



SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE COMPOSITOS A BASE DE POLISILOXANOS Y ORGANOARCILLAS PARA SU POSIBLE APLICACIÓN EN LA REMOCIÓN DEL CROMO HEXAVALENTE

Amy Pamela Montiel Carrillo ^a, Karla Yuritzi Alvarez Rivera ^a, Araceli Jacobo Azuara ^{a,*},
Guillermo Manuel González Guerra ^a, Rebeca Yasmín Pérez Rodríguez ^a

^aDepartamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato,
Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Colonia Noria Alta, Guanajuato, Gto., 36050,
MÉXICO.

aazuara@ugto.mx

Resumen

El desarrollo de nuevos materiales para su aplicación en procesos de remediación ambiental se ha ido desarrollando en los últimos años, entre los materiales que han despertado interés en la academia y en el área tecnológica, se encuentran los materiales híbridos. En este trabajo se sintetizó una organoarcilla, utilizando un surfactante catiónico como el HexaDecilTrimetilAmonio (HDTMA) sobre la superficie específica de la nanoarcilla; y un Polisiloxano Per Arilado para utilizarlo como soporte. Las pruebas de caracterización por TGA permitieron comprobar la presencia del surfactante en la nanoarcilla, observándose una pérdida de peso entre los 200 y 400 °C. La máxima capacidad de adsorción de la organoarcilla fue de 2 mg/g para la adsorción Cromo VI. Las curvas de decaimiento de concentración de Cromo VI muestran que el proceso de adsorción está regido por el transporte externo de masa.

Palabras clave: Composito, Adsorción, Organoarcilla.

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF POLYSILOXANE- AND ORGANOCLAY-BASED COMPOSITES FOR POSSIBLE APPLICATION IN THE REMOVAL OF HEXAVALENT CHROMIUM

Abstract

The development of new materials for their application in environmental remediation processes has been developing in recent years, among the materials that have aroused interest in academia and in



the technological area are hybrid materials. In this work an organoclay was synthesized, using a cationic surfactant such as HexaDecylTrimethylAmonium on the specific surface of the nanoclay; and a Per Arylated Polysiloxane to use it as support. Characterization tests by TGA allowed for verification of the presence of the surfactant on the nanoclay, observing a weight loss between 200 and 400 °C. The maximum adsorption capacity of the organoclay was 2 mg/g for Chromium VI adsorption. The concentration decay curves of Chromium VI show that the adsorption process is governed by external mass transport.

Keywords: Composite, Adsorption, Organoclay.

1. Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para la vida, por lo cual constituye una necesidad básica para la salud. El acceso a agua, saneamiento e higiene es un derecho humano. Sin embargo, miles de millones de personas se enfrentan a la dificultad para acceder a los servicios más elementales. Aproximadamente 1,800 millones de personas en todo el mundo utilizan una fuente de agua potable que está contaminada por sustancias químicas orgánicas e inorgánicas (Objetivos de desarrollo sostenible, 2013).

En los últimos años la disponibilidad de esta se ha reducido debido al crecimiento exponencial de la población y el gran desarrollo industrial. Habitualmente el agua potable proviene de fuentes superficiales como lagos, ríos, manantiales y subterráneas. Es precisamente en estos

puntos donde desembocan los efluentes de las industrias, concentrándose una gran cantidad de compuestos tóxicos en el agua. Las fuentes de contaminación de los sistemas acuáticos pueden ser naturales y antropogénicas. La primera son procesos propios de la naturaleza tales como las erupciones volcánicas, erosión del suelo, mientras que la contaminación antropogénica es producida por actividades del hombre como la agricultura, industrias metalmeccánicas, actividades mineras, entre otras (Padilla, 2013).

En México existe un marco normativo regulador para la prevención de contaminación por cromo hexavalente dichas normas son: NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-052-SEMARNAT-2005 (Comisión nacional del agua, sf). Estas especifican los límites



permisibles de Cromo hexavalente en los efluentes.

Lamentablemente el crecimiento demográfico y la inexistencia de compromiso social por la deposición correcta de estos contaminantes ha incrementado exponencialmente el daño al medio ambiente.

Por este motivo, es necesario plantear soluciones viables y amigables con el ambiente para eliminar este contaminante, una propuesta potencial lo son las membranas híbridas, las cuales están compuestas por componentes orgánicos e inorgánicos que poseen una sinergia apta para el tratamiento de estos contaminantes. Valladares (2014), Ayala y col. (2006), Rubio y col. (2015), Pabón y col. (2020), Zaruma y col. (2018) y Gil y col. (2012) mencionan que existen diferentes procesos de remoción de este tipo de contaminante, como la filtración por membranas, procesos de oxidación avanzada, coagulación-floculación, fotocatalisis, electrocoagulación y adsorción.

En este trabajo se utilizará el proceso de adsorción, la cual es un proceso de separación y concentración de uno o más componentes de un sistema sobre una

superficie líquida o sólida. Este fenómeno tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una disolución. Debido a que la adsorción es un fenómeno superficial, los buenos adsorbentes deben tener una estructura muy porosa para que exista una relación alta de área superficial a volumen (Guzmán y col., 2013). Existen una gran variedad de adsorbentes, entre los más utilizados; están los carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas, perlas de sílice y plantas o desechos lignocelulósicos son algunos de los adsorbentes, generalmente con procesos variados de modificación química, comúnmente empleados para remover colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos generados por diferentes tipos de industrias (Rubio y col., 2015). Sin embargo, en la actualidad se han desarrollados nuevos adsorbentes, los cuales se caracterizan por sus propiedades fisicoquímicas estables, su bajo costo y sustentabilidad. Entre ese tipo de adsorbentes novedosos, se encuentran las membranas híbridas, las cuales se caracterizan en que las partículas inorgánicas (adsorbentes) se dispersan en una matriz polimérica. Existen distintos



tipos de estructuras de nanocompuestos híbridos como lo son de tipo aglomerado, intercalado y exfoliado. El material correspondiente a menudo se denomina membrana de matriz mixta (MMM). Este diseño ofrece la posibilidad de combinar la fácil procesabilidad del polímero y el rendimiento superior de separación de gases de los materiales inorgánicos (Zornoza, 2011). Las aplicaciones de las membranas híbridas son muy amplias, entre las que más destacan la separación de mezclas gaseosas, la separación de CO₂ y el tratamiento de aguas residuales (Susana (2011), Mahajan (1999) y Perera y col. (2019)). Otras aplicaciones que van surgiendo son en la producción de celdas de combustible y la adsorción de contaminantes, esta última de gran importancia en el presente proyecto, ya que permitirá buscar la sinergia de dos materiales para potencializar la adsorción de contaminantes como los colorantes y el cromo, los cuales presentan una gran problemática como se ha mencionado anteriormente. El objetivo de este proyecto fue desarrollar un composito a partir de una película de polímero inorgánico como el polisiloxano funcionalizada con grupos orgánicos de una organoarcilla, para su uso

en la remoción de cromo hexavalente en agua mediante el proceso de adsorción.

2. Metodología Experimental

2.1. *Síntesis del Polisiloxano y Organoarcilla*

La síntesis del material polisiloxano Per Arilado (PPA) se realizó mediante el mecanismo general de la hidrólisis de clorosilanos, siguiendo la metodología propuesta por González-Guerra (2022), la cual consiste en adicionar con agitación magnética THF seco a una mezcla de difenil diclorosilano (Ph₂SiCl₂), trifenil clorosilano (Ph₃SiCl) y el fenil clorosilano (PhSiCl₃); en relación molar 6:2:1 respectivamente, a un matraz de dos bocas conservando una atmósfera de N₂. Posteriormente manteniendo agitación magnética, gota a gota durante dos horas se adicionaron 60 mL agua desionizada por dos horas. Una vez finalizada la hidrólisis se mantuvo en reflujo durante 24 horas a temperatura de ebullición del disolvente THF (65 °C aproximadamente). Finalmente, se realizó el secado del disolvente y del agua utilizando el rotavapor, por 2 horas aproximadamente. Para la síntesis de la organoarcilla se utilizó una arcilla tipo bentonita y un surfactante catiónico



(HDTMA). Se pesaron 25 g de arcilla y se pusieron en contacto con una solución de 60 mmol/L de HDTMA durante 5 días a temperatura ambiente hasta alcanzar el equilibrio. Posteriormente, se separó la organoarcilla por decantación y se realizaron varios lavados con agua desionizada para eliminar el exceso de surfactante, se filtró y se secó en una estufa a temperatura de 80 °C durante 24 horas, una vez seca la organoarcilla se molió en un mortero de ágata y se tamizó para tener un tamaño de partícula uniforme (Jacob-Azuara, 2007).

2.2. Estudio de la solubilidad para la fabricación películas

Posterior a la obtención del PPA y la organoarcilla, se realizó un estudio de solubilidad para poder fabricar las películas de los materiales. Dicho estudio, se basó en encontrar un disolvente que tuviera polaridad similar a ambos materiales. En la tabla 1 se muestran los disolventes utilizados para realizar la prueba de solubilidad. La prueba consistió en añadir 5 ml de disolvente a 1 g de material precursor, según sea el caso puede ser bentonita, organobentonita y PPA para posteriormente agitar por unos minutos y

visualmente distinguir si el material se disolvió en el solvente.

Tabla 1. Solventes utilizados para prueba de solubilidad para bentonita, organobentonita y polisiloxano per arilado.

Solvente
Acetona
Acetonitrilo
Cloroformo
Diclorometano
Etanol
Dimetilsulfoxido
Metanol
Tetrahidrofurano

2.3. Organoarcilla soportada en una película de PPA

El soporte de la organoarcilla sobre la película de polisiloxano se realizó siguiendo la siguiente metodología. Se tomó una alícuota de polisiloxano al 15 % en una solución de cloroformo y se depositó sobre un portaobjeto de vidrio hasta obtener una superficie homogénea, después se tomaron 5 gramos de organoarcilla en una solución de acetona y



se fue depositando por capas sobre la superficie del polisiloxano (ver Figura 1).

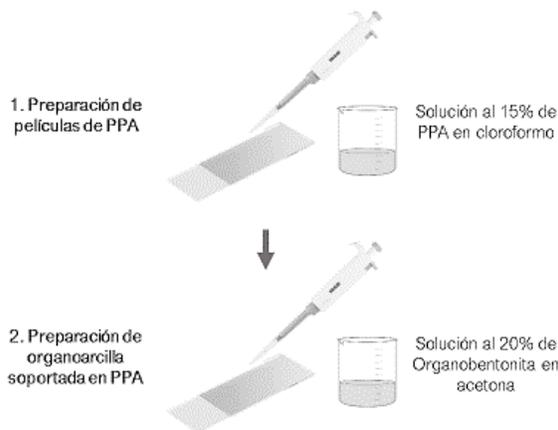


Figura 1. Metodología propuesta para la preparación de organoarcilla soportada en una película de PPA. Fuente: propia.

2.4 Microscopía óptica de la organoarcilla soportada en una película de PPA

Seguido de la obtención de las películas, es de especial importancia realizar un estudio que permita analizar la homogeneidad de las películas fabricadas. En este sentido, se tomaron fotografías de las películas fabricadas como se describe en la sección 2.3, en un microscopio óptico marca Leica Microsystems, modelo DM750 con 640 aumentos.

2.5. Caracterización Físicoquímica de la Organoarcilla

La caracterización de las propiedades físicoquímicas de la organoarcilla se realizó mediante las pruebas de Absorción Atómica por Emisión de Plasma, Termodesorción Programada, Espectroscopía de Infrarrojo para determinar la composición química, estabilidad térmica y grupos funcionales de la arcilla y organoarcilla, respectivamente. Se realizó también la prueba de Capacidad de Intercambio Catiónico, para medir la cantidad de sitios intercambiables de arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener. Este método consiste en la saturación de la arcilla con un catión electrolíticamente fuerte, como el sodio, para luego reemplazar estos lugares por iones cuya fuerza electrolítica es menor, como el amonio, de esta forma todo el sodio que se adhirió a la parte aniónica de la arcilla quedará en solución y podrá ser medido por técnicas como absorción atómica. La capacidad de intercambio catiónico se estimó por medio de la siguiente ecuación:



$$CIC = \frac{[Na^+]V100}{mPM} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde $[Na]$ corresponde a la concentración de Na en la solución intercambiante [mg/L], V al volumen de la solución intercambiante [L], m a la masa de la organoarcilla [g] y PM el peso molecular de Na * (234 g/mol = 23 mg/meq)

Los sitios ácidos y básicos presentes en la arcilla y la organoarcilla se determinaron por un método de titulación ácido-base propuesto por Boehm. El cuál consistía en neutralizar los sitios ácidos con una solución patrón 0.1 N de NaOH y los sitios básicos con una solución patrón de 0.1 N de HCl.

2.6. Pruebas de Equilibrio y Cinética de Adsorción

Las pruebas de equilibrio de adsorción de los colorantes y del Cromo VI se realizaron en un adsorbedor de lote a temperatura constante de 25 °C (Figura 2) mediante el siguiente procedimiento. Se pesaron 0.5 g de organoarcilla y se pusieron en contacto en una solución de 50 mL de concentración inicial de 20 ppm Cromo VI, a un pH entre 2 y 10. Los experimentos de equilibrio se llevaron a cabo durante 7 días y se ajustó el pH cada 24 horas. Una vez transcurridos los

7 días se tomó una alícuota y se midió la concentración en equilibrio por medio de la técnica de Espectrofotometría de UV-Visible, marca Shimadzu, modelo 2401.

La concentración del Cromo VI se determinó utilizando un método colorimétrico formando un complejo. Se prepararon estándares a diferentes concentraciones de $K_2Cr_2O_7$ y pH 1.5-2.0, utilizando agua desionizada y ácido sulfúrico; así como la solución de 1,5-difenilcarbazida en acetona al 5%. Se prepararon las curvas de calibración de cada colorante en un rango de 450 nm a 350 nm. Para cada colorante se tomaron 23 muestras de cada minuto de la prueba de adsorción cinética y se siguió para las distintas muestras a analizar.

Las pruebas de cinética de adsorción se realizaron en un reactor en lote a $T = 25\text{ °C}$ y con control de pH (Figura 3). Estas pruebas permiten describir la velocidad de adsorción entre el adsorbato y el adsorbente, así como para determinar si existen problemas de transferencia de masa como la difusión intraparticular (Mateos, 2012). La metodología seguida para dichas pruebas se presenta a continuación: primeramente, se rotularon tubos para los

tiempos de cinética, en cada muestra de Cromo VI se rotuló tomando un intervalo de tiempo de 0 a 120 minutos. Se preparó una solución de 20 ppm de Cromo VI. Se vertió la solución de 20 ppm al reactor con agitador magnético al igual que la organoarcilla y se colocó a una temperatura constante de 25°C. Se tomaron alícuotas para los tiempos descritos anteriormente. Finalmente, el pH se ajustó en la solución de Cromo VI.

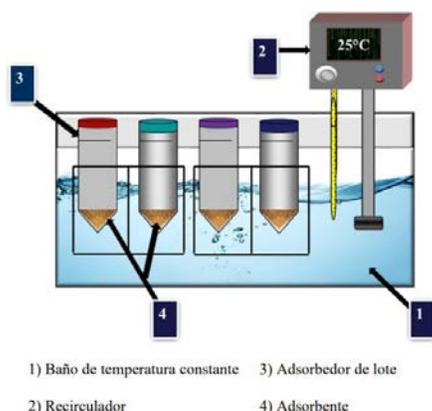


Figura 2. Adsorbedor en lote para pruebas de equilibrio. $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C_0 = 20\text{ ppm}$ y pH entre 2 y 10.

3. Resultados

3.1. Estudio de la solubilidad para la fabricación películas

En la Figura 4 se muestran las pruebas de organoarcilla con diferentes disolventes. El estudio de solubilidad para la materia prima en la fabricación de películas de PPA y

organobentonita contribuyen en la caracterización de dicho material.

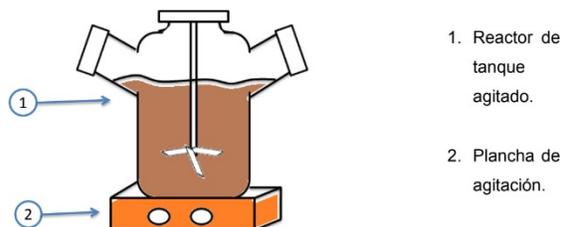


Figura 3. Reactor en lote para pruebas de cinética. $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C_0 = 20\text{ ppm}$ y pH entre 2 y 10.

Asimismo, permitieron determinar el solvente utilizado para la elaboración de las películas ya que se requiere que exista un medio en el cual el PPA y la organobentonita sean parcialmente solubles para que de esta forma puedan interactuar y posteriormente adherirse al soporte, en la tabla 2 se muestran los resultados del estudio de solubilidad en los distintos materiales que conforman las películas. Por esta razón se utilizó el cloroformo y la acetona para preparar las soluciones precursoras de PPA y organobentonita respectivamente.

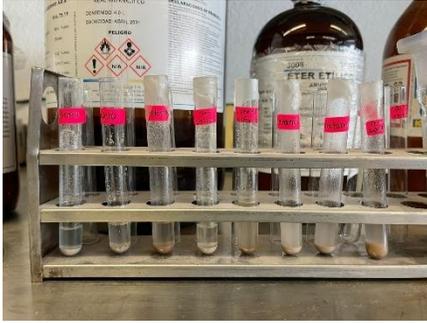


Figura 4. Pruebas de solubilidad de la organoarcilla con diferentes solventes orgánicos a $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 2. Resultados de estudio de solubilidad de PPA, Organobentonita y bentonita en distintos solventes.

Solvente	Organobentonita	Bentonita	PPA
Acetona	Parcialmente soluble	No soluble	Soluble
Acetonitrilo	Parcialmente soluble	Parcialmente soluble	No soluble
Cloroformo	Parcialmente soluble	No soluble	Parcialmente soluble
Diclorometano	No soluble	No soluble	No soluble
Etanol	Parcialmente soluble	Parcialmente soluble	Parcialmente soluble
Dimetilsulfóxido	Parcialmente soluble	No soluble	No soluble
Metanol	Parcialmente soluble	Parcialmente soluble	Parcialmente soluble

Tetrahydrofurano	No soluble	No soluble	Parcialmente soluble
-------------------------	------------	------------	----------------------

3.2. Microscopía óptica de la organoarcilla soportada en una película de PPA

Se obtuvieron las fotografías de la organoarcilla soportada en PPA antes y después de realizar las pruebas de equilibrio y la cinética de absorción de los materiales.

En la Figura 5, se puede observar el comportamiento que tienen los materiales para la posible formación de películas homogéneas.

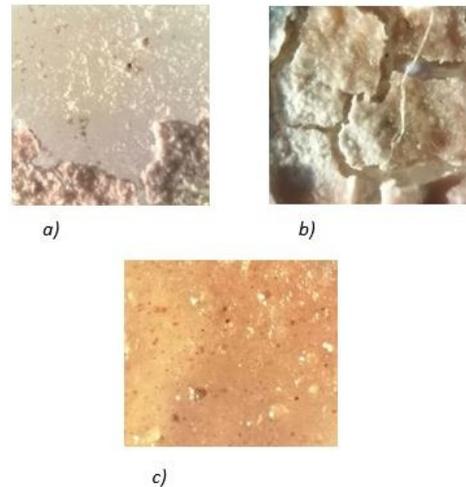


Figura 5. a) Región de los bordes de la película antes de la cinética. b) Región media de las películas antes de la cinética. c) Región media de las películas posteriores a la cinética.



Como se puede apreciar en las fotografías, en la formación de los materiales soportados en una película de PPA, se observa que hay ciertas regiones en donde se forma un film homogéneo, aunque quebradizo, resulta prometedor la interacción de los materiales, ya que puede abrir áreas de oportunidad para el estudio de proporciones entre ambos precursores para obtener películas mecánicamente resistentes. Finalmente, posterior a la cinética de adsorción, la película de los materiales se muestra intacta, y, de igual forma, homogénea, lo que resulta interesante para una aplicación en sistemas de remoción de metales.

Cabe resaltar, que la fabricación de películas con mejores propiedades plásticas requiere de un mayor análisis de variables, en función de las proporciones de la organoarcilla y el PPA, lo que le brindará ser menos quebradiza. Lo anterior, podrá perfilar como un material interesante al composito en las aplicaciones antes mencionadas.

3.3. Caracterización Físicoquímica

Los resultados de la composición química de la nanoarcilla y organoarcilla, obtenidos

por Absorción Atómica se muestran en la Tabla 3, se observa que no hubo variación significativa en el porcentaje de Silicio y Aluminio de la nanoarcilla con la presencia del surfactante HDTMA. En la Tabla 4 se muestran los resultados de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y sitios activos, se observa una disminución de la CIC, esto es debido a la presencia de la molécula del HDTMA sobre los sitios catiónicos de la nanoarcilla. La concentración de sitios básicos disminuyó 2.5 veces con respecto a la nanoarcilla.

Tabla 3. Composición química de la nanoarcilla y organoarcilla

Componente %	Nanoarcilla a	Organoarcilla a
SiO ₂	50.50	49.59
Fe ₂ O ₃	3.95	3.17
Al ₂ O ₃	15.63	15.86
K ₂ O	2.93	2.67
Na ₂ O	2.02	1.32
CaO	4.37	2.51
MgO	3.56	2.69
ppc 950°C	16.92	16.56
TOTAL	99.88	94.37

Tabla 4. Propiedades Físicoquímicas de Nanoarcilla y Organoarcilla

Adsorbente	Adsorbente e CIC meq/g	Sitios Ácidos meq/10 0 g	Sitios Básicos meq/10 0 g
Nanoarcilla	19.78	68	186
Organoarcilla a	14.34	70	75



Los resultados de Infrarrojo y TGA se muestran en las Figura 6 y 7, respectivamente. Se observa en la Figura 6 las bandas características del HDTMA a una longitud de onda de 3028 cm^{-1} , en la Tabla 5 se muestran las vibraciones características de la nanoarcilla y del surfactante. En la Figura 7 se observa claramente la presencia del surfactante en

la pérdida de peso entre los 200 y 500 °C, mientras que a temperaturas menores a los 200 °C se observan los picos correspondientes al agua superficial de la nanoarcilla y organoarcilla. Estos resultados indican que la síntesis de la organoarcilla se realizó correctamente.

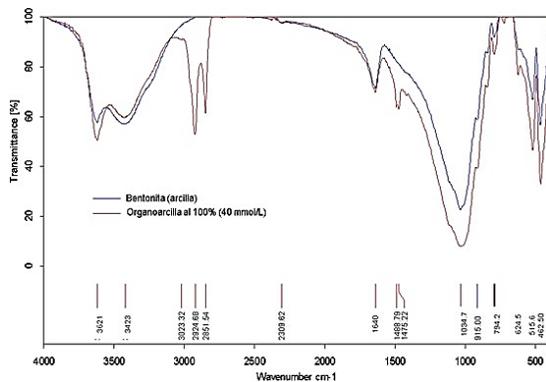


Figura 6. Espectros de IR para la nanoarcilla y organoarcilla.

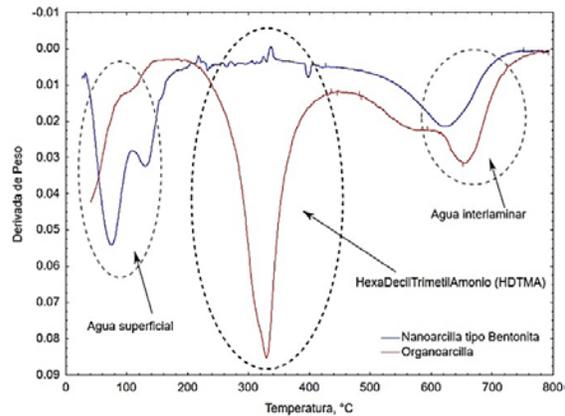


Figura 7. Curvas de TGA para la nanoarcilla y organoarcilla

Tabla 5. Longitudes de onda y tipo de vibración para Infrarrojo

Número de onda, cm^{-1}	Tipo de vibración
3023.32	Alargamiento de N-H por la presencia de la sal de amida de la molécula de surfactante presente en la superficie de la organoarcilla
2924.68 2851.54	Alargamiento de C-H por la presencia del grupo alcano (-CH ₂ -)
1640	Deformación de N-H
1488.79 1475.22	Deformación de C-H por la del grupo alcano (-CH ₂ -)
1034.7	Alargamiento de C-N



3.4. Isotermas de Equilibrio de Adsorción

Los datos cinéticos para la adsorción de contaminantes sobre la organoarcilla se muestran la Figura 8 para el Cromo VI. Para el caso de la adsorción de Cromo VI sobre la organoarcilla sola y la soportada en PPA, se observa que la curva de decaimiento en función de la concentración relativa presenta dos etapas de adsorción, en ambos casos. La primera etapa de adsorción es rápida lo que indicaría que el proceso se lleva a cabo por transferencia de masa externa y la segunda etapa corresponde únicamente al proceso de equilibrio, en donde se considera que el ion Cr (VI) es atraído por los sitios activos con carga positiva, posiblemente generados por el ion amonio del surfactante, es decir es probable que exista un mecanismo de atracción electrostática entre el ion de Cr (VI) y la superficie de la organoarcilla.

$$\%R = \left(\frac{C_0 - C_{eq}}{C_{eq}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde C_0 corresponde a la concentración inicial de Cr (VI) antes del proceso de adsorción y C_{eq} a la concentración final.

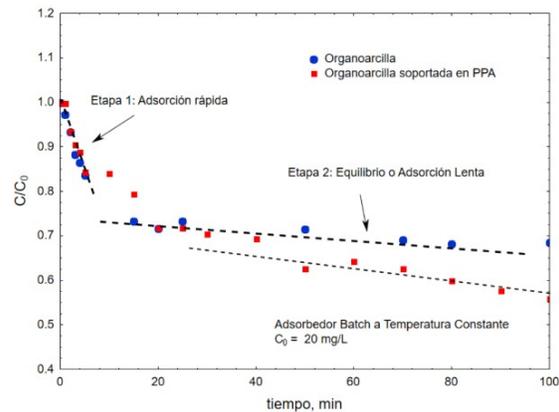


Figura 8. Curva de decaimiento de concentración relativa para el Cr (VI) sobre organoarcilla y organoarcilla soportada en PPA. $C_0 = 20$ ppm y $T = 25$ °C.

4. Conclusiones

Se logró sintetizar un material compuesto con propiedades hidrofóbicas y organofílicas, mediante la interacción de un polisiloxano y una organoarcilla para adsorber compuestos inorgánicos en agua como el Cromo Hexavalente.

La presencia del polisiloxano en forma de película permitió una mejor dispersión de la organoarcilla sobre la superficie del mismo, mejorando el área de contacto entre el ion Cr (VI) y los sitios catiónicos de la organoarcilla. Se obtuvo un porcentaje de remoción mayor al 90 %. Los resultados de caracterización fisicoquímica (TGA e IR) mostraron la presencia del surfactante en la nanoarcilla.



Las pruebas de cinética de adsorción mostraron un posible mecanismo de interacción del tipo de atracción electrostática tipo Van der Waals entre los sitios positivos de la organoarcilla y la carga negativa del ion Cr (VI).

5. Agradecimientos

Los autores del presente trabajo de investigación hacen un extenso agradecimiento a la M.C. Iris Violeta Hernández Cervantes y a la Q. Isela Paulina Castro Becerra, por su invaluable apoyo en la caracterización fisicoquímica de los materiales.

Referencias bibliográficas

Arias, M., Penichet, I., Ysambertt, F., Bauza, R., Zougagh, M., & Ríos, Á. (2009). Fast supercritical fluid extraction of low- and high-density polyethylene additives: Comparison with conventional reflux and automatic Soxhlet extraction. *The Journal Of Supercritical Fluids*, 50 (1), 22.

Ayala, M. E., Peñuela Mesa, G., & Montoya, J. L. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 38, 53-63.

A. Jacobo (2007). Adsorción de compuestos tóxicos en solución acuosa sobre organobentonita y zeolita modificada con surfactante. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Comisión nacional del agua. Normas Oficiales Mexicanas. (s.f.). NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997. Recuperado el 20 julio 2022 de:

<https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgaa-15-13.pdf>

G. M. González (2015). Evaluación de un polisiloxano per arilado sulfonado como ionómero en celda de combustible tipo PEM. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guanajuato.

Gavril, M., & Hodson, P. V. (2007). Investigation of the Toxicity of the Products of Decoloration of Amaranth by *Trametes versicolor*. *Journal of Environmental Quality*, 36(6), 1591–1598. Recuperado el 20 de julio de: <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0433>

Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia*, 7(2), 52-73.



- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 253- 262.
- Liguori, S., & Wilcox, J. (2018). Design Considerations for Postcombustion CO₂ Capture With Membranes. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, 385–413.
- Mahajan, R., Zimmerman, C.M., Koros, W.J., 1999. Fundamental and practical aspects of mixed matrix gas separation membranes. *ACS Symposium Series*. 733, 277e286.
- MATEOS M. (2012). Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Químicas Universidad Complutense de Madrid.
- Objetivos de desarrollo sostenible. (2013). Agua limpia y saneamiento (N.o 6). ABC color. Recuperado el 20 de julio de 2022 de: <https://doi.org/10.2478/s11814-009-0200-0>.
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.
- Padilla Ortega, E. (2013). Adsorción de metales pesados en solución acuosa sobre arcillas naturales, modificadas y bionanocomposites (Revisado ed., Vol. 1). *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.
- Perera-Mercado, Y. & Perez, Odilia & Castruita, G. & López, Nidia & Rodríguez, Sandra & Montes Luna, Angel. (2019). Modificación de zeolita NaY y preparación de membranas híbridas para separación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 325-337.
- Rubio, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Recuperado el 20 de julio de 2022 de: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8407/1/893736-2021-I-GA.pdf>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-052-SEMARNAT-2005. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx> (20 julio 2019).
- Susana V. (2011). Tratamientos de aguas residuales industriales con materia



orgánica no biodegradables. Escuela universitaria de ingeniería técnica industrial de Zaragoza. Recuperado el 20 de julio de 2022 de:

<https://zagan.unizar.es/record/5976?ln=es>

Valladares, D. (2014). Remoción de colorantes de aguas residuales de la industria textil, mediante el empleo de bagazo y microorganismos. Recuperado el 20 de julio de 2022 de:

<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/136/Tesis%20Dayami%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zaruma, P., Proal, J., Hernández, I. C., & Salas, H. I. (2018). Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: una breve revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, (19), 38-47.