



DESCONTAMINACIÓN DE SUPERFICIES IMPREGNADAS CON ACEITE LUBRICANTE AUTOMOTRIZ USADO (ALAU), MEDIANTE PROCESOS DE ADSORCIÓN, PERSORCIÓN Y DESORCIÓN CON ULEXITA

Received 09 17 2021
Accepted 06 18 2022
Published 06 30 2022

Vol. 39, No.2, pp. 26-36, May./Jun.2021
Revista Boliviana de Química

39(2), 26-36, May./Jun. 2022
Bolivian Journal of Chemistry
DOI:10.34098/2078-3949.39.2.1



Full original article

Peer-reviewed

Rafael Juan Tornero Jimenez*, Waldo Yapu Machicado

Instituto de Investigaciones Químicas IIQ, Facultad de Ciencias Puras y Naturales FCPN, Universidad Mayor de San Andrés UMSA, P.O. Box 303, Calle Andrés Bello s/n, Ciudad Universitaria Cota-Cota, La Paz, Bolivia, rafaeltornero@yahoo.com, <https://iiq.umsa.bo>

Keywords: Adsorption, Desorption, Persorption, Ulexite, Aceite Lubricante Automotriz Usado

Palabras clave: Adsorción, Desorción, Persorción Ulexita, Used Automotive Lubricant Oil

ABSTRACT

The continuous and massive use of automotive lubricating oil (ALO) in Bolivia, and its disposal or used automotive lubricating oil (UALO) represents an environmental pollution problem of high priority in terms of its elimination. Due to the lack of environmental regulations in this regard, the situation has been aggravated, for example when these liquids come into contact with solid surfaces (soil or materials) due to accidental spills, generating their irreversible contamination. In this research work we present an alternative for the decontamination of surfaces contaminated by UALO, proposing a study of physicochemical and environmental processes of adsorption, persorption and desorption. Ulexite ($\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_5$) was applied to the spill in a mass ratio of 5:1 (g/g) with respect to the contaminant. The mixture is a solid containing UALO molecules dispersed and adsorbed on the ulexite surface. The adsorption of UALO on ulexite can be reversed using potable water at 80°C. This allows the ulexite to rehydrate and the UALO can be separated from the ulexite, and it can be applied again. The recovery performance of ulexite is proportional to the exposure time. On the other hand, desorption will occur at 30 minutes minimum and complete after 2 hours maximum for total desorption. The definitive elimination of the contaminant (UALO), after its separation thanks to mutual insolubility with water or phase separation, is achieved according to international elimination standards, that is, by combustion to give carbon dioxide and water, both of which are biodegradable environmental components. This procedure was not carried out in the present investigation. Alternatively, UALO could be submitted to a regeneration process or recycling procedures.

*Correspondent autor: rafaeltornero@yahoo.com

RESUMEN

El uso continuo y masivo de aceite lubricante automotriz (ALA) en Bolivia, y su desecho o aceite lubricante automotriz usado (ALAU) representa un problema de contaminación ambiental de alta prioridad en cuanto a su eliminación. Debido a la falencia de normas ambientales al respecto la situación se ha visto agravada, por ejemplo cuando estos líquidos entran en contacto con superficies solidas (suelos o materiales) debido a derrames accidentales generando la contaminación irreversible de los mismos. En el presente trabajo de investigación presentamos una alternativa para la descontaminación de superficies contaminadas por ALAU proponiendo un estudio de procesos fisicoquímicos y ambientales de adsorción, persorción y desorción. Se aplicó ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_5$) sobre el derrame en una relación másica de 5:1 (g/g) respecto al contaminante. La mezcla es un sólido que contiene moléculas de ALAU dispersas y adsorbidas sobre la superficie de la ulexita. La adsorción de los ALAU sobre la ulexita puede revertirse utilizando agua potable a 80°C. Esto permite que la ulexita se rehidrate y el ALAU pueda ser separado de la ulexita, y ésta pueda ser aplicada nuevamente. El rendimiento de recuperación de la ulexita es proporcional al tiempo de exposición. Por otro lado, la desorción se producirá a los 30 minutos como mínimo y se completa después de 2 horas como máximo para la desorción total. La eliminación definitiva del contaminante (ALAU), tras su separación gracias a la insolubilidad mutua con el agua o separación de fases, se consigue según estándares internacionales de eliminación, es decir, por combustión para dar dióxido de carbono y agua, ambos componentes ambientales biodegradables. Este procedimiento no se llevó a cabo en la presente investigación. Alternativamente, ALAU podría someterse a un proceso de regeneración o a un procedimiento de reciclaje..

INTRODUCCIÓN

Cualquier aceite lubricante automotriz en base a petróleo sintético (ALA), que ha sido contaminado con agentes extraños a su composición original se considera como un aceite lubricante automotriz usado (ALAU). Estos contaminantes, pueden ser: metales pesados, agua u otros compuestos químicos. La contaminación del lubricante, es uno de los factores que más afecta el funcionamiento correcto de los sistemas que trabajan a base de lubricantes [1]. El aceite usado de motor es insoluble en agua, puede contener sustancias químicas tóxicas, y se adhiere a todo tipo de superficies, solidas o liquidas [4]. El derrame accidental del aceite lubricante usado sobre una superficie (suelo u otros), al igual que sobre el agua es un problema ambiental. Esto debido a que la lenta degradación ambiental de los hidrocarburos saturados contenidos en aceites usados genera una película impermeable que impide el normal desarrollo de la actividad biológica y química del suelo destruyendo la vegetación y por lo tanto la fertilidad del suelo [2]. Los aceites residuales de motores son un material altamente contaminante, que requiere una gestión responsable debido a que éstos pueden causar daños al medio ambiente [3].

Tabla 1. Composición media de un aceite lubricante

Componente	Cantidad/composición
Lubricante. Hidrocarburos totales	85-75%
Alcanos	45-76%
Ciclo alcanos	13-45%
Aromáticos	10-30%
Aditivos	15-25%
Antioxidantes	Ditiofosfatos. Fenoles. Aminas
Detergentes	Sulfonatos. Fosfonatos. Fenolatos
Anticorrosivos	Ditiofosfatos de zinc y bario. Sulfonatos
Antiespumante	Siliconas. Polímeros sintéticos
Antisépticos	Alcoholes. Fenoles. Compuestos clorados

Technical Guidelines on Used Oil Re-refining or Other Re-uses of Previously Used Oil. (UNEP, 2014). United Nations Environment Programmer



El ALAU tiene un proceso de degradación lento y por su composición es considerado potencialmente peligroso para el ambiente. Su capacidad de diseminarse sobre grandes áreas de suelos y aguas formando una capa muy fina, limita el ingreso de oxígeno a las capas interiores de estas sustancias, lo que produce, una significativa degradación de la calidad de las mismas [5].

Un método para solucionar el derrame de ALAU sobre superficies es utilizando adsorbentes sólidos de composición inorgánica y de gran área superficial. El material adsorbente se caracteriza a través de parámetros físicos tales como: forma, porosidad, área superficial y otros. Dentro de las opciones tradicionales se tienen materiales como las zeolitas y el gel de sílice, pero su aplicación implica un costo significativo. Por lo tanto, existe un interés creciente por el desarrollo de nuevos materiales de bajo costo [7].

Los adsorbentes convencionales son sustancias naturales o sintéticas, y que, para ser usadas, deben recibir un tratamiento previo de activación, como el carbono, arcillas, membranas etc. Además, después de su uso estas sustancias tienen la cualidad de ser regeneradas. Los adsorbentes no-convencionales son materiales alternativos (biopolímeros o partes de plantas) que no necesariamente deben recibir un tratamiento previo para activarse; sin embargo, su activación mejora su capacidad de adsorción [8].

Para la adsorción en fases fluidas, como es el caso de un sistema líquido-sólido, es necesario emplear la ecuación de adsorción de Gibbs para evaluar la concentración del compuesto anfílico en la superficie. Esto se logra mediante la medición de la tensión superficial o interfacial. [9]

En primera instancia el presente estudio pretende estimar la capacidad de adsorción de ALAU por parte de diferentes materiales, para luego seleccionar el mejor adsorbente con el objetivo de evaluar su capacidad de adsorción, desorción y recuperación.

EXPERIMENTAL

Primera Parte

Caracterización química de un aceite lubricante nuevo (ALA)

El análisis por Cromatografía de gases fue realizado en un cromatógrafo de masas CHROMATOGRAPH GC-2010 PLUS marca SHIMADZU-GC con columna restek 5 sil MS 30 m, 0.25 mmID, 0.25 μ m df con un detector simple de cuadrupolo. El equipo contiene un inyector Injecon Jeringa de 10 μ l. El gas portador utilizado fue helio grado analítico de entre 10 y 25 PSI de flujo. En este caso, solo se sometió el ALA nuevo a análisis para evitar la contaminación de las columnas del equipo con las impurezas desconocidas del ALAU. Se tomaron 2 microgotas (1 ml = 60 micro gotas) de muestra, se disolvieron en acetona p.a., y se inyectaron al equipo programado que genera el cromatograma del análisis en cuestión de 2 minutos. Para la determinación se fijaron las condiciones óptimas de trabajo tales como volumen de inyección de 1 μ L, flujo de helio de 0.61 ml/min, temperatura del inyector de 250°C, modo scan. El programa de temperatura del horno varió desde 40°C hasta 290°C a una velocidad de 5 °C/min Esta temperatura fue mantenida por 20 min. La corroboración de los compuestos de interés se realizó mediante el detector de espectrometría de masas con modo de ionización de impacto electrónico a 50eV. El scan del rango de masas se realizó entre 35 y 1000 m/z.

Segunda parte

Caracterización física y química del sólido adsorbente seleccionado

Los sólidos adsorbentes utilizados en el análisis comparativo de capacidad de adsorción se detallan en la tabla 1.

Se realizaron pruebas de adsorción de ALAU con las 15 sustancias seleccionadas. Para esto se mezcló el ALAU con cada adsorbente en una relación másica 1:1. Cada muestra se introdujo en un frasco, la masa utilizada tanto para el adsorbente como el ALAU fue de 1g. Se observó la interacción de cada una de las mezclas. La sustancia que presentó mayor adsorción con el ALAU fue el Sólido (b) de Viacha (No 13), razón por la cual, se procedió a caracterizar física y químicamente este sólido que a simple observación se trataba de un polvo blanco.

Debido a que la muestra del Sólido 2 de Viacha dio los mejores resultados se procedió a caracterizarlo apropiadamente. Para esto, el primer paso fue la caracterización de las fases cristalinas presentes en microscopio electrónico de barrido del Sólido (b) de Viacha cuya forma era triclinica. Este polvo blanco fue pulverizado en un mortero, para luego colocarlo en un soporte metálico. La muestra fue introducida en el equipo de Difracción de Rayos X Marca BRUKER Modelo de Advance DAVINCI, por un tiempo de 2 min, con el cuál, se obtuvo el difractograma correspondiente. Utilizando un tubo de ánodo de Cu de foco fino largo, 3000 W de potencia, Radiación $K\alpha=1,5418$



Å, auto-muestreador con 3 torretas de hasta 15 posiciones cada una, detector ultrarrápido 1D Lynxeye XE-T, tensión regulable de forma continua entre 20 y 60 kV, estabilidad $\pm 0,001$ %, acoplado al paquete de programas DIFFRACPLUS, Base de datos ICDD PDF 2 y PDF 1, Base de datos ICSD.

Tabla 1. Descripción de sólidos utilizados como posibles adsorbentes

No	Nombre nominal de muestra	Características generales	Cantidad (g)	Procedencia
1	Harina	Polvo que resulta de la molienda de los cereales y otras semillas	100	Mercado local
2	Sacarosa	Hidrato de carbono cristalina, generalmente blanca, muy soluble en agua	100	Mercado local
3	Fibra de yuca	Cereal café-naranja de tubérculo de yuca	100	Mercado local
4	Quinoa	Cereal de grano entero color amarillo	100	Mercado local
5	NaCl	Sal común cristalina blanca	100	Mercado local
6	Estevia	Polvo blanco de la planta de estevia	100	Mercado local
7	Fibra de yuca molida	Cereal café-naranja de tubérculo de yuca molido	100	Mercado local
8	Afrecho	Cáscara molida de cereal desmenuzada (arroz)	100	Mercado local
9	Sílice Gel 60 G	Gel de sílice cristalino, porosa, inerte de área superficial 800 m ² /g	20	Laboratorio
10	Sílice Gel 60 G DC	Gel de sílice cristalino, porosa, inerte de área para cromatografía de área superficial 600 m ² /g	20	Laboratorio
11	Carbón activado	Adsorbente carbonáceo altamente cristalinos y de área superficial 500 m ² /g	20	Laboratorio
12	Sólido (a) de Viacha	Polvo Café oscuro (tipo suelo arcilloso)	300	Residuos industriales
13	Sólido (b) de Viacha	Polvo Blanco grumoso (tipo algodón)	200	Residuos industriales
14	Poke	Polvo Blanco rojizo	200	Yacimiento
15	Aserrín	Polvo naranja de madera	50	Residuo carpintería

Tercera parte:

Pruebas de adsorción de aceite lubricante usado sobre el sólido (b) (ulexita)

El Sólido (b) de Viacha, fue identificado como ulexita, siendo sometido a pruebas para determinar su capacidad de adsorción. Se realizaron 10 mezclas de la ulexita con ALAU en diferentes proporciones másicas. Se utilizaron tubos de ensayo con base plana, los cuales fueron etiquetados con letras de la A – J. En cada recipiente se introdujeron diferentes cantidades de ulexita (1g – 10g respectivamente) y 1 g de ALAU.

Para favorecer la adsorción, en algunos casos se procedió a la agitación mecánica de las mezclas mediante el uso de una varilla. Finalmente, el criterio de selección de la proporción óptima de ALAU-ulexita se realizó mediante comparación del grado de recubrimiento del sólido y mediante observación en microscopio electrónico de barrido 1:2000. La muestra E, observada en la figura 2, fue seleccionada como el producto final con la mejor adsorción para los siguientes experimentos.

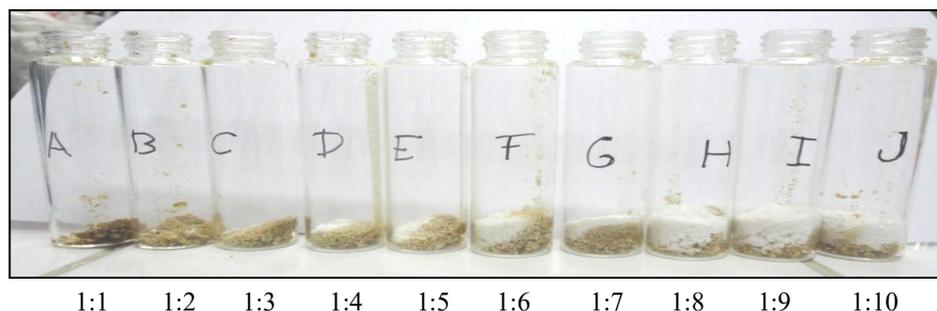


Figura 1. Relaciones de Adsorción Aceite Lubricante Usado sobre Ulexita



Figura 2. Producto final de la muestra E de Aceite Lubricante usado sobre ulexita

Después, se determinó la isoterma de adsorción del aceite usado (ALAU) sobre Ulexita. Para esto, se empacó ulexita en un tubo de 0,8 cm de diámetro y 10 cm de altura y se colocó sobre un recipiente que contenía ALAU. Al contacto, este último asciende sobre los intersticios vacíos de los cristales de ulexita hasta una altura límite de 6,5 cm. Aprovechando este fenómeno de capilaridad, se reproduce la experiencia midiendo la relación en peso de (g ALAU/g Ulexita) en determinados tiempos versus la cantidad de ALAU que queda sin adsorber, todo esto a una temperatura ambiente constante de 18 °C.

Cuarta parte:

Desorción aceite lubricante usado de ulexita

Se realizaron pruebas preliminares de desorción utilizando métodos como la combustión y extracción utilizando solventes orgánicos, sin embargo, los resultados fueron de bajo rendimiento o nulos en otros casos. Por lo tanto, se utilizó agua potable a una temperatura constante de 80 °C para la desorción total del aceite que se encontraba adsorbido sobre la ulexita. En un matraz Erlenmeyer se introdujo la mezcla de 1 g ALAU-ulexita previamente separada por filtración u otros (muestra E) en 15 g de H₂O, posteriormente la mezcla se calentó hasta alcanzar una temperatura de 80 °C.

La mezcla se mantuvo bajo agitación en calentador agitador magnético a temperatura constante hasta observar una separación de fases entre el agua, el aceite y la ulexita sólida, tal como se aprecia en la Figura 3. Este método rehidrata a la ulexita que puede nuevamente ser utilizada. Se cronometró el tiempo necesario para lograr la separación de fases solida-liquida realizando pruebas a 30 min, 60 min, 90 min y 120 min observando en cada tiempo la desorción parcial y total. El tiempo necesario de exposición de la mezcla de aceite lubricante/ulexita en agua a 80°C para su desorción es de 30 minutos como mínimo, y dos horas como máximo para la desorción total del aceite. El rendimiento se determinó observando diferentes muestras de ulexita en el microscopio electrónico de barrido SEM.



Figura 3. Desorción del aceite lubricante de la Ulexita con agua a 80°C constante

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El aceite nuevo al ser sometido a un trabajo físico de fricción en motores y temperaturas altas se convirtió en un aceite usado. La recuperación de los aceites usados, consiste entonces, en reciclar el lubricante base que mantiene sus características (composición) lo más cercanas posible a las características del lubricante nuevo [13].

Los resultados de la Cromatografía de Gases/Masas del aceite nuevo están en la Figura 4, según la cual se identificaron 17 moléculas que forman parte de un aceite lubricante nuevo. Dentro de los compuestos identificados se pueden mencionar: hidrocarburos alifáticos, aromáticos, además de átomos de Iodo y Flúor. El espectro GC del aceite lubricante nuevo reporta un alto porcentaje de 4 moléculas identificadas como prioritarias descritas en la Tabla 2.



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	Area%	Heigh	AH	Name
1	42.630	2.57	3.53	2.81	n-Heptadecylcyclohexane
2	43.591	2.06	3.12	2.55	Dotriacontane, I-iodo-
3	44.306	3.22	4.27	2.91	Dodecylcyclohexane
4	44.760	2.44	3.38	2.79	Dotriacontyl pentafluoropropionate
5	45.045	3.20	4.85	2.54	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl octadecyl ester
6	45.919	7.06	7.14	3.82	n-Tridecylcyclohexane
7	46.619	3.53	5.29	2.57	Heptyl triacontyl ether
8	47.288	2.34	3.43	2.64	Nonyl tetracontyl ether
9	47.489	12.86	8.61	5.75	Tetrapentacontane
10	47.679	6.26	5.98	4.03	Octatriacontyl trifluoroacetate
11	48.025	5.09	6.23	3.15	Oxalic acid, cyclohexylmethiltetradecyl ester
12	49.328	20.06	16.97	4.56	13-Methylheptacosane
13	49.400	4.27	7.08	2.33	Cyclopentane, 1-methyl-3-(1-methylentyl)
14	50.284	3.78	4.05	3.60	Octacosane, I-iodo-
15	50.566	2.22	3.17	2.70	Dotriacontyl pentafluoropropionate
16	52.268	15.44	10.68	5.57	Tetrapentacontane
17	53.920	3.59	2.21	6.25	Dotriacontyl pentafluoropropionate

Figura 4. Espectro y tabla de resultados de GC acoplado a masas de un Aceite lubricante nuevo

Tabla 2. Moléculas prioritarias identificadas en un ALA. Se muestra el tiempo de retención (RT), las cantidades relativas de los componentes principales (%) y el nombre de cada uno

No	RT (min)	Área	Altura (A)	Nombre	Formula empírica	%
1	52.3	15.4	5.6	Tetrapentacontano	C ₅₄ H ₁₁₀	24.0
2	49.3	20.1	4.6	13-Metilheptacosano	C ₂₈ H ₅₇	17.0
3	45.9	7.1	3.8	n-Trideciciclohexano	C ₁₉ H ₃₂	7.1
4	49.4	4.3	2.3	Ciclopentano, 1-metil-3-(1-metilentil)	C ₉ H ₁₇	7.1
Total						55.4

Identificación de material sólido adsorbente de aceites lubricantes usados

El análisis por Difracción de Rayos X (Figura 5) del Sólido (b) de Viacha reporta como resultado que se trata de un borato denominado ulexita cuya composición química es NaCaB₅O₆ (OH)₆(H₂O)₅.

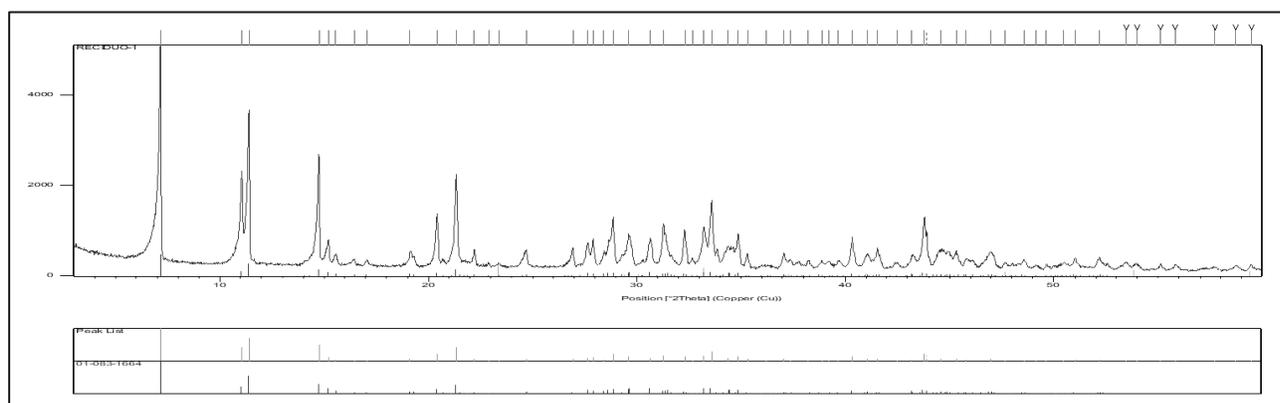


Figura 5. Difracción de Rayos X (Ulexita) NaCaB₅O₆ (OH)₆(H₂O)₅.

De las 13 sustancias sólidas disponibles en el mercado, obtenidas de laboratorio y tomadas de campo, 12 no presentaron adsorción significativa con el ALAU (Figura 6).

Se identificó a la ulexita (Sólido (b) de Viacha) procedente de los residuos industriales de la ciudad de Viacha como el adsorbente que presenta mejor afinidad con el aceite lubricante usado (Figura 7), en comparación con los demás sólidos probados y disponibles en laboratorio (Figura 6). Esta afinidad se comprobó midiendo el peso total del



producto obtenido del aceite lubricante usado sobre la superficie del sólido. La cantidad de aceite adsorbido sobre la ulexita es directamente proporcional al peso de la mezcla (Figura 7, Tabla 3).

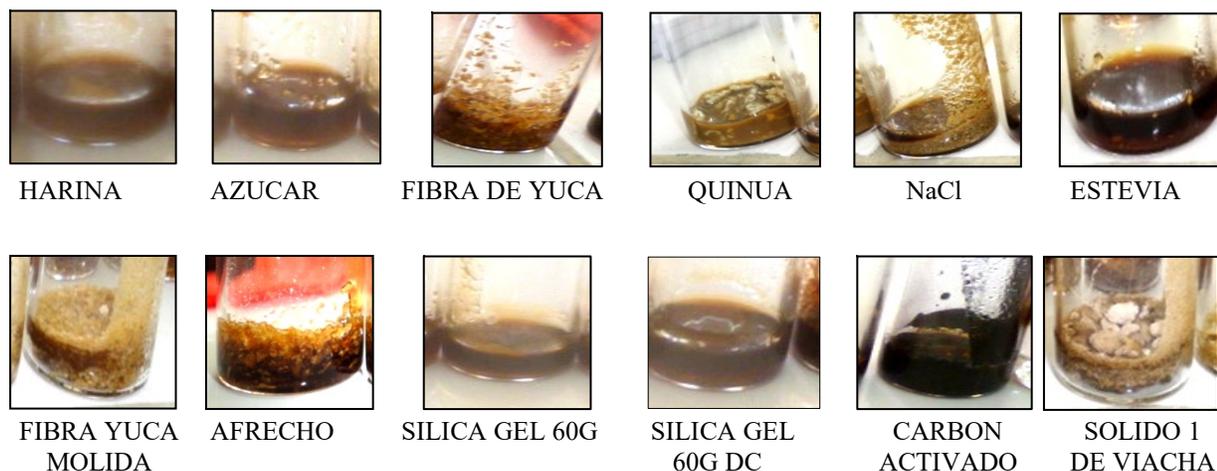


Figura 6. Pruebas de adsorción de ALAU sobre diferentes sólidos



SOLIDO 2 DE VIACHA y ALAU

Figura 7. Pruebas de adsorción de ALAU sobre Ulexita (Sólido (b) de Viacha)

Pruebas de adsorción de aceite lubricante usado sobre sólidos

En base a las pruebas de adsorción del ALAU en ulexita en diferentes proporciones se determinó que la relación óptima de adsorción entre el ALAU y la ulexita es de 1:5 (1g de aceite/ 5 g de ulexita). Seleccionada la relación 1:5, se realizaron 25 pruebas de adsorción, tal como se muestra en la tabla 3. A partir de estas pruebas se midió la capacidad de adsorción (C_{ad}) [11] de la ulexita definida como $C_{ad} = (M_f - M_u) / M_u$, donde M_f es la masa total de aceite adsorbido más la masa de ulexita, y M_u es la masa de ulexita inicial. El valor obtenido para la ulexita en una proporción de 1:5 fue de 0.18. Este valor es comparable a valores como el de la diatomita [11]. Por otro lado, el porcentaje de evaporación fue alrededor del 1.83%.

Adsorción del aceite lubricante usado sobre ulexita

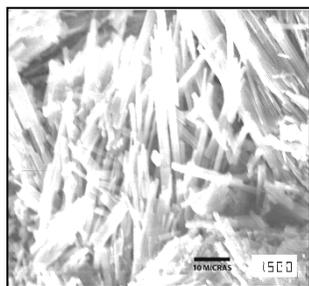
El fenómeno de adsorción del aceite lubricante usado observado en el microscopio electrónico de barrido se muestra en la Figura 8. Se producen dos fenómenos: adsorción y persorción. La adsorción se produce de manera superficial recubriendo cristales de Ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_5$) como se observa en la figura 8. Por otro lado, la persorción ocurre porque al producirse el fenómeno de adsorción, las aguas que hidratan a la ulexita son desplazadas por las moléculas de aceite ocupando estos espacios.

La isoterma de adsorción del aceite lubricante usado sobre la ulexita se presenta en la Figura 9. La isoterma de adsorción puede ser clasificada como Tipo IV de isoterma de acuerdo a Kumar et al. Esta forma en la isoterma de adsorción indica que pueden existir interacciones entre las moléculas del aceite adsorbido. Esto muestra una naturaleza más compleja en el proceso de adsorción del aceite en la ulexita. También ofrece información sobre la estructura del adsorbente, en este caso la ulexita. Esta isoterma indicaría una amplia distribución en los tamaños de los poros de adsorción de la ulexita y que la porosidad en el material tiene un amplio rango de variación de tamaños [12]. La isoterma de adsorción será un indicador de la eficiencia de adsorción de la ulexita para adsorber el aceite.

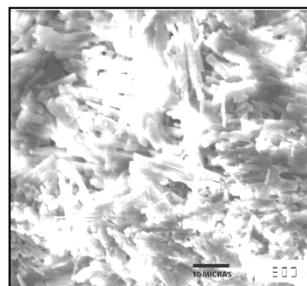


Tabla 3. Pruebas de adsorción Ulexita /ALAU. El sólido (b) de Viacha es S(b)V

No	ALAU (g)	S(b)V (g)	Suma de masa teórica (g)	Suma de masa experimental (g)	Diferencia teórico – experimental (g)	% pérdida de masa por evaporación
1	0,2148	1,0742	1,2890	1,2601	0,0289	2,24
2	0,1828	0,9144	1,0972	1,0716	0,0256	2,33
3	0,1505	0,7528	0,9033	0,8894	0,0139	1,54
4	0,1508	0,7548	0,9056	0,8884	0,0172	1,90
5	0,1540	0,7713	0,9253	0,9163	0,0090	0,97
6	0,1555	0,7777	0,9332	0,9091	0,0241	2,58
7	0,1378	0,6892	0,8270	0,8113	0,0157	1,90
8	0,1575	0,7876	0,9451	0,9317	0,0134	1,42
9	0,1578	0,7891	0,9469	0,9146	0,0323	3,41
10	0,1479	0,7399	0,8878	0,8699	0,0179	2,02
11	0,1355	0,6780	0,8135	0,7991	0,0144	1,77
12	0,1400	0,7005	0,8405	0,8242	0,0163	1,94
13	0,1424	0,7126	0,8550	0,8440	0,0110	1,29
14	0,1330	0,6658	0,7988	0,7830	0,0158	1,98
15	0,1524	0,7621	0,9145	0,8995	0,0150	1,64
16	0,1402	0,7032	0,8434	0,8300	0,0134	1,59
17	0,1323	0,6628	0,7951	0,7825	0,0126	1,58
18	0,1286	0,9438	1,0724	1,0606	0,0118	1,10
19	0,1383	0,6920	0,8303	0,8167	0,0136	1,64
20	0,1446	0,7243	0,8689	0,8528	0,0161	1,85
21	0,1375	0,6890	0,8265	0,8074	0,0191	2,31
22	0,1546	0,7732	0,9278	0,9116	0,0162	1,75
23	0,1376	0,6878	0,8254	0,8111	0,0143	1,73
24	0,1357	0,6790	0,8147	0,8005	0,0142	1,74
25	0,1562	0,7820	0,9382	0,9249	0,0133	1,42
PROMEDIO						1,83±0.5



Cristales de ulexita pura
1:1500



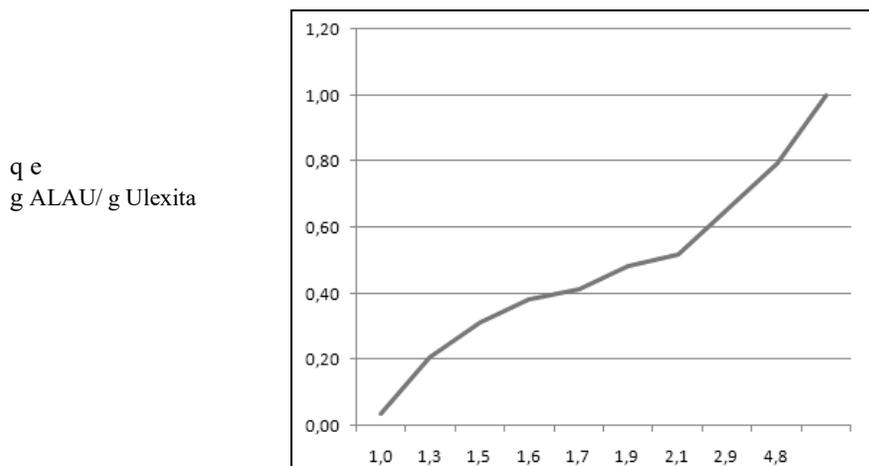
Aceite Lubricante usado sobre Ulexita
1:1500

Figura 8. Cristales de ulexita y adsorción de aceite lubricante usado sobre Ulexita observados en microscopio electrónico de barrido. Imágenes reproducidas del artículo de Tornero & Valdez (2020), autorización de reproducción por Revista Boliviana de Química.

En función a la forma de la isoterma obtenida se puede concluir que el adsorbente, en este caso la ulexita, presenta superficies heterogéneas de adsorción con diferentes tipos de sitios de adsorción y con energías diferentes. Esto puede



deberse a los diferentes átomos que componen la ulexita y a la variación en la distribución de los tamaños de poros [13].



Ce = Concentración de aceite restante en el equilibrio

Figura 9. Isoterma de adsorción de Aceite lubricante usado sobre ulexita. El término q_e indica la relación de g de aceite sobre g de ulexita

Desorción Aceite lubricante usado - ulexita

Pruebas preliminares de desorción de aceite lubricante/Ulexita por incineración, extracción con solventes orgánicos, aplicación de ácidos y bases dio como resultado bajos rendimientos. En el caso de la utilización del agua para producir la desorción del aceite de la ulexita se realizaron pruebas a diferentes temperaturas. Se observó que la mezcla de agua con ulexita a temperatura ambiente y hasta 60°C no produjo desorción del aceite de la ulexita. En cambio, se produjo la desorción del aceite de la ulexita, utilizando agua a temperatura constante de 80 °C, obteniéndose un alto rendimiento de desorción del aceite lubricante. A 86 °C se produce la ebullición y evaporación del agua, por lo tanto, no se obtienen altos rendimientos de recuperación del aceite lubricante. Esto lleva a la conclusión de que el agua requiere de una determinada temperatura (energía) para desplazar a las moléculas de aceite lubricante usado, adsorbido en la superficie de la ulexita. El método no solo produce la desorción Ulexita/ALAU sino que rehidrata la ulexita, reactivando esta sustancia para ser reutilizada.

Es importante mencionar que el material sólido utilizado como adsorbente (ulexita) puede ser recuperado de los suelos y reutilizado. La ulexita es generalmente utilizada como fertilizante en cultivos, aunque en concentraciones muy elevadas puede generar toxicidad en los suelos. Durante el proceso de adsorción del aceite, no existirán interacciones desfavorables con el suelo tratado. Sin embargo, será recomendable evitar dejar residuos para no exceder las concentraciones de boro que puedan ser procesadas por los suelos, como micronutriente para las plantas [14,15].

CONCLUSIÓN

Se demostró que la Ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_5$) es capaz de adsorber aceite lubricante usado sobre su superficie. La diferencia entre un aceite nuevo y otro usado radica en que el aceite usado contiene sustancias químicas como metales pesados producidos por fricción de los motores en los que es usado. Estos compuestos de descomposición limitan que se pueda continuar con el uso del aceite. Además, debido a la combustión incompleta se tienen residuos de carbón, lo que se traduce en la reducción de su capacidad como lubricante.

La adsorción estudiada se produce debido al fenómeno de capilaridad, propiedad que fue utilizada para determinar la isoterma de adsorción por medio de su isoterma de adsorción. La isoterma de adsorción indicó la heterogeneidad de la superficie de adsorción de la ulexita. La capacidad de adsorción determinada fue de 0.18.

Las moléculas de agua utilizadas a 80 °C desplazan o reemplazan a las moléculas de aceite lubricantes usados (ALAU) adsorbidos sobre la ulexita permitiendo la recuperación del adsorbente.

RECONOCIMIENTOS



Los autores agradecen al Mg. Santiago Tarqui, del Instituto de Investigaciones Químicas IIQ UMSA, por el análisis GC/MS. Al Ing. Mario Blanco del IGEMA UMSA por los análisis de difracción por rayos X. Al Instituto de Investigaciones Químicas por el soporte financiero mediante equipos e insumos, para la realización de esta investigación.

REFERENCES

- Durán Robledo, R. W. **2013**, Manual de Educación Ambiental para el manejo adecuado de los aceites usados en la ciudad de Riobamba (BScTesis), Escuela Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3074>
- Cuervo, A., Valdiri, J. **2019**, Evaluación de los procesos de pretratamiento requeridos para el tratamiento biológico de los residuos de aceites usados de motor diésel (BSc Tesis), Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia.,37, recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7376>
- Tejada Tovar, C.N., Quiñonez Bolaños, E., Fong Silva, W. **2017**, Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje, *Prospectiva*, 15(2), 135-144. DOI: <https://doi.org/10.15665/rp.v15i2.782>
- Andrade Padilla, C.G. **2015**, Propuesta de un plan de manejo sustentable de los aceites usados provenientes de los talleres automotrices y lubricadoras del canton Cañar, Universidad Politécnica Salesiana, (BSc Tesis), Carrera de ingeniera mecánica automotriz, Ecuador, recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7683>
- Ramadass, K., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Naidu, R. **2015**, Ecological implications of motor oil pollution: Earth worm survival and soil heath, *Soil Biology & Biochemistry*, 85, 72–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.026>
- Prieto García, J.O., Curbelo Sánchez, A., Albernas Carvajal, Y., Rodríguez Suárez, E., Ribalta Quesada, J., Perez Leiva, A. **2017**, Estudio de la adsorción de ácidos orgánicos en ceniza de bagazo de caña de azúcar, *Centro Azúcar*, 44(3), 10.
- Ortuño Sanchez, M. **2019**, Estudio sobre la eliminación de arsénico, selenio y antimonio de efluentes líquidos mediante el uso de materiales de bajo coste, (MScTesis), Universidad Politécnica de Madrid, ETSI de Minas y Energía (UPM), Madrid, España, recuperado de <https://oa.upm.es/56690/>
- Valladares-Cisneros, M.G., Valerio-Cárdenas, C., de la Cruz-Burelo, P., Melgoza-Alemán, R.M. **2016**, Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales, *Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia*, 16(31),55-73. DOI: [10.22395/rium.v16n31a3](https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3)
- Sandoval-Ibarra, F.D., López-Cervantes, J.L., Gracia-Fadrique, J. **2015**, Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos, *Educación Química*, 26(4), 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eq.2015.03.002>
- Fong, W., Quiñonez, E., Tejada, C., **2017**, Physical-chemical characterization of spent engine oils for its recycling, *Prospectiva*, 15(2), 135-144.
- Bandura, L., Wozzuk, A., Kołodyńska, D., Franus, W. **2017**. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: a review, *Minerals*, 7(3), 37, DOI: <https://doi.org/10.3390/min7030037>
- Kumar, K.V., Gadipelli, S., Wood, B., Ramisetty, K.A., Stewart, A.A., Howard, C.A., Brett, D.J.L., Rodriguez-Reinoso, F. **2019**, Characterization of the adsorption site energies and heterogeneous surfaces of porous materials, *Journal of materials chemistry A*, 7(17), 10104-10137. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9TA00287A>