf>
- Garrigues. (2021). *Proyectos de infraestructura en Colombia*. [https://www.garrigues.com/es\\_ES/project-countries/colombia](https://www.garrigues.com/es_ES/project-countries/colombia)
- Geisendorf, S. y Pietrulla, F. (2017). The circular economy and circular economy concepts—a literature analysis and redefinitions. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 771-782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924>
- Goddin, J. (2020). Chapter 12 - The role of a circular economy for energy transition. En A. Bleicher y A. Pehlken (Eds.), *The material basis of energy transitions* (pp. 187-197). Academic Press.

- Kamoto, K., Govha, J., Danha, J., Mamvura, T. y Muzunda, E. (2021). Production of modified bitumen from used engine oil, coal tar and waste tyre for construction applications. *South African Journal of Chemical Engineering*, 33, 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.05.005>
- Ley 253 de 1996 (9 de enero), por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989. *Diario Oficial* 42.688.
- Li, X., Zhai, J., Li, H. y Gao, X. (2020). An integration recycling process for cascade utilization of waste engine oil by distillation and microwave-assisted pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 199, 106245. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106245>
- Maceiras, R., Alfonsín, V. y Morales, F. (2016). Recycling of waste engine oil for diesel production. *Wastes Management*, 60, 351-356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.009>
- Metro de Bogotá. (2021). *Concesión*. <https://www.metrodebogota.gov.co/concesion>
- Mínami, I. (2017). Molecular science of lubricant additives. *Applied Sciences*, 7(5), 445. <https://doi.org/10.3390/app7050445>
- Ministerio del Medio Ambiente y el Desarrollo Sostenible. (2014). *Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial*. <https://acp.com.co/web2017/es/informes-estadistico-de-taladros/manuales/276-manual-tecnico-para-el-manejo-de-aceites-usados/file>
- Misión Internacional de Sabios. (2020). *Colombia hacia las fronteras del conocimiento: síntesis de las propuestas*. Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- Muñoz Ciro, E., Montoya Escobar, D. y Muñoz Rivera, A. (2019). Planteamiento y solución de la problemática de los aceites usados de motor en Colombia. *Revista Ambiental Éolo*, 18(1), 87-108. <http://revistaeco.fconvida.org/index.php/colo/article/view/68/47>
- Núñez, M. (1997). Aceite usado generado por motores en la ciudad de Cali. Alternativas de uso. *Revista de Subproductos Industriales de Colombia*. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/motores.pdf>
- Patel, N. y Shadangi K. P., (2020). Characterization of waste engine oil (WEO) pyrolytic oil and diesel blended oil: Fuel properties and compositional analysis. *Materials Today: Proceedings*, 33(part. 8), 4933-4936. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.679>
- Pinheiro, C.T., Ascensao, V.R., Cardoso, C.M., Quina, M.J., Gando-Ferreira, L.M., (2017). An overview of waste lubricant oil management system: physicochemical characterization contribution for its improvement. *Journal of Cleaner Production*, 150, 301-308.

- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2012). *Compendium of recycling and destruction technologies for waste oils*. UNEP Compilation.
- Qurasi, I. A. y Swami, A. K. (2018). Viscoelastic properties of recycled asphalt binder containing waste engine oil. *Journal of Cleaner Production*, 182, 992-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.237>
- Resolución 1446 de 2005 (5 de octubre), por la cual se modifica parcialmente la Resolución 415 del 13 de marzo de 1998, que establece los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma. *Diario Oficial* 46.056.
- Santhoshkumar, A. y Ramanathan, A. (2020). Recycling of waste engine oil through pyrolysis process for the production of diesel like fuel and its uses in diesel engine. *Energy*, 197, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117240>
- Tormos, B. (2005). *Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis de aceite usado*. Reverté.
- Yadav, S. y Saravanan, C.G., (2015). Engine characterization study of hydrocarbon fuel derived through recycling of waste transformer oil. *Journal of the Energy Institute*, 88(4), 386-397. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.10.006>