

Gilsonite: An organic mineral with special physical-chemical properties, current uses and future prospects applications

INGENIERÍA DE MATERIALES

Gilsonita: Un mineral orgánico con propiedades físico-químicas especiales, usos actuales y perspectivas de futuras aplicaciones

Henry Lozano-Pereira^{1§} , Natalia Afanasjeva¹ 

¹Universidad del Valle, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Programa de Química,
Grupo de investigación en ciencias con Aplicaciones Tecnológicas (GI-CAT), Cali, Colombia

^{1§}henry.lozano@correounivalle.edu.co , ¹natalia.afanasjeva@correounivalle.edu.co

Lozano H, Afanasjeva N. Gilsonita un Un mineral orgánico con propiedades físico-químicas especiales, usos actuales y perspectivas de futuras aplicaciones. Ingeniería y Competitividad, 2023, 25(1); e-30312302 <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i1.12302>

Recibido: 14 de julio de 2022 – **Aceptado:** 21 de septiembre de 2022

Abstract

Due to its chemical composition, gilsonite of natural origin containing four fractions, with a high amount of the element carbon (>84%) and a minimum sulphur content (<<0.3%) with other properties similar to those of hydrocarbons (saturated, asphaltenes, resins and aromatics compounds) is characterized by its many applications such as: energy, road paving, inks and paints, oil well drilling, gilsocarbon for nuclear reactors, additive for tire rubber, in petroleum emulsions, metal smelting, in filters for cyanide ion and toluene retention, etc. And also promising applications for the future, which are analyzed in this article. It has been found that gilsonite has the right amount of carbon element in its structure to be graphitised and subsequently converted into graphene, which opens up the possibilities for application in novel materials based on graphene oxide and photovoltaic cells. Asphaltenes extracted from petroleum are very similar to the structure and composition of asphaltenes extracted from gilsonite, which makes the latter a more economical alternative for developing similar applications (graphene coating, making flexible screens, etc.). In Colombia, there is exploration and exploitation of gilsonite mines, but its use is very limited as an asphalt binding agent to improve the mechanical efficiency of pavements. Due to its structure, gilsonite can also be used to remove cyanide ions in the decontamination of rivers and aquifers affected by mining.

Keywords: Gilsonite, asphaltenes, graphene, glycol carbon, lithium batteries, inks and paints, cyanide ion and toluene filters, rubber and tires, supercapacitors, petroleum emulsions, carbon fibers.

Resumen

Debido a su composición química, la gilsonita de origen natural que contiene cuatro fracciones, con una elevada cantidad del elemento carbono (>84%) y un mínimo contenido de azufre (<<0,3%) con otras propiedades semejantes a las de los hidrocarburos (compuestos saturados, asfaltenos, resinas y aromáticos) se caracteriza por sus múltiples aplicaciones como: energéticos, en pavimentación de carreteras, en tintas y pinturas, en perforación de pozos petroleros, el gilsocarbón para reactores nucleares, aditivo para caucho de neumáticos, en emulsiones de petróleo, fundición de metales, en filtros para retención de ión cianuro y tolueno, entre otras y también aplicaciones prometedoras para el futuro, sobre las cuáles se hace el análisis en este artículo. Se ha encontrado que la gilsonita tiene en su estructura la cantidad de elemento carbono adecuada para grafitizarse y posteriormente convertirse en grafeno, lo cual abre las posibilidades de aplicarse en materiales novedosos a partir de óxido de grafeno y celdas fotovoltaicas. Los asfaltenos extraídos del petróleo, guardan bastante similitud con respecto a la estructura y composición de los asfaltenos extraídos de la gilsonita, lo que hace a esta última una alternativa más económica para desarrollar aplicaciones similares (recubrimiento con grafeno, elaboración de pantallas flexibles, etc.). En Colombia hay actividad de exploración y explotación de minas de gilsonita, pero el uso es muy limitado como agente aglutinante de asfalto para mejorar la eficiencia mecánica de los pavimentos. Gracias a su estructura, la gilsonita también puede emplearse en la remoción de ión cianuro en la descontaminación de los ríos y acuíferos afectados por la minería.

Palabras clave: *Gilsonita, asfaltenos, grafeno, gilsocarbón, baterías de litio, tintas y pinturas, filtros para ión cianuro y tolueno, cauchos y neumáticos, supercondensadores, emulsiones de petróleo, fibras de carbono.*

1. Introducción

La gilsonita o asfaltita es un hidrocarburo de origen natural fósil sólido no renovable que pertenece al grupo de los asfaltos bituminosos. Se considera que los yacimientos de gilsonita se formaron a partir de petróleo y materia orgánica (querógeno) gracias a la dinámica de la corteza terrestre por medio de complejos procesos geológicos y biológicos a través de miles de años en que grandes extensiones de tierra fueron sobrepresurizadas a un nivel muy profundo del suelo por medio del agua subterránea dando como resultado un aplastamiento del material poroso de la corteza terrestre causando fracturas. La asfaltita viscosa formada a partir del querógeno de las profundidades, saturó las formaciones generando las fracturas y ensanchándolas creando depósitos que, al solidificarse, ocasionaron la aparición de las vetas de gilsonita (1). La asfaltita usualmente se encuentra en el subsuelo en forma de vetas de entre 50-150 cm de ancho y entre 6-25 m de profundidad. En 1888 S.H. Gilson fundó una

compañía que se dedicaba por primera vez a la extracción de la gilsonita y se utilizaba principalmente como impermeabilizante de tejados y como combustible para fundición (1, 2). La gilsonita común tiene un aspecto (3) negro mate en áreas desgastadas y un aspecto negro brillante en superficies pulidas, las fracturas varían en forma de concha a columnares escamosas, la textura astillada que forma los ángulos rectos hacia las paredes y puede penetrar hasta 15 cm dentro del mineral (1). La extracción de gilsonita se realiza generalmente por medios físicos (11). Actualmente se utilizan industrialmente martillos neumáticos y retroexcavadoras debido al poco espacio donde se encuentran las vetas superficiales de gilsonita colombiano a una profundidad de 4,5m-15m (12). Con el uso de técnicas de sondeo por resistividad eléctrica y el uso de arreglo de multi-electrodos tipo gradiente en el departamento de Santander, Colombia se logró determinar una propiedad eléctrica inusual y anomalías entre el hidrocarburo sólido (gilsonita) y la roca (12). El uso de métodos geofísicos en la

exploración del subsuelo ha incrementado las posibilidades económicas de prospección para nuevos minerales no metálicos como hidrocarburos sólidos.

2. Metodología

Se realizó la búsqueda por medio de cinco bases de datos con las palabras clave “gilsonite” y “asphaltite”, con la cual se obtuvieron 3165 resultados entre artículos y otras fuentes que en algunos casos coincidían entre ellos. La metodología empleada se presenta en la Figura

1, donde la primera etapa fue identificación, posteriormente la etapa de selección, la cual se centró en búsqueda de bibliografía usando la palabra clave de la gilsonita, propiedades y sus aplicaciones principales en un lapso de 5 los últimos años, en donde se tuvo en cuenta algunos artículos algo más antiguos que pusieran en contexto de la investigación químico-estructural de la gilsonita. Esto con el fin de preparar el análisis y la discusión de la utilización de la gilsonita como otra fuente de desarrollo que se pudiera obtener en Colombia y futuras aplicaciones.

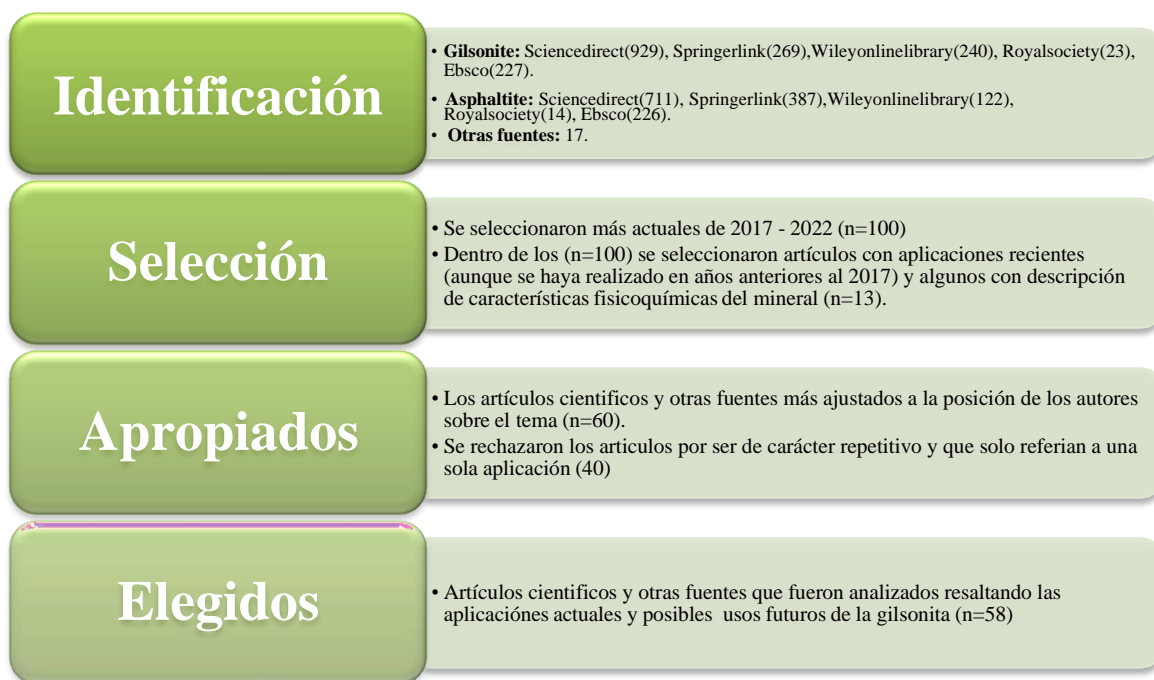


Figura 1. Metodología empleada para la selección bibliográfica y análisis en el artículo de revisión. Fuente: elaboración propia

3. Resultados

3.1 Clasificación de hidrocarburos bituminosos naturales

Los principales depósitos de gilsonita se encuentran en países como EE UU, Canadá, Colombia, Irán (tiene 15% de las reservas), Irak, Rusia, Venezuela, China, Australia, México, Suecia, Turquía, Trinidad y Tobago, Albania, Argentina y Filipinas (10,19). Para 2020 en el

mundo se exportaron ~298 Mln ton de gilsonita, siendo EE UU y Canadá los países de mayor exportación de este mineral (39.9% y 13.6%).

Las fuentes de asfalto natural donde se puede encontrar la gilsonita en Colombia (Figura 2), están distribuidas entre las 23 grandes cuencas sedimentarias del país que equivalen al 40% del territorio nacional (14). Los principales depósitos de gilsonita se encuentran identificados en los departamentos de Boyacá,

Caquetá, Caldas, Cesar, Cundinamarca, Tolima y Santander. Colombia para el año 2020 ha realizado exportaciones por 26.5 Millones ton de gilsonita, en la que se destaca que fue la tercera nación a nivel mundial en exportación de gilsonita con una participación en el mercado de 8.9%. El esquema general del origen geológico y la clasificación de los posibles tipos de hidrocarburos bituminosos naturales existentes se muestra en la Figura 2 y Figura 3, dónde la gilsonita representa un mineral mixto orgánico que proviene de la familia de los bitúmenes naturales foráneos, específicamente de la asphaltita y es considerado como material de varios tipos según el intervalo promedio de punto de fusión que está desde 149°C hasta 270°C (1).



Figura 2. Distribución de las cuencas sedimentarias de Colombia y minas con asphaltitas (círculos negros corresponden a las minas autorizadas de asfalto natural). Fuente: adaptado de Villamil (14) y Barrero(15)

3.2 Caracterización físico-química de la gilsonita

En la Tabla 1 se presenta la composición química de diferentes tipos de bitúmenes como son el asfalto del lago Trinidad, el alquitrán de petróleo el limo bituminoso (4) incluyendo la gilsonita.

Entre un asfalto natural del lago de Trinidad (ATT) conocido y la gilsonita, la principal diferencia en su composición química se refleja en el contenido de elemento carbono (50.38%C y 84.36%C respectivamente). El contenido de compuestos nitrogenados es en 7.6 veces mayor en la gilsonita que en el alquitrán del petróleo. Uno de las características más buscadas para los combustibles y además para resaltar en la calidad de la gilsonita es que tiene un contenido más de veinte veces menor de S que el alquitrán de petróleo (4). La separación de la gilsonita en la columna cromatográfica con solventes aplicando el análisis SARA mostró 1.6%, del contenido de hidrocarburos saturados y una cantidad muy despreciable de hidrocarburos aromáticos (cerca de 0%), 18.7% resinas y 79.7% de asfaltenos (4). Esta misma metodología fue utilizada por Quan (5) (estándar SH/T 0509-92) que es equivalente a ASTM D2007-93 y que se emplea para determinar la composición química de los crudos (6).

Tabla 1. Comparación de la composición química de algunos bitúmenes naturales.

Cantidad %	Gilsonita	Asfalto natural de Trinidad y Tobago	Alquitrán de petróleo	Limo bituminoso (esquistos)
Análisis elemental:				
C	84.36	50.38	84.44	80.5
H	10.05	6.06	9.19	10.3
N	3.25	0.72	0.43	2.4
S	0.27	4.14	5.69	1.0
O	1.36	4.71	3.24	5.8
Materia orgánica	99.32	66.01	100.00	100.00
Materia inorgánica	0.68	33.99	0.00	0.00

Fuente: Adaptado de Kim (4).

El ASTM D 6560-17 actualmente es el método estándar usado en la determinación de contenido

de fracción de asfaltenos insolubles en n-heptano en gilsonita (5). En la tabla 2 se muestra la comparación de las principales características físico-químicas de dos tipos de gilsonita (Malasia y Colombia) (3,52). Para la certificación internacional de la gilsonita colombiana falta todavía el estudio y la caracterización completa de todas las

propiedades físico-químicas para este tipo de materiales.

Las moléculas de los asfaltenos son los principales y mayoritarios compuestos de la gilsonita. Estructuralmente, los asfaltenos están compuestos de láminas de anillos aromáticos condensados que se interconectan por medio de

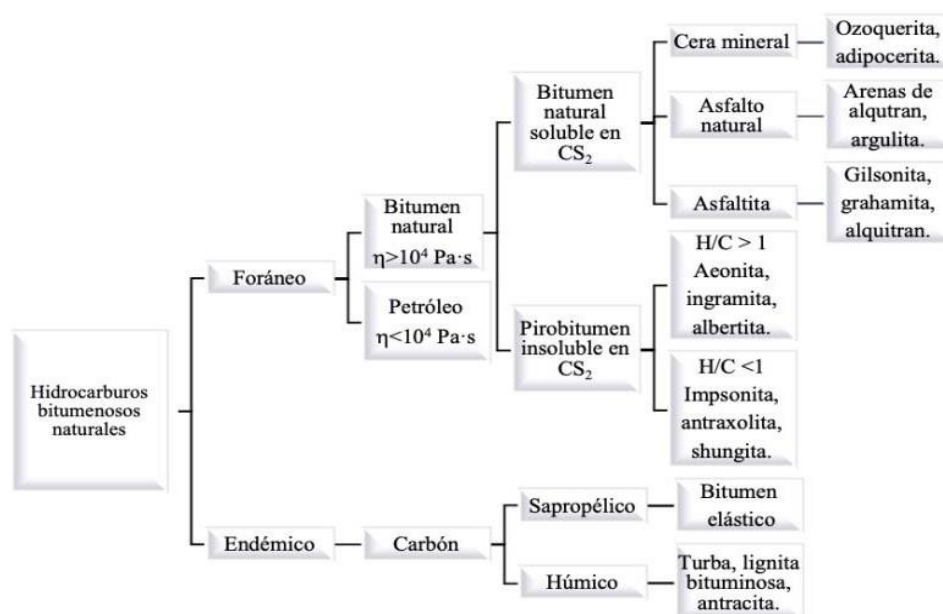


Figura 3. Clasificación de hidrocarburos naturales y origen geológico de la gilsonita. Fuente: Adaptado de Barrero (15).

Tabla 2. Características físico-químicas de la gilsonita de Malasia y de Colombia.

Características	Malasia	Colombia
Color en masa	Negro	Negro
Color en polvo	Marrón- Marrón oscuro	Pardo
Punto de ablandamiento, anillo y bola (ASTM E28-92), K	402.5 – 588.8	448 – 463
Contenido de humedad (método AGC), %	0.5 – 3.5	<0.5
Contenido de cenizas (ASTM D271 70M), %	0.5 – 12	<1.5
Gravedad específica @ 298 K, g/cm ³	1.04 – 1.06	1.04 – 1.10
Dureza (escala de Mohs)	2	2
Penetración, (mm ⁻¹)	0 – 2	0
Volatilidad, (%p/p)		
5 horas @ 436.0 K	<2	-
5 horas @ 477.6 K	<4	-
5 horas @ 533.2 K	<5	-
Punto de inflamación (copa de Cleveland), K	505.3 – 588.8	-
Índice de acidez (ASTM D664)	2.3	-
Índice de saponificación (ASTM D94)	5.6	-
Número de yodo (ASTM D4607-14)	0	-
Calor de combustión (ASTM D240), kJ/kg	41635.4	-
Calor de fusión, kJ/kg	23236.7	-
Calor específico de fase sólida, kJ/kg/K	2.2	-

Calor específico de fase líquida, kJ/kg/K	2.6	-
Temperatura de transición vítrea, K	358.15 – 394.3	-
Densidad aparente, kg/m ³	640.74	-
Resistividad eléctrica, Ω-m	4.0x10 ¹⁰	-
Viscosidad (Brookfield), Pa·s		
A 463.7 K	55	-
A 477.6 K	23	-
A 491.5 K	7	-
A 505.4 K	3	-

Fuente: Adaptado de Barrera (3) y Chemical Mine World LTD (52).

anillos nafténicos o cadenas alifáticas, sin embargo, en otras muestras de gilsonita se han encontrado las estructuras (Figura 4) con solo cuatro anillos fusionados (8). Los asfaltenos tienen estructura compleja y dimensionalmente son compuestos de alto peso molecular (7), con algunas ramificaciones y con espacios moleculares que representan unos centros defectuosos en los sistemas aromáticos, y algunos estos sistemas tienen estructuras de porfirinas coordinadas con átomos como el vanadio (V), el níquel (Ni), otros.

Cuando la gilsonita es extraída y tratada con agua supercrítica, la estructura de la gilsonita cambia debido a que el agua supercrítica tiene un efecto tal que los enlaces carbono-carbono alquílicos de las diferentes láminas de anillos nafténicos fusionados se escinden, generando moléculas de asfaltenos y resinas de bajo peso molecular comparado con la misma gilsonita extraída sin este tratamiento.

Las resinas de gilsonita que al tratarse con agua supercrítica pasan a tener las estructuras de resinas más compactas y con una disminución de masas moleculares entre 54 y 57%, y el fenómeno que ocurre aquí es similar al que sucede con una disminución entre 19 y 33% de peso molecular de asfaltenos al tratarse con agua supercrítica, que viene acompañado con un aumento de la cantidad de anillos fusionados que se pueden encontrar tanto en resinas como en asfaltenos. Algunas moléculas de resinas con siete anillos en su estructura pasan a tener solo

cinco anillos y los “clusters” de asfaltenos disminuyen de 14 anillos fusionados a solo 3, luego del tratamiento con agua supercrítica y muestran en su estructura molecular entre 2 y 10 anillos fusionados (13).

Los asfaltenos de la gilsonita se han investigado varios autores y se han encontrado estructuras más grandes en unos que en otros y se han logrado clasificar cinco tipos de moléculas de porfirinas que fueron llamadas *series pseudo-homólogas de petroporfirinas*. Se hizo un ordenamiento por estructura y de manera cualitativa se calculó el número de carbonos de cada porfirina según su índice de retención de Kovats (9). Sin embargo, se considera que a pesar que hay estudios estructurales realizados a los asfaltenos de gilsonita, su estructura molecular aún no se encuentra completamente establecida. Se ha conocido que la termólisis de las moléculas de los asfaltenos produce las moléculas fragmentadas de los hidrocarburos tipo “huella digital” natural como los esteranos, terpanos, pristanos, entre otros. Por lo tanto, la detección y cuantificación de esos tipos de hidrocarburos puede llevar a estudiar los biomarcadores de gilsonita similar a los biomarcadores de petróleo con el fin de establecer su génesis individual y localizar un espacio geográfico de origen de cada gilsonita (10).

Al agrupar cada tipo de gilsonita mediante el estudio de biomarcadores de las moléculas de asfaltenos, se da la posibilidad de crear una

librería química que permitiría una clasificación por aplicación según su lugar de origen y además acercarse a buscar las aplicaciones más promisorias de la gilsonita.

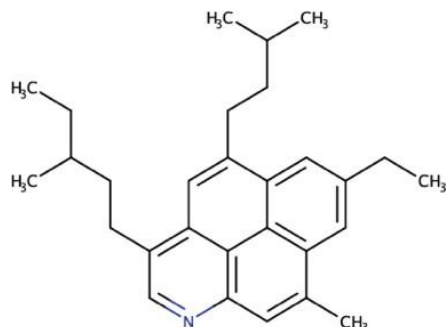


Figura 4. Estructura química de los asfaltenos de la gilsonita. Fuente: Herring et al. (8).

Se encontró que la gilsonita en China, por ejemplo, se caracteriza por contener heteroátomos en cantidad apreciable; el mineral tiene una relación energética de 1.14 H/C, lo que demuestra que el grado de la condensación molecular es alto y además se caracteriza por poseer anillos de porfirinas que tienen un contenido de vanadio (V) en cantidad alta (3888 $\mu\text{g/g}$). Esta asphaltita contiene en promedio 81.5% de fracción de asfaltenos y el contenido de átomos de V está alrededor del 95.5% de todas las muestras que fueron analizadas (5).

Aydin et al (20) lograron cuantificar en la gilsonita hasta 3808 ± 9 mg/kg de contenido de níquel (Ni), mientras que el contenido de selenio (Se) fue 31.90 ± 0.8 mg/kg, son metales de interés estratégico.

Afanasjeva y colaboradores (51) determinaron el contenido de V en los asfaltenos del crudo pesado colombiano de Castilla cual es alrededor de 4.41×10^{-4} Kg/L de V y 5.86×10^{-5} Kg/L de Ni y lograron la electrodeposición en una celda electroquímica de algunos metales presentes. Estos resultados muestran la importancia de la gilsonita para su posible extracción y aplicación por electrodeposición de metales como el Ni que

se usa como aditivo en aleaciones de acero inoxidable para elevar su resistencia a la corrosión a altas temperaturas. Aleaciones de Ni con Cu han sido utilizadas en las plantas de desalinización del agua de mar, también como materiales de blindaje y como catalizador en la hidrogenación de aceites vegetales, entre otros usos (20), mientras que el Se es ampliamente utilizado en materiales para convertir la energía lumínica en energía fotovoltaica (20).

3.3 Principales aplicaciones de la gilsonita

Un análisis de las principales aplicaciones de la gilsonita se detalló por los autores en la Figura 5. Para el uso de asphaltitas como aditivo de arenas de fundición de metales, la cantidad de ceniza debe ser menor al 4% y la humedad menor al 2%, mientras que el mismo parámetro para la aplicación en tintas, el contenido de las cenizas debe estar por debajo del 3% y la humedad del gilsonita por debajo del 1.5%.

3.3.1 Gilsonita como aditivo para pavimentación de carreteras

La aplicación más usada a nivel mundial es el uso como asphaltita en mezclas asfálticas. En Colombia en el año 1998 se realizó la aplicación de las asphaltitas como un componente de la mezcla con el crudo pesado de Castilla para elaborar un material más resistente para pavimentos, sin embargo la cohesión de las mezclas obtenidas fue inferior a la esperada. En el departamento del Valle de Cauca se reporta en el Plan de Desarrollo que solo 27,8% de vías se encuentran en buen estado, 49,8% en estado regular, y 19% en mal estado y 3,4 % en pésimo estado (53). Adicionalmente, los más de 142.000 km de vías terciarias en Colombia el 95% se encuentran en mal estado (60).

Actualmente el principal uso a nivel industrial que se le da en Colombia a la gilsonita es como un ligante del asfalto (14) en el mantenimiento y construcción de vías y para la obtención de

materiales con propiedades mejoradas como aditivo para pavimentos y materiales impermeabilizantes (17). Aunque se han realizado varios estudios de factibilidad económica de la extracción de gilsonita en Colombia, el uso real sigue siendo limitado. Algunos empresarios consideran que la asfaltita tiene un alto costo debido a la poca infraestructura y control de calidad por lo que la composición de la gilsonita no siempre es estable, por ejemplo, en algunas regiones la gilsonita puede tener un contenido de cenizas de 1.5%, mientras que en otra región puede llegar al 15% (16).

Un estudio (22) demostró que la adición del 15% de gilsonita en la mezcla asfáltica es el porcentaje adecuado para producir un asfalto modificado, concentración que evita la degradación rápida del pavimento y hace que su compactación sea homogénea, prolongando su vida útil (21). La gilsonita se agrega a la mezcla asfáltica para proveer propiedades adicionales que permitan aumentar la durabilidad y la resistencia de la capa asfáltica, resistencia a la deformación, además de ser un antioxidante natural del pavimento y aglutinante del asfalto, confiriéndole a la mezcla mejores propiedades de cohesión e impidiendo la formación de ahuellamientos en las carreteras y proporcionando buena resistencia a la intemperie, entre otras propiedades (22). La falla general y más frecuente que tiene el asfalto en pavimentos, es el desgaste por uso y el ahuellamiento longitudinal superficial con niveles altos de circulación. Los autores encontraron (22) que en las vías de bajo tráfico la utilización de gilsonita debe adaptarse con metodologías de aplicación para evitar el fenómeno de agrietamiento a bajas temperaturas por la baja compactación de estas. Al adicionar la gilsonita derretida en asfalto caliente, el aditivo confiere condiciones de dureza al asfalto evitando la penetración de las llantas a altas temperaturas del ambiente. Por esa razón y

actuando como aditivo a mezclas asfálticas en caliente, la gilsonita también se utiliza en vías de alto tráfico.

Es posible extraer de la gilsonita el concentrado de las fracciones de resinas policíclicas y sus asfaltenos, los cuales permiten darle al material de construcción una mejor estabilización en su estructura coloidal, lo que otorga al asfalto mejor comportamiento en la deformación por tensión y mejora el desempeño del concreto asfáltico (23). Sin embargo, se estableció que la adición de gilsonita a los ligantes asfálticos, aumenta también la rigidez y la viscosidad, haciendo que la temperatura a la cual se produce la mezcla sea más elevada con lo cual se elevan los costos por calentamiento y se producen mayores emisiones; por lo tanto se propuso una alternativa de utilizar un aditivo denominado Sasobit en un porcentaje menor que la gilsonita: 3% de Sasobit, 5% de gilsonita según Sobhi et al. (24), y este producto tiene como función disminuir la viscosidad y la temperatura del proceso de producción de los asfaltos modificados, y con la mezcla obtenida se observa un alto rendimiento al final. Al adicionar gilsonita al asfalto, se disminuye la susceptibilidad a la humedad por parte de la capa asfáltica lo que incide en una mejor durabilidad (24). La gilsonita aplicada como aditivo para los pavimentos modifica las características fisicoquímicas, mejorando las condiciones mecánicas y afectando favorablemente la resistencia al envejecimiento del asfalto modificado ocasionando un cambio físico en la distribución molecular que causa el envejecimiento (25). Ligantes bituminosos fueron mezclados con 18% de gilsonita (26) y un 5% de polímero estireno-butadieno-estireno (EBE), y el estudio mostró un aumento de la consistencia de los ligantes lo que afecta positivamente la susceptibilidad térmica del pavimento. (26)

Zhou et al (27) realizaron pruebas utilizando la gilsonita ATT como ligante asfáltico,

mezclándolo con material reciclado de una carretera (RAP) al 50% y al 100% con material asfáltico nuevo. En la mezcla al 50%, las características reológicas del material se mantenían iguales y sin cambios detectados comparados con el asfalto envejecido en carretera. Se notó mejoría en el material en cuanto a la resistencia del proceso de envejecimiento y las propiedades reológicas, cuando la cantidad de aditivo fue al 100% para la mezcla asfáltica (27).

Teniendo en cuenta los diferentes planes de desarrollo que se impulsan desde municipios, departamentos y el país, es imperativo considerar la gilsonita para la construcción de vías por su disponibilidad así como su capacidad de mejoramiento de las propiedades de los materiales usados en las mezclas asfálticas o en los tratamientos superficiales donde el bajo volumen vehicular no exige vías de altas especificaciones, que son la mayoría de las vías terciarias, contribuyendo a solucionar el más grave problema del campo colombiano cual es la conectividad para poder interconectar los territorios donde se cultivan los alimentos con los centros urbanos.

La solución a este problema tendría grandes impactos en la calidad de vida de los campesinos en aspectos sociales, económicos y de salud pública. Además el turismo se potencializa y se hace posible integrar grandes territorios a la institucionalidad. (53). En la actualidad es el campo de mayor potencial de utilización de la gilsonita en Colombia, sustituyendo parcialmente un derivado del petróleo como el asfalto que ha alcanzado precios elevados debido a la crisis actual de suministro de compuestos energéticos.

Ventajas:

- Les adiciona más durabilidad a los pavimentos lo que garantiza su utilización por más tiempo.

- Ayuda a la descarbonización de la economía al reemplazar parcialmente el asfalto de petróleo
- Impacto positivo en la productividad y competitividad del campo.
- La extracción del hidrocarburo sólido es sencilla, los yacimientos están a solo 4,5m de profundidad, no se requiere uso de solventes, ni del agua, ni procesos de refinación.

Desventaja:

- Es un recurso mineral no renovable, por lo cual su explotación, como cualquier otra actividad de minería requiere cuidados especiales en cuanto al entorno, manejo de tierras, recuperación de vegetación, disposición en general de residuos.

3.3.2 Gilsonita como aditivo para moldes de fundición de metales

La asfaltita al mezclarse con arena para moldes metalúrgicos confiere excelentes propiedades que permiten obtener una pieza fundida de mejor calidad, suavizando la textura de los moldes de hierro gris. El carbono de la gilsonita tiene poder reductor sobre el metal, lo que genera que el acabado de la pieza sea de muy buena calidad.

Además, la cantidad de los gases tóxicos liberados por autoignición durante el proceso es menor, por lo que se garantiza que no se aumenta el costo de la ventilación artificial en la fundición, y la etapa del desmolde ocurre casi de inmediato y con muy pocas imperfecciones en la pieza. La combinación de la mezcla de un 4% de gilsonita con cal hidratada y magnesio se utiliza frecuente para el proceso de la desulfuración del acero. Algunos autores recomiendan la adición de gilsonita en este proceso en cantidades entre el 2 y el 6% en comparación con otros aditivos como óxido de hierro y coque metalúrgico (28).

Tradicionalmente en Colombia la industria metalúrgica ha utilizado el carbón mineral más que la gilsonita como materia prima. Las altas temperaturas utilizadas en esta industria exigen un cuidado especial ya que la gilsonita también tiende a la autoignición.

Ventaja:

- El acabado de fundición resulta ser el mejor, no deja grietas y el producto terminado es más suave.

Desventaja:

- Se requiere una adecuación de la fragua que permita la retención de gases contaminantes.

3.3.3 Filtros de gilsonita para la retención de iones de cianuro y tolueno como aplicación ambiental.

Se determinó en los trabajos (19, 29), qué en la estructura de tipo “clúster” de las moléculas de los asfaltenos de la gilsonita se encuentran espacios entre las capas de agregado por lo que su estructura química es similar a una hoja de grafito sin embargo, debido a la presencia de grupos alquilo periféricos en los anillos aromáticos policondensados apilados u otros grupos de anillos policíclicos formados como las porfirinas, su disposición coloidal es esférica y puede ser aprovechada como filtro sólido para retener sustancias perjudiciales para la salud como es el caso de los compuestos con iones cianuro en plantas procesadoras de material de roca y sedimentos en la extracción de oro haciendo este proceso más amigable con el medio ambiente (19).

La gilsonita también se ha aplicado como agente adsorbente natural para retener el solvente tolueno luego de un tratamiento térmico a temperatura de 453.2 K y una presión de 6.67×10^2 Pa. Se demuestra que a un pH = 9.0 y una temperatura de 278.2 K en el filtro de

gilsonita se logra retener cerca de un 70% del tolueno presente en el agua industrial. Los diferentes grupos funcionales superficiales que hacen amorfa a la gilsonita tratada a alta temperatura y su adsorción se explicaría por medio de las interacciones π - π entre la gilsonita y el tolueno gracias a la hibridación sp^2 de los orbitales de los átomos de carbono de los cristales de grafito de gilsonita (30). Estas propiedades son de interés para su aplicación en Colombia en donde la minería ilegal y la minería artesanal impactan el ambiente por contaminación con cianuro de sodio y mercurio metálico además de solventes y metales pesados, lo cual constituye un problema que debe atacarse con urgencia. Una aplicación tecnológica que ayudaría a esquemas menos contaminantes es el de la utilización de materiales como la gilsonita para la filtración y retención de estos contaminantes. (54). Esta aplicación es novedosa y permitiría la limpieza de los cuerpos de agua, y la regeneración del medio ambiente por los daños causados durante décadas de explotación sin ningún control.

Ventajas:

- Recuperación “in situ” de ríos y manantiales afectados por la minería sin control.
- Purificación de aguas subterráneas afectadas por el derrame de los hidrocarburos.

Desventaja:

- Tratamientos térmicos en el proceso de fabricación de los filtros implica la formación y liberación de una cantidad de CO_2 .

3.3.4 Energía producida por combustión de gilsonita.

Procesar la gilsonita para producir energía implica un reto ambiental importante, a pesar

que la cantidad de cenizas que se puedan generar no es grande y la presencia de compuestos azufrados (menos de 0,3%) son menores que en el caso de uso de carbones, pero se requiere realizar una limpieza exhaustiva de la asfaltita natural para no cargar el mineral directamente a la caldera. Los átomos de los metales presentes en los complejos de las moléculas de las porfirinas de los asfaltenos pueden interferir en la combustión, por ello se recomienda utilizar previamente la técnica de la flotación, que consiste en pulverizar la gilsonita hasta un tamaño adecuado para disolverla posteriormente en un solvente. En la etapa siguiente a la mezcla se le adiciona agua y por medio de un sistema neumático, se burbujea aire a presión y se obtiene la gilsonita purificada (31). Pruebas realizadas mostraron que al purificar la gilsonita por esta vía, se aumentó su poder calórico en un 59% (32). La utilización de la gilsonita como materia prima energética es poco factible puesto que se trata de un material de origen fósil, no renovable, por lo cual su uso en procesos para sustituir a los derivados del petróleo no es muy promisorio. Extraer la gilsonita para utilizarla como combustible fósil no es ambientalmente amigable pues se combinan las dificultades asociadas a la extracción de minerales y además la emisión de gases efecto invernadero.

Ventajas:

- Desde el punto de vista de combustible sólido es un material disponible que no requiere proceso de refinación, sin riesgo de explosión, con bajo contenido de cenizas y de mínimo contenido de azufre.

Desventajas:

- Su utilización como materia prima energética como cualquier proceso de combustión de un hidrocarburo produce

gases como el CO₂, NO₂ que son gases de invernadero.

3.3.5 Tintas y pinturas en la industria gráfica.

Otra aplicación importante de la gilsonita se encuentra en la industria gráfica, donde el mineral se pulveriza para usarlo como aditivo en las tintas (según la norma ASTM E-11 70) para tamaño de partícula adecuado ya que, al ser de naturaleza netamente orgánica, se disuelve en los solventes de la misma naturaleza. En la industria flexográfica, se usa la gilsonita para adicionar a las tintas para papel periódico, así como al tóner para impresoras láser. En la celulosa del papel, la tinta con adición de gilsonita se adhiere muy bien a la superficie por lo que su principal función es ser un agente de distribución del colorante negro de humo y su concentración puede variar hasta un 5% dependiendo de la velocidad de prensa de la impresora de papel (16, 33, 34). En algunas otras aplicaciones como la impresión “*offset*” que se usa para disminuir costos en resinas, se utiliza una formulación de hasta el 15% de gilsonita en la tinta sin ningún inconveniente. Las propiedades más sobresalientes del uso de gilsonita en tintas son impresiones de color negro más oscuro, con alta adherencia al papel y resistencia física de textura al roce.

En el caso del uso con las resinas del gilsonita en pinturas, se obtiene una mayor resistencia a los rayos UV por lo que es ampliamente utilizada para realizar recubrimientos en postes de madera enterrados a la intemperie. Este tipo de pinturas no solo son resistentes a la radiación electromagnética de alta energía, también al agua y a productos químicos. La gilsonita se ha aplicado para elaborar formulaciones de pintura para radiadores de autos, pintura en bastidores y recubrimientos en madera (33). La mayoría de las tintas oscuras, se fabrican a partir de la soya con el fin de evitar el daño ecológico (57), por lo que la factibilidad de producir tintas y pinturas a

partir de gilsonita no es muy clara en Colombia. Hay una tendencia a usar cada vez más derivados de aceites y plantas en la producción de tintes y pinturas. En cualquier caso la industria decidiría la rentabilidad y la conveniencia de usar la gilsonita en este sector industrial, considerando la importancia de usar materias primas propias así como materiales que tenemos disponibles y a los cuales se les puede dar un valor agregado con la transformación en productos terminados sin necesidad de importarlos.

Ventajas:

- Tintas y pinturas más económicas para aplicaciones industriales y domésticas.
- Excelentes acabados debido a la calidad del material por su naturaleza.

Desventaja:

- Riguroso tratamiento de los disolventes utilizados para su aplicación en superficies.

3.3.6 Sellantes de fluidos de perforación y cementación en pozos petroleros.

En la industria petrolera, la gilsonita tiene usos principalmente en la cementación de pozos de extracción de hidrocarburos. La función principal en este caso es estabilizar las capas de lutitas (limas) deformadas naturalmente o por la perforación, aislando el sitio de la perforación del agua subterránea, y, además, sellando los poros naturales del pozo para evitar la fuga de gases presentes en la exploración. Por tradición, se hace cementar el pozo que ya no es productivo. Los materiales con los que se realiza la cementación del pozo, como roca, tienden a ser costosos en tiempo de sellado. En este caso, el uso de la gilsonita funciona como buen reemplazo de una parte del cemento portland con más bajo costo y buen rendimiento.

La gilsonita usada últimamente en forma de nanopartículas muestra que no se requieren otras moléculas dispersantes en los lodos de perforación y permiten un acople exitoso. Las propiedades reológicas del lodo cambian al adicionarle las partículas finas de gilsonita mostrando una disminución en la generación de espuma, estabilizando el pH a temperaturas altas con lo que el desgaste de la broca perforadora se estabiliza y también se disminuye la pérdida de fluido, según la prueba API correspondiente y estandarizada mostrando mejor comportamiento en la perforación (35). A pesar de las tendencias actuales a descarbonizar la economía, estos fluidos de perforación y sus materiales se seguirán utilizando en lo que algunos denominan período de transición energética buscando reemplazar derivados fósiles por otros materiales y desarrollando tecnologías alternas para producir compuestos energéticos que sustituyan los derivados del gas y petróleo.

Ventajas:

- La mezcla de gilsonita en los lodos de perforación confiere un mejor sellado en las grietas naturales durante la perforación y se evitan pérdidas del respectivo lodo.
- Sellar las grietas del material natural también evita que lodos de perforación y el crudo del petróleo puedan filtrarse a los acuíferos subterráneos.

Desventajas:

- Es un material de origen fósil, no renovable, por lo que su explotación tiende a disminuir en utilidades industriales.
- El sellado de grietas y cementación no es proceso inmediato, no existe ninguna otra tecnología.

3.3.7 Gilsocarbón para reactores nucleares obtenido por grafitización.

La elaboración de grafito de gilsocarbón (gilsonita utilizada en electrodos de reactores nucleares) a partir de gilsonita, se desarrolló con el fin de determinar el método más productivo y su mecanización dentro de la estructura de un reactor nuclear para su enfriamiento. La conversión de gilsonita a grafito inicia con la formación de un bloque de carbón calentando el mineral previamente para eliminar los compuestos volátiles, después se tritura uniformemente, se mezcla con gilsocarbón pre-fabricado, se recubre en moldes con carbón metalúrgico para evitar la oxidación y finalmente se calienta a 800°C en un solo ciclo. Al no tener todavía todas las características del grafito, se impregna con fondos de vacío (asfalto) de refinería, y en la siguiente fase del proceso el material recubierto en el bloque se calienta hasta 2800-3000 °C. El producto se purifica realizando un calentamiento posterior a 2400 °C en atmósfera halógena, para prolongar su vida útil (36).

Se realizaron estudios (37) sobre la microestructura y la textura de la gilsonita, en función de predecir los cambios que puede sufrir el mineral bajo la influencia de radiación nuclear y para la elaboración de nuevos materiales tipo grafito. En el gilsocarbón se encontró que los dominios o cristales de grafito nuclearizado deben tener una microestructura con una orientación definida, y que a pesar que se presenta irregularidad en la orientación del dominio del relleno de coque grafitizado obtenido, las partículas obtenidas son estadísticamente esféricas mostrando su posible utilización en reactores nucleares como moduladores de flujo de neutrones (36).

La opción de energía nuclear no ha sido contemplada en Colombia. Sin embargo

considerando (56) que el país hace parte del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) el gobierno podría establecer una nueva normativa que haga posible explorar la posibilidad de desarrollar la generación de electricidad por medio de reactores nucleares como se hace ya en Argentina y Brasil (55). En ese contexto la producción de todo tipo de materiales relacionados con la operación de plantas nucleares se hace factible y la gilsonita sería materia prima para producir gilsocarbón (36).

Por ser un mercado emergente, aún no se podría definir ventajas y desventajas en el contexto nacional.

3.3.8 Aditivo de gilsonita para obtención del caucho reforzado.

Cuando se utiliza la gilsonita como aditivo en la fabricación de caucho, los resultados muestran que el mineral mencionado llena los poros en su estructura de red reticulada, por lo que se ve afectada la rigidez dieléctrica del mismo. En el momento de la vulcanización del caucho con adición de gilsonita el resultado es completamente diferente al proceso conocido de vulcanización del caucho sin aditivo.

Algunos autores (38) mostraron que este efecto se debe a la presencia de átomos de S y Zn propios en la estructura química de la gilsonita, lo que permite la incorporación de estos elementos a la mezcla del negro de humo, formando así un caucho reforzado, con los poros completamente sellados aumentando la elasticidad del material caucho sin romperse y confiriendo alta resistencia a la acción de la abrasión. El mercado del caucho en Colombia ha evolucionado con el fomento de nuevos cultivos, y la industria del caucho vulcanizado con aditivo de gilsonita es factible de desarrollarse.

Ventajas:

- Aumento de elasticidad del material permitiendo tolerancia a la presión gravitacional.
- Resistencia a la abrasión lo que permite mayor durabilidad a la intemperie y rugosidad del suelo.
- Valor agregado a un producto agrícola de un cultivo de aumento (latex o caucho natural).

Desventajas:

- Ausencia de capital de riesgo para el fomento de estas industrias.

3.3.9 Elaboración de emulsiones con gilsonita para la extracción de crudos pesados.

Extraer un crudo pesado es un proceso complejo, no solo por la alta viscosidad característica de estos crudos, sino también por las dificultades asociadas con los lodos que tienen un pH agresivo para la estructura del equipo de perforación, rocas de yacimientos extremadamente duras, y si se logra llegar al crudo, este se encuentra en estado muy denso, pesado y viscoso de tal manera que su extracción se vuelve un desafío.

Para disminuir la viscosidad del crudo, actualmente se fabrican emulsiones con base en derivados del petróleo, pero estas no son tan funcionales como las emulsiones con gilsonita adicionada. A pesar de que algunos alcanos de bajo peso molecular pueden precipitar los asfaltenos de la gilsonita, los efectos de la emulsión cuando se agrega gilsonita muestran que el tamaño de las gotas coloidales aumenta, que a su vez aumenta la estabilidad de la emulsión como consecuencia de la formación de películas interfaciales por los asfaltenos que las rodean (40).

Otro resultado positivo del uso de emulsiones es que, en el proceso de precipitación de la torta sólida de los asfaltenos, se forman agregados de las micelas de las moléculas de resinas que saturan las áreas interfaciales agregando mayor estabilidad de la emulsión por medio de una mayor área cubierta o impedimento estérico (39).

Un estudio sobre el rol de los asfaltenos de gilsonita en el proceso de precipitación de los agregados de alto peso molecular demostró que, al adicionar una cierta cantidad de tolueno al sistema, la estabilidad de la emulsión se mantiene porque el tolueno evita una precipitación drástica de los asfaltenos cuando se adiciona suficiente cantidad de agua a la emulsión. Los asfaltenos precipitados generan una especie de barrera entre la capa externa de las grandes gotas coloidales de ésta y la solución de la emulsión impidiendo que se vuelvan más pequeñas y generando más estabilidad ocupando las capas interfaciales. La precipitación de la fracción sólida de asfaltenos que se genera al agregar demasiada agua o fracciones livianas del petróleo en el pozo puede ser un factor limitante (40). Este caso es similar al ya reportado de su utilización como insumo para lodos de perforación en 1.3.6, en cuanto a ventajas y desventajas.

3.4 Perspectivas de futuras aplicaciones

3.4.1 Perspectivas de futuras aplicaciones.

La mayoría de las investigaciones realizadas sobre la estructura química de la gilsonita, así como el estudio sobre su microestructura y textura, abren nuevas posibilidades para que se pueda utilizar la gilsonita como un material de partida para la fabricación de nanotubos de carbono, estructuras tipo grafeno, tintas petroquímicas, aditivos y adsorbentes para retención de metales, fabricación de componentes de reactores nucleares, y en las baterías.

3.4.2 Material soporte en baterías de litio.

Resultados del potencial uso de la gilsonita como material de soporte en el ánodo de baterías de litio se publicaron en un estudio (41). Se utiliza el litio en baterías debido a su alta capacidad específica y potencial electroquímico bajo, sin embargo, la formación de dendrita de Li limita el tiempo de vida útil de la batería de los electrodomésticos que contienen estas baterías según sus ciclos de carga y descarga. Se utilizó la gilsonita sin modificar (41) en su estructura original por ser un material económico y versátil que hospedó el electrodo de Li de las baterías. La porosidad natural de la gilsonita permitió tener una deposición de Li en forma precisa para crear una especie de complejo gilsonita-Li, y el rendimiento de flujo de electricidad de 5A de batería aumentó a 40A mostrando una eficiencia coulombica mayor al 96%. A los electrodos se le agregaron algunas nanocintas de grafeno con el fin de mejorar la conductividad, mostrando que los ciclos de carga y descarga aumentaron a ser más de 500 y su tasa de carga pasó de 9,4 mA/h.cm² a 20 mA/h.cm², lo que demostró eficacia en la carga por ser diez veces más veloz que las baterías convencionales de Li (41).

Esta propuesta de aplicación es novedosa, permite darle más tiempo de vida a las baterías y es un aporte al proceso de la transición energética hacia la descarbonización pues permite que el tiempo de carga sea rápido, factor crítico en la utilización de baterías de litio para vehículos eléctricos en las grandes ciudades.

3.4.3 Conversión de gilsonita en grafeno, óxido de grafeno, grafito. Descontaminación de agua.

La gilsonita puede convertirse en grafito de forma eficiente utilizando el método descrito anteriormente en la conversión de gilsonita en gilsocarbón para reactores nucleares (36). Cuando se realizó un análisis de material de gilsografito elaborado por espectroscopía

Raman, se encontró que las señales químicas de absorción del gilsografito son similares a las del espectro Raman del grafeno mismo (36, 42), lo que abre una posibilidad sobre la conversión de gilsonita a este nuevo material tipo grafeno. Se sabe que el grafeno tiene múltiples aplicaciones en dispositivos fotovoltaicos, ya que sus láminas son excelentes conductoras de electricidad y son flexibles.

En la industria militar se ha estudiado el uso del grafeno como material de recubrimiento para reducir la detección de vehículos militares en los radares, gracias a que el grafeno absorbe la radiación microondas y evita la reflexión electromagnética hacia el radar emisor y así les impide ser detectados (43).

Una aplicación muy interesante para la gilsonita convertida en grafeno es la utilización de sus redes hexagonales moleculares para detectar el fármaco tipo tetraciclina que es un antibiótico y tiene características hepatotóxicas y que, debido a su utilización indiscriminada, se puede encontrar en el agua tratada y en los alimentos lavados con ella (44).

Con esta investigación se abrió una posibilidad para la otra utilización de la gilsonita convertida en grafito para la determinación de la presencia de moléculas contaminantes por métodos electroquímicos y su posterior eliminación con membranas. La gilsonita convertida a grafeno (G), también puede convertirse en óxido de grafeno (GO) y usarse en sus aplicaciones ya conocidas o en nuevas. La producción de grafeno sería un avance tecnológico para Colombia en la elaboración de materiales usados en tecnologías limpias. Sería un incentivo a la producción de baterías, de paneles solares y de materiales nuevos para reactores nucleares por ejemplo, contribuyendo al desarrollo tecnológico y a la innovación.

Ventajas:

- Una de las aplicaciones del grafeno incluye descontaminación de suelos.
- Desarrollo potencial de nuevos materiales
- Inicio de industrias de energías renovables tipo fotovoltaicas y baterías de litio.

Desventaja:

- Las tecnologías de producción del grafeno son demandantes de energía.

3.4.4 Fertilizante artificial sulfurado o nitrogenado a partir de gilsonita.

Para la obtención de fertilizantes sintéticos que son una necesidad actual, se usan las cenizas de gilsonita después de su combustión. Se determinó que la composición principal de las cenizas de asphaltita representan una mezcla heterogénea de óxidos básicos, anfóteros y algunos ácidos. Los experimentos de adsorción física y química realizados con estas cenizas, mostraron que el tamaño de poro obtenido es muy pequeño y con una baja área superficial, por lo que la adsorción física se vio poco favorecida frente a la adsorción química.

La adición posterior de reactivo amoníaco a las cenizas mostró los resultados con una capacidad de adsorción química mayor e irreversible. Por interacción con las cenizas de gilsonita, el óxido tipo SO_3 reacciona con agua para formar ácido H_2SO_4 y de esta manera se forma un fertilizante sintético y sulfurado inicialmente y con la adición del amoníaco se produce el sulfato de amonio $(NH_4)_2SO_4$ que es un fertilizante muy conocido y utilizado en la agroindustria (45).

Colombia tiene trazado un camino para los próximos 4 años (54) de alcanzar la soberanía

alimentaria por lo que este tema de producción de fertilizantes se torna muy importante pues hay un déficit que actualmente se importa. La fabricación nacional iría en beneficio de la seguridad alimentaria y de nuestra autosuficiencia en insumos para el campo.

Ventaja:

- Resuelve el déficit en producción de fertilizantes a partir de la urea que puede ser una prioridad para Colombia por la creciente necesidad agrícola de fertilizantes.

Desventaja:

- Se obtiene por tratamiento térmico a cenizas de la gilsonita, lo cual requiere proceso adicional para eliminar los posibles contaminantes ambientales y aumenta el costo.

3.4.5 Filtros porosos para captura de CO_2

Jalilov et al (46) desarrollaron una metodología para elaborar filtros a alta presión de carbono poroso que podrían utilizarse en las tuberías de gas natural para la remoción del CO_2 que se extrae en conjunto con el gas natural (principalmente CH_4). Normalmente las láminas obtenidas de asphaltita tratada, tienen un área superficial de $2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, que es un área eficiente para atrapar el CO_2 pero poco práctico en la vida real debido a su costo. Otros autores (46) obtuvieron un material sólido donde se logra aumentar el área superficial a $4200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ y que tiene un mejor rendimiento en la captura del CO_2 y a bajo costo (44).

El aumento de CO_2 como gas de efecto invernadero plantea varios retos tecnológicos para su remoción y captura, y es posible que este nuevo material de filtros a base de gilsonita

pueda ser usado en las chimeneas industriales, en los filtros de las cocinas domésticas, en los tubos de escape de automóviles, entre otros, y con ello ayudar a reducir la contaminación del CO₂ en la atmósfera. Estos filtros pueden utilizarse en automóviles, estufas de cocina industrial y residencial, y todo tipo de empresa o industria donde se genere CO₂ y CO, por lo que cobra importancia esta utilización de gilsonita. Esta aplicación fue realizada con el fin de disminuir la cantidad de CO₂ en la extracción de gas natural. No obstante, se puede aplicar a otros usos donde haya emisión de dióxido de carbono a la naturaleza y contribuir a la resolución de un problema mundial.

Ventajas:

- Amplia adaptación a todos los sistemas industriales, vehiculares y domésticos que emiten gases de efecto invernadero.

Desventaja:

- Su preparación implica producción en masa con ciclos tecnológicos que se deben evaluar con respecto a los efectos secundarios ambientales.

3.4.6 Aditivo con escoria resultante del refinamiento de acero en la aplicación de la capa de sub-base en las vías ferroviarias y en carreteras.

Teniendo en cuenta la cantidad de escoria o impurezas que resultan durante la refinación del acero (47), se propone usar la escoria como material de relleno para la capa de sub - base en la construcción de vías. La escoria al 100% es un material quebradizo y por ello se le adiciona gilsonita en un 2% para cohesionar el material y con ello la capacidad de soportar cargas.

El resultado mostró una mejoría del 65% por encima de la capacidad mínima aprobada como

material para la colocación en la sub-base, obteniendo un material alternativo con escoria y adición de gilsonita dando ventajas económicas y de fácil manejo en la construcción de vías (47). Esta es una aplicación que puede estar dentro de las prioridades para mejorar las vías de bajo tránsito o vías terciarias en el concepto de economía circular, dando un nuevo uso y valor a los desechos de las industrias metalúrgicas en Colombia. Pueden también usarse en el trazado de las futuras vías férreas que deberán de nuevo construirse (59).

Ventajas:

- Se presenta como una solución a un desecho de carácter industrial en la que se utilizaría para mejorar una de las prioridades nacionales que corresponde a la infraestructura vial del país.

Desventajas:

- No se cuenta con la cantidad de siderúrgicas necesarias para que este material resultante (escoria) sea de uso constante en la creación de carreteras.

3.4.7 Filtros para retención y degradación de herbicidas como Alacloro y Metolacloro de fuentes hídricas.

Las aguas subterráneas son importantes desde el punto de vista ambiental ya que son fuente de agua dulce y que mantienen el caudal base de los ríos, y cualquier herbicida que contamine esas aguas genera inconvenientes a largo plazo y un daño ambiental que puede ser irreparable por la destrucción de los ecosistemas. Considerando que las arenas verdes (AV) contienen gilsonita que pueden ser sometidas a un tratamiento térmico a alta temperatura para obtener parte de la arena de fundición de hierro, Lee et al. (48) probaron usar las AV como filtros retenedores de herbicidas Alacloro y Metolacloro.

Las AV tienen un potencial de uso como barreras reactivas impidiendo la difusión masiva de estos herbicidas con coeficientes de partición mayores de 50 L/kg. El hierro presente en las AV y cuya concentración es superior al 2%, reacciona y degrada estos herbicidas de manera similar a un degradador de herbicidas comercial que se utiliza usualmente en esos casos (48). Es posible utilizar a la gilsonita como un soporte que permita la fabricación de retenedores y purificadores de fuentes hídricas que se encuentren contaminadas con estos herbicidas y pesticidas. Teniendo en consideración el efecto que sobre la contaminación ambiental tiene sobre las aguas subterráneas, su purificación se torna un desafío para toda la humanidad. Los resultados con arenas verdes, gilsonitas y escorias para purificación de aguas son un camino prometedor que debe profundizarse.

Ventaja:

- Purifica el agua subterránea que es la principal reserva de agua dulce, base de toda actividad de los seres vivos.

Desventaja:

- El tratamiento térmico de las arenas verdes envía gases tóxicos a la atmósfera sin contar con posibles elementos tóxicos como mercurio o plomo que hayan sido impurezas atrapadas en las arenas de fundición.

3.4.8 Fabricación de supercapacitores no faradaicos para gilsonita rica en níquel.

En los últimos años, varios investigadores han estado experimentando con diferentes materiales con el fin de obtener fuentes de energía renovables, que no contaminen y que tengan un rendimiento similar o mejor a los actuales. Mishra et al. (49) convirtieron en carbón nanoporoso con un alto valor de superficie de

poros para la acumulación de carga por medio de iones de óxido de níquel-carbono (NiO/C) con alta capacitancia y no faradaico experimentando con asfaltenos extraídos de petróleo por medio de un tratamiento químico.

El material es del tipo no faradaico ya que el transporte de energía se hace con el uso de iones y no con electrones (49). Una futura aplicación que podría fabricarse a partir de la gilsonita, puesto que es conocido que su estructura química contiene moléculas de porfirinas (6) con altas concentraciones de ligandos de Ni y V. Esta característica abre un campo de aplicación como acumulador de energía iónica con un alto rendimiento capacitivo y estabilidad cíclica. La investigación y el desarrollo de estos materiales basados en conocimientos y técnicas a nivel atómico tienen un gran potencial en Colombia pues se fortalece la capacidad científica y se contribuye a crear una industria basada en la descarbonización o hacia una economía neutra en carbono (58).

Los capacitores hacen parte de los elementos pasivos de electrónica que tienen suficientes aplicaciones desde filtros para frecuencias como banco de capacitores para ahorro de energía. Estos elementos hacen parte de los semiconductores los cuales tuvieron un mercado de 590 mil millones de dólares al finalizar el año 2021. Es factible con las nuevas tendencias tecnológicas participar en el desarrollo de este sector de la economía y serviría de inicio usando materiales existentes como la gilsonita y similares.

Ventajas:

- Fabricación nuevo tipo de semiconductores para la industria energética.
- Diversificación de la economía con productos de alto valor agregado.

- Desarrollo de proyectos tecnológicos con alto grado de complejidad.

Desventaja:

- La producción en masa de cualquier elemento pasivo o semiconductor siempre implica desafíos ambientales importantes.

3.4.9 Transformación de gilsonita en fibras de carbono.

Se conoce que la principal fracción de mineral de gilsonita son los asfaltenos sólidos. Su estructura en forma condensada de varios anillos aromáticos puede ser utilizada para la fabricación de nuevos materiales carbonosos. Resulta muy llamativo extraer los asfaltenos a partir de la gilsonita, en comparación con los extraídos del petróleo, y trabajar aplicaciones ya conocidas para asfaltenos del petróleo. Hay reportes sobre la posibilidad (50) de obtención de asfaltenos por medio de un extrusor, para la fabricación de fibras de carbono. La característica principal y muy interesante es la extrusión de hilos de carbono a partir de gilsonita en presencia de asfaltenos con un alto punto de ablandamiento $T_{ab} = 453.15$ K. En el caso de la gilsonita colombiana, (ver tabla 2) se encuentra que tiene una T_{ab} entre 448 - 463 K, y puede ser utilizada como materia prima para obtener fibras de carbono, en condiciones propuestas por Saad et al (50).

Las fibras de carbono fueron desarrolladas con el fin de producir un material que permitiera emplearse en dispositivos, fácil de moldear y de peso liviano para facilitar su uso en la fabricación de vehículos, desde automóviles hasta bicicletas.

Ventajas de fibras de carbono:

- Material durable, flexible y moldeable.

- Bajo peso, adecuado para aplicaciones en todo tipo de vehículos.

Desventajas:

- La complejidad tecnológica de su producción
- Se fractura fácilmente.
- Su fabricación implica producción de residuos irritantes o contaminantes.

A manera de reflexión. La revisión sobre tendencias mundiales del uso y aplicaciones nuevas de la gilsonita refuerzan la importancia de este material que se puede considerar estratégico, por su composición y características físico químicas y geológicas. Es un mineral abundante en la corteza terrestre, intermedio entre crudos y minerales carbonaceos, con propiedades similares al grafito, de origen natural y de fácil explotación. Los numerosos usos en desarrollos tecnológicos tradicionales así como el potencial de convertirse en materia prima de nuevos materiales para la transición energética hacia una economía menos dependiente del gas y petróleo, lo convierten en un mineral de gran potencial para la producción de materia carbonosa modificada en diversas estructuras con aplicaciones en la electrónica, baterías de litio, fertilizantes sintéticos, grafeno y materiales conductores de nuevo tipo.

4. Conclusiones

La gilsonita es un recurso natural con yacimientos comprobados y que en Colombia son de fácil explotación por encontrarse a baja profundidad, alrededor de 4,5-15 m. Existen 22 licencias para su explotación y se exportan 26,5 M de ton, ocupando el 8,9% del mercado mundial.

En términos prácticos un uso inmediato o a corto plazo ya comprobado, es en las mezclas de

materiales usados en construcción de vías de bajo tránsito ya que Colombia tiene más de 142 000

km de vías terciarias, en mal estado, y su mejora con mezclas de gilsonita potenciarían la economía de sectores rurales que no pueden comercializar sus productos. El uso de la gilsonita en las vías tiene un efecto económico pues los costos de pavimentación son menores que con el asfalto del petróleo.

Destaca en la revisión la aplicación de nuevos materiales a partir de la gilsonita en forma de filtros para aguas residuales contaminadas con desechos de fertilizantes y en filtros retenedores de colas en la explotación artesanal del oro para depurar residuos de arsénico usados ampliamente en la minería ilegal y artesanal.

Se encontró que todos los componentes derivados de la gilsonita son aprovechables, desde las cenizas que sirven como fertilizante sintético gracias a su capacidad de adsorber compuestos nitrogenados, que son importantes para el suelo, hasta las resinas - producto de la co-precipitación de los asfaltenos, que se usan como estabilizadores de las emulsiones para transporte por oleoductos de los crudos pesados.

Un gran potencial muestra el desarrollo y producción de nuevos materiales que los problemas asociados al cambio climático y a la descarbonización de la economía se plantean. Trampas para la captura de CO₂ a partir de gilsonita, producción de gilsocarbón, síntesis de nuevos materiales para mejorar la vida útil de las baterías de litio, obtención de fibras de carbono y de materiales tipo grafeno, fertilizantes sintéticos, son ejemplos de nuevas aplicaciones basadas en la gilsonita.

Otra perspectiva interesante es la producción de materiales controladores en los procesos de reactores

nucleares, área que está tomando nueva fuerza como opción para la generación de electricidad.

Una conclusión novedosa, basada en la presencia de metales pesados como vanadio (V) y níquel (Ni), contenidos en la fracción de los asfaltenos de la gilsonita, es la producción de materiales conductores y acumuladores de carga, o supercapacitores no faradaicos, que transmiten corriente eléctrica en forma iónica y no electrónica.

5. Declaración de financiación y/o agradecimientos

Fuente de financiación: recursos propios. Los autores agradecen a la Biblioteca de la Universidad del Valle.

6. Referencias

- (1) Boden T. Independent gilsonite vein, Uintah County. Geosites [Internet]. 2019; 1:1–8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.31711/geosites.v1i1.78>
- (2) Zista Group. What is Natural Bitumen? [Internet]. Zista Group. 2020 [citado el 5 de marzo de 2021]. Disponible en: www.zistagilsonite.com
- (3) Barrera OJR. Venta de asfaltita tipo gilsonita [Internet]. Ingeomining Colombia. 2016 [citado el 15 de enero de 2022]. Disponible en: <http://ingeminingcolombia.blogspot.com/2016/>
- (4) Kim N. Chemical characterization of Gilsonite bitumen. J Pet Environ Biotechnol [Internet]. 2014;05(05). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7463.1000193>

- (5) Zheng F, Zhu G-Y, Chen Z-Q, Zhao Q-L, Shi Q. Molecular composition of vanadyl porphyrins in the gilsonite. *J Fuel Chem Technol* [Internet]. 2020;48(5):562–7. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s1872-5813\(20\)30023-2](http://dx.doi.org/10.1016/s1872-5813(20)30023-2)
- (6) Afanasjeva N, González-Córdoba A, Palencia M. Mechanistic approach to thermal production of new materials from asphaltenes of Castilla crude oil. *Processes* (Basel) [Internet]. 2020; 8(12):1644. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/pr8121644>
- (7) Subirana M, Sheu EY, editores. *Asphaltenes: Fundamentals and Applications*. Nueva York, NY, Estados Unidos de América: Springer; 2013:192-5.
- (8) Li K, Vasiliu M, McAlpin CR, Yang Y, Dixon DA, Voorhees KJ, et al. Further insights into the structure and chemistry of the Gilsonite asphaltene from a combined theoretical and experimental approach. *Fuel* (Lond) [Internet]. 2015; 157:16–20. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.029>
- (9) Gill JP, Evershed RP, Chicarelli MI, Wolff GA, Maxwell JR, Eglinton G. Computerised capillary gas chromatographic mass spectrometric studies of the petroporphyrins of the gilsonite bitumen (Eocene, U.S.A.). *J Chromatogr A* [Internet]. 1985; b350:37–62. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9673\(01\)93506-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9673(01)93506-x)
- (10) Gordadze G, Kerimov V, Giruts M, Poshibaeva A, Koshelev V. Genesis of the asphaltite of the Ivanovskoe field in the Orenburg region, Russia. *Fuel* (Lond) [Internet]. 2018; 216:835–42. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.146>.
- (11) Hays WW, Nuttli OW, Sharon L. Mapping Gilsonite veins with the electrical resistivity method. *Geophysics* [Internet]. 1967;32(2):302–10. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1439869>.
- (12) Goyes-Peñañiel YP, Khurama-Velasquez S, Nikolaevich-Kovin O. Gilsonite exploration by using electrical resistivity tomography with multi-electrode gradient array: A case study in Rionegro (Colombia). *Rev UIS Ing* [Internet]. 2020; 19(2):77–84. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020008>.
- (13) Antipenko VR, Fedyaeva ON, Grinko AA, Vostrikov AA. Structural parameters of resins and asphaltenes of natural asphaltite and products of its conversion in supercritical water. En: *Proceedings of the International conference on physical mesomechanics materials with multilevel hierarchical structure and intelligent manufacturing technology*. AIP Publishing; c2020.
- (14) Villamil R, Suarez VH. Análisis del comportamiento de concretos asfálticos en caliente modificados con polvo de roca asfáltica. Instituto Nacional de Vías (INVIAS); c2016.
- (15) Barrero D, Pardo A, Vargas C, Martínez J F, Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. *Agencia nacional de hidrocarburos-A.N.H.-*; c2007; 27.

- (16) Giladmin. What is gilsonite.. [Internet]. Gilsonite.pro. 2020 [citado el 15 de enero de 2022]. Disponible en: <http://gilsonite.pro>.
- (17) ITC's mission is to supporting the internationalization of small and medium-sized enterprises [Internet]. ITC. [citado el 29 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://intracen.org/>.
- (18) Quintana HAR, Noguera JAH, Bonells CFU. Behavior of Gilsonite-modified hot mix asphalt by wet and dry processes. *J Mater Civ Eng* [Internet]. 2016;28(2):04015114. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001339](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001339)
- (19) Bahrami A, Kazemi F, Ghorbani Y. Effect of different reagent regime on the kinetic model and recovery in gilsonite flotation. *J Mater Res Technol* [Internet]. 2019;8(5):4498–509. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.063>.
- (20) Aydin I, Fidan C, Kavak O, Erek F, Aydin F. Determination of selenium and nickel in asphaltite from Milli (sirnak) deposit in SE Anatolia of turkey. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* [Internet]. 2017; 95:042033. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042033>.
- (21) Gopinath P, Naveen Kumar C. Performance evaluation of HMAC mixes produced with gilsonite modified bitumen for heavily trafficked roads. *Mater Today* [Internet]. 2021; 43:941–6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.224>
- (22) Asphalt [Internet]. American Gilsonite Company. 2018 [citado el 24 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.americangilsonite.com/end-markets/industrials/asphalt/>.
- (23) SynAsphalt [Internet]. BPN International LLC. 2016 [citado el 24 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://bpn-international.com/synthetic-asphalt/>
- (24) Sobhi S, Yousefi A, Behnood A. The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures. *Constr Build Mater* [Internet]. 2020; 238(117676):117676. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117676>
- (25) Themeli A, Chailleux E, Farcas F, Chazallon C, Migault B, Buisson N. Molecular structure evolution of asphaltite-modified bitumens during ageing; Comparisons with equivalent petroleum bitumens. *Int j pavement res technol* [Internet]. 2017; 10(1):75–83. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.01.003>.
- (26) Yamac O, Yilmaz M, Kok BV. Effects of the Combined Use of Styrene-Butadiene-Styrene and Gilsonite in Bitumen Modification on the Stiffness and Thermal Sensitivity of Bitumens. *Turkish Journal of Science & Tecnology*. c2018;77–85.
- (27) Zhou J, Li J, Liu G, Yang T, Zhao Y. Recycling aged asphalt using hard asphalt binder for hot-mixing recycled asphalt mixture. *Appl Sci (Basel)* [Internet]. 2021; 11(12):5698. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/app11125698>

- (28) Gilsonite usage [Internet]. RAHA Gilsonite Co. 2017 [citado el 5 de junio de 2022]. Disponible en: <http://gilsoniteco.com/2017/05/02/gilsonite-usage/>
- (29) Helms JR, Kong X, Salmon E, Hatcher PG, Schmidt-Rohr K, Mao J. Structural characterization of gilsonite bitumen by advanced nuclear magnetic resonance spectroscopy and ultrahigh resolution mass spectrometry revealing pyrrolic and aromatic rings substituted with aliphatic chains. *Org Geochem* [Internet]. 2012; 44:21–36. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.12.001>
- (30) Saffarian DA, Vahid A, Baniyaghoob S, Saber-Therani M. Heat-treated Gilsonite as an efficient natural material for removing toluene: A Box-Behnken experimental design approach. *Scientia Ir.* c2021;28(3):1353–65.
- (31) Güney A, Burat F, Kayaduman M, Kangal O. Demineralization of asphaltite using free jet flotation: Demineralization of Asphaltite. *Asia-Pac J Chem Eng* [Internet]. 2017;12(1):42–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/apj.2052> P. 42-49.
- (32) Bilgin O. Cleaning of fine asphaltite by oil agglomeration process. *Energy Sources Recovery Util Environ Eff* [Internet]. 2020;1–13. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2020.1810175>
- (33) Gilsonite supplier and powder factory to pulverize up to 600 mesh [Internet]. *Gilsonite-bitumen.com*. [citado el 10 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://gilsonite-bitumen.com/>
- (34) Asia Gilsonite [Internet]. *asiagilsonite*. 2021 [citado el 29 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://asiagilsonite.com/>
- (35) Pakdaman E, Osfour S, Azin R, Niknam K, Roohi A. Synthesis and characterization of hydrophilic gilsonite fine particles for improving water-based drilling mud properties. *J Dispers Sci Technol* [Internet]. 2020;41(11):1633–42. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/01932691.2019.1634582>
- (36) Marsden BJ, Hall GN, Jones AN. Graphite in Gas-Cooled Reactors. En: *Comprehensive Nuclear Materials*. Elsevier; 2020; 357–421.
- (37) Shen K, Yu S, Kang F. The microstructure and texture of Gilsocarbon graphite. *Carbon N Y* [Internet]. 2019; 153:428–37. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2019.06.108>
- (38) Vélez JS, Velásquez S, Giraldo D. Mechanical and rheometric properties of gilsonite/carbon black/natural rubber compounds cured using conventional and efficient vulcanization systems. *Polym Test* [Internet]. 2016;56:1–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.09.005>.
- (39) Velayati A, Nouri A. Formulating a model emulsion replicating SAGD in-situ emulsions. *J Pet Sci Eng* [Internet]. 2022;208(109528):109528. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109528>
-

- (40) Velayati A, Nouri A. Role of asphaltene in stability of water-in-oil model emulsions: The effects of oil composition and size of the aggregates and droplets. *Energy Fuels* [Internet]. 2021;35(7):5941–54. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00183>
- (41) Wang T, Villegas Salvatierra R, Jalilov AS, Tian J, Tour JM. Ultrafast charging high-capacity asphalt-lithium metal batteries. *ACS Nano* [Internet]. 2017;11(11):10761–7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/acsnano.7b05874>.
- (42) Park J-U, Nam S, Lee M-S, Lieber CM. Synthesis of monolithic graphene-graphite integrated electronics. *Nat Mater* [Internet]. 2011;11(2):120–5. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/nmat3169>
- (43) Serna J, Sanchez P, Álvarez I. IV Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad Actas. Centro Universitario de la Defensa de San Javier; 2016:497 – 504.
- (44) Benvidi A, Nikmanesh M, Tezerjani MD. Graphene Oxide/Chitosan Based Impedimetric Aptasensor Along with an Ester Linker for the Detection of Tetracycline. *Journal of Nanostr.* 2022; 12(1):213–23.
- (45) Koşan İ, Ustunisik G, Önal M, Sarıkaya Y, Bozkurt PA. Irreversible ammonia adsorption on asphaltite bottom ash: A thermodynamic approach. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* [Internet]. 2021;626(126933):126933. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126933>
- (46) Jalilov AS, Li Y, Tian J, Tour JM. Ultra-high surface area activated porous asphalt for CO₂ Capture through competitive adsorption at high pressures. *Adv Energy Mater* [Internet]. 2017;7(1):1600693. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201600693>
- (47) Pahlevani S, Jadidi K, Abtahi SM, Hejazi SM, Karakouzian M. Application of Gilsonite-modified slag as a subballast layer with recommendations for optimum content of Gilsonite. *J Mater Civ Eng* [Internet]. 2021;33(4):04021049. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003668](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003668)
- (48) Lee T, Benson CH. Sorption and degradation of alachlor and metolachlor in ground water using green sands. *J. Environ Qual* [Internet]. 2004;33(5):1682–93. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2004.1682>
- (49) Mishra D, Zhou R, Hassan MM, Hu J, Gates I, Mahinpey N, et al. Bitumen and asphaltene derived nanoporous carbon and nickel oxide/carbon composites for supercapacitor electrodes. *Sci Rep* [Internet]. 2022;12(1):4095. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-08159-3>
- (50) Saad S, Zeraati AS, Roy S, Shahriar Rahman Saadi MA, Radović JR, Rajeev A, et al. Transformation of petroleum asphaltenes to carbon fibers. *Carbon N Y* [Internet]. 2022; 190:92–103. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2022.01.011>
- (51) Afanasjeva N, Lizcano-Valbuena WH, Aristizabal N, Mañozca I.

- Electrodeposición de vanadio y níquel de los asfaltenos de crudos pesados. Ing Compet [Internet]. 2015;17(2):9–17. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.25100/iyc.v17i2.2184>
- (52) Chemical Mine World LTD. Especificación física de gilsonita [Internet]. Chemical Mine World LTD. c2017 [citado el 24 de marzo de 2022]. Disponible en: <http://www.gilsonite.org/en/>
- (53) Roldan C. Plan de Desarrollo Departamental “Valle Invencible”, Valle del Cauca, 2020-2023, 1-618, Disponible en: <https://www.valledelcauca.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=viewpdf&id=43404>
- (54) Investigativa U, Ortiz MI, Ávila C, Malaver C, Ascencio O, Romero JAT, et al. Noticias Principales de Colombia y el Mundo [Internet]. El Tiempo. 2022 [citado el 23 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/multimedia/especiales/mineria-ilegal-en-colombia-problematica-ambiental-y-economica/16460194/1/index.html>
- (55) Estratégica E. Colombia pondrá a consulta pública una reglamentación para instalaciones nucleares - Energía Estratégica [Internet]. Energía Estratégica; 2022 [citado el 23 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/colombia-pondra-a-consulta-publica-una-reglamentacion-para-instalaciones-nucleares/>
- (56) Lista de Estados Miembros [Internet]. Iaea.org. 2018 [citado el 24 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/el-oiea/lista-de-estados-miembros>
- (57) Industria gráfica: un sector con oportunidades en el exterior [Internet]. ANDIGRAF. 2018 [citado el 24 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://andigraf.com.co/industria-grafica-un-sector-con-oportunidades-en-el-exterior/>
- (58) Columnistas O, Reina M, Rodolfo SS, Chica R, Juan MRM, Sánchez C, et al. El atraso colombiano en ciencia y tecnología [Internet]. Portafolio.co. [citado el 25 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/opinion/otros-columnistas-1/el-atraso-colombiano-en-ciencia-y-tecnologia-519977>
- (59) Industria del acero reafirma su crecimiento para el 2020 [Internet]. Portafolio.co. [citado el 26 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/industria-del-acero-reafirma-su-crecimiento-para-el-2020-538951>.
- (60) Rubiños C., Espinosa S., El acuerdo de paz y las vías terciarias en Colombia. 2022, 32 (1). Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74869574011>