

Remoción de Cr^{6+} de lixiviados de tiraderos de basura con arcillas modificadas o activadas

RICARDO RANGEL SEGURA*, GABRIEL MARTÍNEZ HERRERA*, JOSÉ APOLINAR CORTÉS *, MANUEL GARCÍA MÉNDEZ**

Los residuos sólidos depositados en los rellenos sanitarios a cielo abierto generan los lixiviados, con la consecuente biodegradación molecular de la materia orgánica y la presencia de metales pesados: cromo, cadmio, hierro, etc., los cuales originan la afectación directa del subsuelo y de los mantos freáticos. Si se considera que los metales pesados son carcinógenos, teratológicos y tóxicos a la salud humana, hay razones de peso para implementar tratamientos que eliminen estos contaminantes. Por ello, los estudios de procesos que lleven a la disminución, eliminación o encapsulamiento del Cr^{6+} son de particular importancia, dadas sus características adversas a la salud.^{1,2}

El uso de arcillas como agente adsorbente de cromo,³ fotocatalizador o como soporte,^{4,5} como decolorante,⁶ en la eliminación de pesticidas,⁷ o bien como aditivo en la industria cosmética⁸ y recientemente en el estudio de liberación de drogas,⁹ se ha documentado ampliamente. Dada la complejidad de su composición química, su aplicación depende principalmente del contenido de los diferentes tipos de arcillas para un material en particular. Usualmente, es difícil separar cada constituyente y, debido a ello, es más común que una vez caracterizado el material, se busque un uso para éste.

Las arcillas naturales se clasifican con respecto a su forma como minerales arcillosos en placas (filosilicatos), arcillas minerales fibrosas y arcillas amorfas.¹⁰ Asimismo, es normal encontrar que una arcilla natural contenga cantidades significativas de feldespatos (aluminosilicatos). Estas estructuras, en general, se caracterizan por formar cadenas de SiO_2 (feldespatos), mientras que en las arcillas las unidades que las conforman son del tipo $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$. Este es un dato importante a considerar, pues la “avidez de carga” que presentan las arcillas, aunada a la debilidad de los enlaces interlaminares, hacen proclives estos materiales a un intercambio iónico en sus espacios tetraedrales u octaedrales. Una razón más para im-

plementar el uso extensivo de las arcillas sería, principalmente, por sus valores de área superficial, los cuales oscilan entre 80 y 300 m^2/g .

En el presente trabajo se muestran los resultados de la aplicación de una arcilla compuesta principalmente por los elementos Si, Mg, Mn, Fe, K, Ca, asociados en las fases montmorillonita, haloisita y ortoclasa, la cual se modificó o activó para determinar su capacidad de adsorción de Cr^{6+} contenida en un lixiviado de tiraderos de basura de la ciudad de Morelia. La aplicación de este caso de estudio puede extrapolarse a la limpieza de tiraderos de otras partes del país donde haya escurrimientos similares, de ahí la importancia del presente trabajo.

EXPERIMENTAL

La arcilla utilizada en todas las pruebas provino de la Mina de Agua Blanca, municipio de Ciudad de Hidalgo, Michoacán. A partir de resultados de investigaciones preliminares se determinó la granulometría adecuada como malla 14-30 serie Tyler.^{11,12} En los experimentos exploratorios se manejó un volumen constante de lixiviado de 50 mL, variando el peso de arcilla. Inicialmente, se dispuso de una arcilla constituida por montmorillonita, haloisita y ortoclasa (feldespato), con la composición Mg 0.36, Al 4.18, Si 27.36, K 1.15, Ca 0.64, Mn 0.19, Fe 1.44, O 64.68 (expresados como % atómico). Los datos sobre la determinación de su estructura inicial y composición se resumen en las secciones subsecuentes.

Proceso de activación de la arcilla

El proceso se realizó mediante el procedimiento establecido por Amirtharajah.¹³ La arcilla triturada se mezcló con una solución a 3.5% de ácido sulfúrico para formar una mezcla espesa; la proporción aproximada de la solución fue 35% del peso total de la arcilla. Posteriormente, se trató la mezcla con vapor a temperatura de 93 a 99°C durante 5 a 6 h. La mayor

* Universidad Michoacana de SNH.

Contacto: rsumich@gmail.com

** Universidad Autónoma de Nuevo León.

parte del ácido se consumió durante este tiempo y la mezcla tratada se vertió en agua limpia para después lavarse en un filtro prensa o en un sistema de espesamiento, para eliminar las sales formadas y el exceso de ácido. Una vez activado el material se secó en una estufa a 120°C durante 12 h.

Proceso de modificación de la arcilla

Este proceso consistió en la adición de cloruro de cetilpiridinio. Todos los reactivos empleados en este trabajo fueron marca Alfa-Aesar, grado reactivo. La técnica consistió en lograr una suspensión de 50 g de arcilla natural en 1 L de agua destilada y agregar 25 g de cloruro de cetilpiridinio; se mantuvo la suspensión en agitación durante 5 h, para luego dejarla reposar por un periodo de 24 h. A continuación las arcillas se lavaron varias veces hasta eliminar el exceso del agente modificante y se secaron en una estufa a 80°C durante 12 h.

Determinación del cromo hexavalente

Se midió la concentración de Cr^{6+} en cada muestra de arcilla para conocer el grado de remoción de este material, y demostrar su eficiencia en la disminución o eliminación de este metal en los lixiviados, con un espectrofotómetro HANNA modelo 991300. La metodología se basó en la reacción del Cr^{6+} , en medio ácido con la difenilcarbocida, lo cual dio como resultado un complejo con color, el cual absorbe energía luminosa a una longitud de onda de 540 nm.

Pruebas de adsorción

La experimentación se dividió en tres fases: pruebas con arcilla natural, y arcilla activada y pruebas con arcilla modificada. Se llevaron a cabo pruebas preliminares para establecer los intervalos de trabajo para la cantidad de arcilla a emplear. Para ello se utilizaron cantidades de 1, 3, 5, 7 y 10 g de la arcilla natural, mientras que para los estudios preliminares de arcilla activada o modificada se emplearon las cantidades de 0.1, 0.3, 0.7, 1, 1.3 y 1.5 g. Para incrementar el nivel de confianza en la experimentación se realizaron por triplicado las pruebas. Se agregó a cada una de las muestras 100 mL de solución de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en concentración de 4 mg/L. Estas muestras se dejaron durante 24 h a temperatura ambiente, y después se realizó la determinación de Cr^{6+} mediante la técnica con la difenilcarbocida, a una longitud de onda de 540 nm. Este procedimiento se siguió para la arcilla natural, arcilla activada y arcilla modificada. Una vez determinadas las

cantidades adecuadas de arcilla, se realizaron las pruebas con los lixiviados del tiradero de basura, el cual en promedio contenía 122 mg/L de Cr^{6+} . El estudio se efectuó con columnas de adsorción empacadas con 100 g de arcilla natural, activada o modificada, según fuera el caso, con flujo constante de lixiviado proveniente del tiradero municipal, para verificar la capacidad de adsorción de estos materiales.

Para efecto de simplicidad, dados los diferentes tratamientos de la arcilla, se adoptó la siguiente nomenclatura: AAC= arcilla activada contaminada, AASC= arcilla activada sin contaminar, AMC= arcilla modificada contaminada, AMSC= arcilla modificada sin contaminar, ANC= arcilla natural contaminada, ANSC= arcilla natural sin contaminar. En todos los casos el Cr^{6+} se consideró el contaminante.

Caracterización

El área superficial la determinó un analizador de área superficial Micrometrics Gemini 2060 RIG-100 por adsorción con nitrógeno a 77K. Se utilizaron 0.2 g de muestra para cada caso. Para evaluar el área específica de los catalizadores se se utilizó el modelo Brunauer-Emmett-Teller (BET). Para caracterizar los materiales se empleó un difractómetro de rayos X Siemens, modelo D-5000, operado a un voltaje de 30 KeV y 20 mA de corriente, con un paso de 0.02°/min analizando en un intervalo de 10 a 70° (2θ). Se obtuvieron imágenes con un Scanning Microscope JSM-6400 JEOL Noran Instrument, a un voltaje de 20 KeV y una presión de 10^{-6} Torr.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Área específica

Los resultados de área específica, obtenidos a través de la técnica estándar que emplea el método BET, se llevaron a cabo por triplicado para obtener un valor promedio (tabla I). Para la arcilla natural (ANSC) se obtuvo un valor de 130 m^2/g . En comparación, la misma arcilla contaminada con cromo (ANC) no tuvo un decremento en el valor de área superficial importante; lo mismo ocurrió para la arcilla activada sin Cr^{6+} (AASC) y la arcilla activada contaminada (AAC). De lo anterior se concluye que la activación con ácido sulfúrico no modificó substancialmente la porosidad. No obstante que al realizar el lavado con ácido sulfúrico se remueven parcialmente los iones de aluminio, hierro y magnesio; aparentemente, sólo se ha saturado con hidrógeno, con lo cual se obtendrán arcillas altamente cargadas y proclives a realizar intercambio iónico o

reacción. Para el caso de las arcillas modificadas sin contaminar (AMSC) y aquellas contaminadas con Cr^{6+} (AMC), se observó una disminución en el valor de área superficial cercano a 76% al modificar y contaminar la arcilla y una disminución de 70% para la arcilla modificada no contaminada. Con esto se deduce que ha ocurrido un reacomodo importante en la estructura cuando ésta fue modificada mediante la adición de la molécula de cetilpiridinio.

Difracción de rayos X

Tabla I. Áreas superficiales específicas determinadas por el método BET.

| Muestra | S _{BET} (m ² g ⁻¹) |
|---------|--|
| AAC | 135 |
| AASC | 130 |
| AMC | 30 |
| AMIC | 30 |
| ANC | 130 |
| ANSC | 130 |

Mediante esta técnica se identificaron las fases principales en la arcilla estudiada. De manera previa, se realizó un análisis mediante la técnica de absorción atómica para conocer el contenido elemental de los constituyentes de la arcilla. Fue posible establecer que las fases predominantes son la montmorillonita (esmeclita), haloisita (caolinita) y ortoclasa (feldespato) de acuerdo a la base de datos PDFWIN 2008, la cual corresponde a las tarjetas de difracción 13-0135, 29-1489 y 71-0957, respectivamente. En la figura 1 se indican los planos correspondientes a cada fase.

Microscopía electrónica de barrido y microanálisis EDS

La figura 2 contiene las imágenes SEM de la arcilla natural y de las arcillas obtenidas a través de la modificación o la activación. La arcilla natural mostró granos con tamaño promedio de 10 μm . A esta amplificación (2000X) no se apreció algún arreglo cristalino preferencial.

En comparación, la arcilla natural contaminada con Cr^{6+} presentó tamaños de grano superiores a las 10 μm ; sin embargo, de manera global no se apreciaron cambios significativos. Al comparar las arcillas activadas, no contaminadas (AASC), con aquellas que contienen Cr^{6+} (AAC), se encontró que los tamaños de grano son superiores a los obtenidos para la arcilla natural, lo cual se atribuye al tratamiento químico. En apariencia, los granos son más porosos y amorfos. Con respecto a

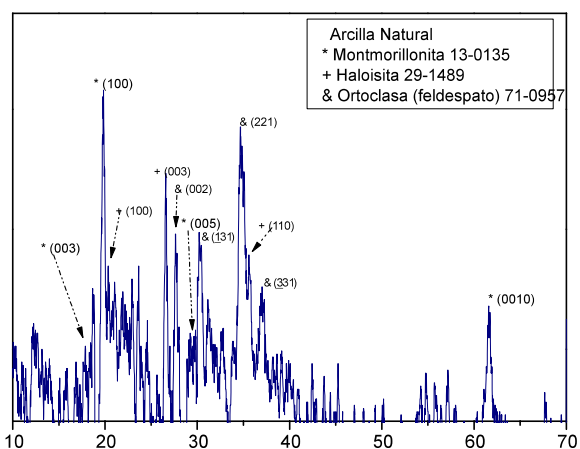


Fig. 1. Patrón de difracción de rayos-X de la arcilla inicial muestra los compuestos principales: monmorillonita, haloisita y ortoclasa. Se indican los planos principales para cada especie y en el recuadro el número correspondiente a la base de datos PCPDFWIN 2005, tarjeta 130135.

las imágenes que corresponden a las arcillas modificadas (AMSC) y su contraparte contaminada con Cr^{6+} (AMC), su tamaño de grano es de 100 μm . Este material resultó más aislante, ya que al observarse bajo el bombardeo de electrones se formaban zonas de carga con facilidad. En este caso los gra-

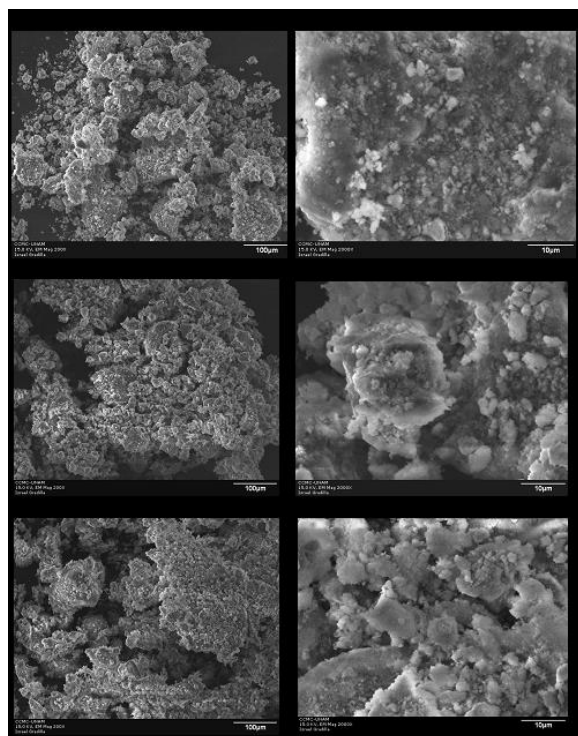


Fig. 2 a. Fotomicrografías de microscopía de barrido de la arcillas natural ANSC, modificada sin contaminar (AMSC), y activada contaminada con cromo AAC.

nos se encontraron asociados en forma de hojuelas. A través del análisis EDS se detectó cloro en un porcentaje de 0.45%.

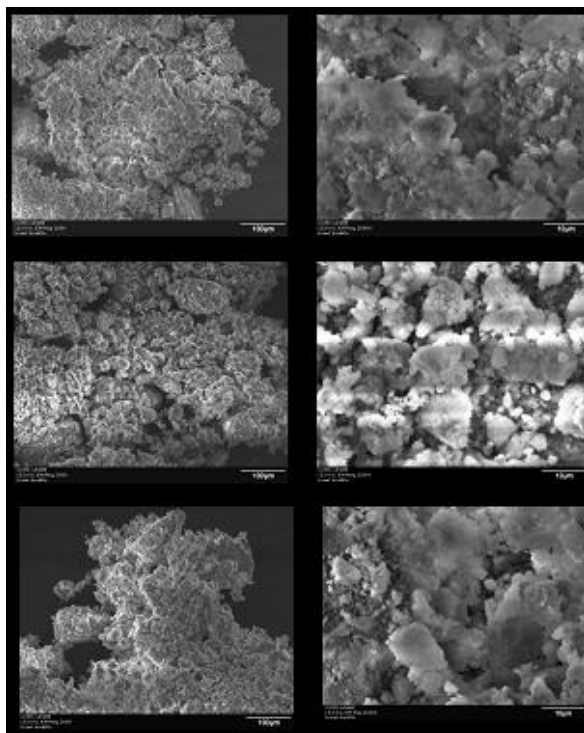


Fig. 2b Fotomicrografías de microscopía de barrido de la arcilla modificada sin contaminar (AMSC), modificada contaminada con cromo (AMC) y arcilla natural contaminada (ANC).

La tabla II muestra los análisis EDS correspondientes a las arcillas natural, modificada y activada sin contaminación. De acuerdo a estos resultados, la composición elemental de la arcilla natural en porcentaje atómico fue de Mg = 0.36, Al = 4.18, Si = 27.36, K = 1.15, Ca = 0.64, Mn = 0.19, Fe = 1.44 y O = 64.68. Para la muestra activada se detectó un contenido de azufre de 0.86%. En el caso de la muestra modificada, no fue posible establecer el contenido de hidrógeno en la arcilla debido a la limitación de la técnica. Se observa una reducción en el contenido de Mg, K, Ca y Fe, a consecuencia del ataque químico con ácido sulfúrico. Para el caso de la arcilla activada, se apreció una ligera disminución en los contenidos de Ca y Fe.

Pruebas de adsorción

Estas pruebas se dividieron en dos etapas: pruebas preliminares con una solución patrón con contenido similar a las que

Tabla II. Análisis elemental de la arcilla natural (ANSC), arcilla activada (AASC), arcilla modificada (AMSC) obtenidos mediante la técnica EDS.

| Elemento | ANSC | AASC | AMSC |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| <i>Porcentaje atómico</i> | | | |
| Mg | 0.36 | 0.26 | 0.34 |
| Al | 4.18 | 4.72 | 4.68 |
| Si | 27.36 | 26.44 | 27.35 |
| K | 1.15 | 0.95 | 1.11 |
| Ca | 0.64 | 0.30 | 0.41 |
| Mn | 0.19 | --- | --- |
| Fe | 1.44 | 0.30 | 1.31 |
| Oxígeno | 64.68 | 65.22 | 64.64 |
| S (H ₂ SO ₄) | ---- | 0.86 | ---- |

contienen los tiraderos y pruebas en columnas de adsorción con el material lixiviado de los tiraderos.

Las pruebas de adsorción se muestran en la figura 3, tanto para la arcilla natural y las sometidas a activación, modificación y que fueron contaminadas con Cr⁶⁺. Las imágenes 4 a)-c) corresponden a las pruebas realizadas en las arcillas con una solución patrón de 4 mg/L de K₂Cr₂O₇, de acuerdo al procedimiento experimental descrito anteriormente. Los resultados preliminares de los lixiviados tratados con arcilla natural (ANSC) demuestran que se obtuvo una remoción de Cr⁶⁺ de 21.58%. Este valor es comprensible debido a que, inicialmente, el material está saturado con calcio, magnesio u otros elementos que no permiten la adsorción del Cr⁶⁺. De manera diferente ocurrió al emplear la arcilla activada (AASC), para la cual se apreció 95.37% de remoción. Por ende, se considera, que la inclusión de hidrógeno en la estructura de la arcilla, junto a la gran cantidad de enlaces sueltos promovidos por el tratamiento con ácido sulfúrico, resulta en una avidez de la arcilla, en este caso, por el Cr⁶⁺. Para el caso de la arcilla modificada con la molécula de cetilpiridinio, encontramos contenidos de cromo de 97.68%, el cual es ligeramente superior al resultado obtenido con el proceso de activación.

A continuación se realizaron pruebas para la remoción de Cr⁶⁺ con columnas de adsorción con los lixiviados del tiradero de basura, y los resultados de las mismas se resumen en las figuras 4 d)-e). De acuerdo a la figura 4 d), se encontró para la arcilla activada una remoción de Cr⁶⁺ de 98%, en un volumen inicial de 50 mL de la columna; sin embargo, esta eficiencia decayó por la presencia de materia orgánica contenida en los lixiviados, la cual también tiende a reaccionar con el hidrógeno y, a su vez, contamina una proporción importante de sitios activos en la arcilla. En el caso de la arcilla modificada se logra una remoción inicial de Cr⁶⁺ del 93.8%. Pero a diferencia de la

arcilla activada (AAC), la arcilla modificada (AMC) resulta más selectiva hacia el Cr^{6+} , y su remoción se prolonga por un mayor volumen de la columna, según se observa en la figura 4 e). De acuerdo con este resultado, la arcilla modificada tendría una vida útil más prolongada.

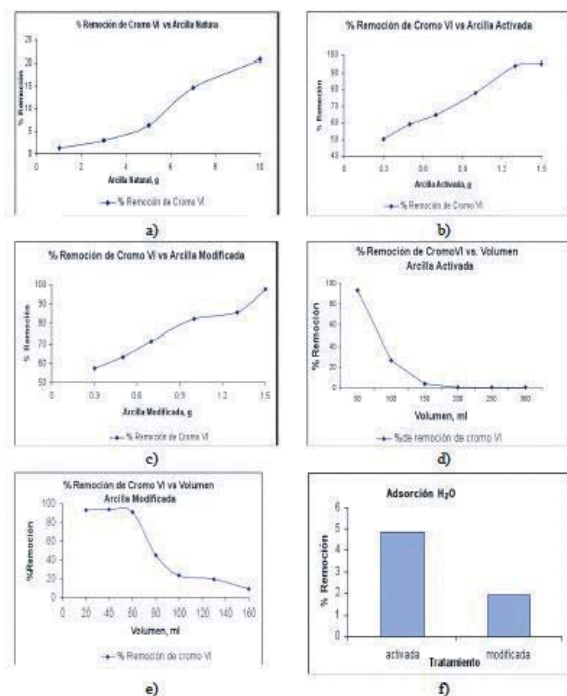


Fig. 3. Gráficos de porcentaje de remoción de cromo mediante las arcillas naturales, modificada o activada. Las figuras a)-c) corresponden a las pruebas preliminares. Figuras d)-e) corresponden a las pruebas efectuadas en las columnas de adsorción. La figura f) es el volumen de adsorción de agua para las arcillas activada o modificada después de ser comprimidas y tratadas térmicamente.

El tiempo de residencia determinado en las columnas para el lixiviado fue de 65 min como promedio (figura 4).

Se llevaron a cabo pruebas de adsorción como función del tiempo para la arcilla modificada, las cuales se muestran en la figura 5. Se aplicaron las mismas condiciones experimentales en la columna de adsorción y con un lixiviado con 122 mg/L de Cr^{6+} . En la figura 6 se observa que en un tiempo de una hora se ha removido 100% del Cr^{6+} . Este comportamiento se mantiene por espacio de 100 min antes de apreciar un decremento en la eficiencia de la arcilla. Lo anterior permite asegurar que la arcilla modificada posee selectividad hacia el Cr^{6+} , por lo que su tiempo de saturación se incrementa.

% Remoción de Cr^{VI} vs tiempo de residencia en MA Activada

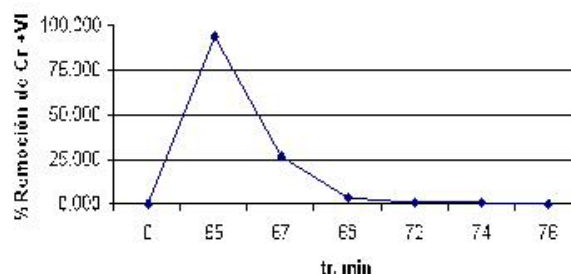


Fig. 4. Remoción de Cr^{6+} con columna empacada de MA activada.

% Remoción de Cr^{VI} vs tiempo de residencia en MA Modificado

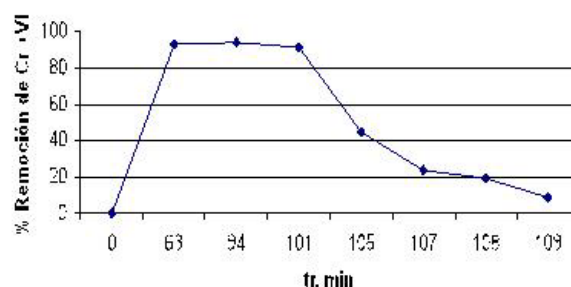


Fig. 5 Remoción de Cr^{6+} como función del tiempo de residencia.

Estudios de encapsulamiento de las arcillas contaminadas

Se realizaron pruebas para estudiar un método de encapsulamiento de las arcillas contaminadas. El propósito de esta etapa del trabajo fue presentar una alternativa en la que el tratamiento final de las arcillas que se utilizaron en el proceso de retención Cr^{6+} puedan confinarse de tal manera que resulten inocuas, o bien, se reutilicen. Para ello se secaron y se molieron, tamizándose a través de la malla 100 serie Tyler, con lo cual se obtuvo una granulometría homogénea. Posteriormente, se compactaron estos polvos en una prensa a 10 ton/cm² para formar probetas, según se observa en la figura 6. Éstos se calcinaron a 1100°C durante una hora. Las probetas se enfriaron en el horno, a fin de evitar choques térmicos. Éstas se analizaron mediante microscopía SEM con electrones secundarios y retrodispersados (figura 6), en que se localizan las zonas donde se encuentra alojado el Cr^{6+} .

Las áreas que muestran contraste son zonas con una elevada concentración de Cr^{6+} . Las figuras 6 a), 6 b) y 6 c) corres-

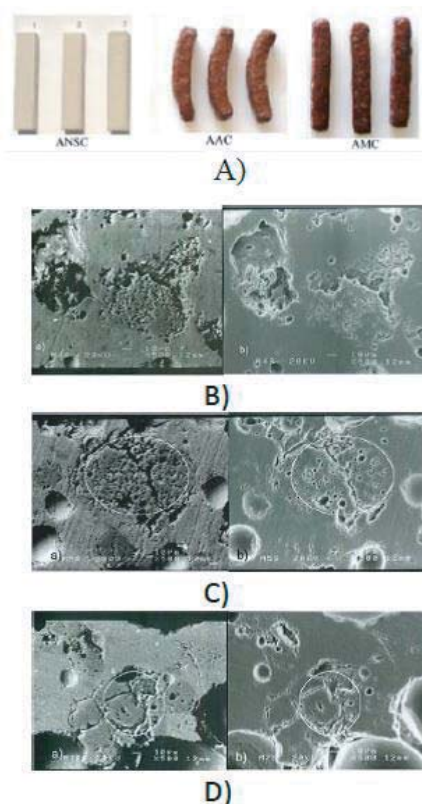


Fig. 6. Fotomicrografías de microscopía de barrido de las arcillas encapsuladas. Figura A) probetas de las arcillas natural, activada contaminada y modificada contaminada, B) arcilla natural, C) arcilla activada contaminada con lixiviados, D) arcilla modificada contaminada con lixiviados. a) Imagen de electrones retrodispersados, b) imagen de electrones secundarios.

ponden a las muestras de arcilla natural, arcilla activada contaminada con lixiviados y arcilla modificada contaminada con lixiviados, respectivamente. A continuación se realizaron pruebas de lixiviación en ácido acético glacial a 4%, de acuerdo bajo norma, lo cual permitió determinar, bajo condiciones de acidez, la liberación de Cr^{6+} . Los resultados se muestran en la figura 6 f), y se encontró una liberación de 5% de Cr^{6+} para la arcilla activada y de apenas 2% para la arcilla modificada. Una ventaja adicional de la sinterización a alta temperatura es que la arcilla aumenta su acidez, reduce el Cr^{6+} a trivalente y disminuye con ello la toxicidad del metal. Se concluye que el encapsulamiento y el tratamiento térmico son un medio favorable para la contención del Cr^{6+} .

CONCLUSIONES

Se encontró que los procesos de activación y de modificación química de la arcilla en estudio son favorables para remover el

Cr^{6+} . También se observó que la inclusión de la molécula de cetilpiridinio promueve la selectividad de la arcilla, mejora la eficiencia y el tiempo de vida útil de este material. Se lograron eficiencias de remoción de Cr^{6+} de 95.37% para la arcilla activada y de 97.68% para la arcilla modificada. El manejo de materiales menos agresivos al medio ambiente y la reducción de costos en el tratamiento de contaminantes, con respecto a los procesos tradicionales y la disposición final de los contaminantes, también representan un obstáculo para la aplicación de algunas tecnologías. La presente investigación aporta un método que reduce la afectación por lixiviados provenientes de los tiraderos de basura. El empleo de este procedimiento podría aplicarse a las industrias del electroplatinado, del curtido, al igual que en aguas residuales, en todas éstas como filtros y tratamiento final de los contaminantes.

RESUMEN

Se presenta el estudio de arcillas naturales, las cuales se activaron y modificaron con el objetivo de remover Cr^{6+} proveniente de lixiviados de tiraderos municipales de basura. La activación se realizó mediante una solución de ácido sulfúrico diluido (3.5% w/w). Para la modificación, se adicionó cloruro de cetilpiridinio (CPC). La concentración inicial de Cr^{6+} en el lixiviado fue 122 mg/L. El porcentaje de remoción logrado con la arcilla activada fue de 93.6%, mientras que para la arcilla modificada fue de 93.8%; sin embargo, la vida útil de esta última es más prolongada.

Palabras clave: Lixiviado, Cromo hexavalente, Arcilla activada, Arcilla modificada, Eliminación de contaminantes.

ABSTRACT

The present work was addressed to study natural clays which were modified or activated, in order to determine their capability to remove the Cr^{6+} contained in the leachate from a garbage dump. The activation was performed using diluted sulphuric acid (3.5% w/w). To obtain the modified clay, it was reacted with cethyl pyridinium chloride (CPC). Initially, the Cr^{6+} content was 122 mg/L. The removal percentage was 93.6 for activated clay and 93.8 for the modified clay; the latter being useful for a longer period of time. It is considered that this method provides outstanding results.

Keywords: Leaching, Hexavalent chromium, Modifiable clay, Activated clay, Pollutant removal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a I. Gradilla y E. Aparicio, del CNyN-UNAM, por su apoyo en la obtención de imágenes de SEM y análisis XRD, respectivamente. G. Martínez, R. Rangel y A. Cortés agradecen a la Coordinación de Investigación Científica-UMSNH.

REFERENCIAS

1. McBride, M.M. (1994). Trace and Toxic Elements in Soils (P. 308, Cap. 9) in *Environmental chemistry of solids*. Oxford University Press.
2. Namasivayam, C., Ranganathan, K. (1993). Waste Fe(III)/Cr(III) hydroxide as adsorbent for the removal of Cr(VI) from aqueous solution and chromium plating industry wastewater. *Environm. Poll.* 8, 255-261.
3. Krishna, B.S., Murty, D.S.R. and Jai Prakash, B.S. (2001). Surfactant-modified clay as adsorbent for chromate. *App. Clay Sci.* 20, 65-71.
4. Carriazo, J.G., Moreno-Forero, M., Molina, R.A., Moreno, S. (2010). Incorporation of titanium and titanium-iron species inside a smectite-type mineral for photo catalysis. *App. Clay Sci.* 50, 401-408.
5. X. and Xu. J.(2006). A new application of clay-supported vanadium oxide catalyst to selective hydroxylation of benzene to phenol. *App. Clay Sci.* 33, 1-6.
6. Kennedy-Oubagaranadina, J.U. and Murthy, Z.V.P. (2010). Isotherm modeling and batch adsorber design for the adsorption of Cu(II) on a clay containing montmorillonite. *App. Clay Sci.* 50, 409-413.
7. Chaara, D., Pavlovic, I., Bruna, F., Ulibarri, M.A., Draoui, K. and Barriga, C. (2010). Removal of nitrophenol pesticides from aqueous solutions by layered double hydroxides and their calcined products. *App. Clay Sci.* 50, 292-298.
8. Carretero, M. Isabel. (2002). Clay minerals and their beneficial effects upon human health. A review. *App. Clay Sci.* 21, 155-163.
9. Viseras, C., Cerezo, P., Sanchez, R., Salcedo, I. and Aguzzi, C. (2010). Current challenges in clay minerals for drug delivery. *App. Clay Sci.* 48, 291-295.
10. Putnis, A. (1992). *Introduction to Mineral Sciences*. Cambridge University Press.
11. Martínez, H.G. (2004). Reducción de color en la Industria Papelera usando un Material Arcillosos extraído de la Mina Agua Blanca. Tesis de Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental. IPN, México, DF.
12. García-Flores, S.A. (2006). Diseño de un proceso para la remoción de Cr (VI), empleando una mezcla arcillosa como barrera reactiva, a nivel laboratorio. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería Química UMSNH.
13. Amirtharajah, A., Mills, Kirk M. (1982). Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation. *Journal AWWA*, 74, 1-7.

Recibido: 02/04/14
Aceptado: 19/10/14