

ADSORBENTES MODIFICADOS CON CTAB PARA LA REMOCIÓN DE Cr (VI) EN EFLUENTES REALES

CTAB MODIFIED ADSORBENTS FOR THE ELIMINATION OF Cr (VI) IN REAL EFFLUENTS

Damaris P. Santos-Santos¹; Brenda P. Vega-Soledad¹; Virginia Hernández-Montoya¹; José I. Bueno-López¹; Paola S. De Velasco-Maldonado^{1,*}

(1) Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos 1801 Ote., 20256, Aguascalientes-México
(e-mail: paola.vm.hq@aguascalientes.tecnm.mx)

Recibido: 03/02/2024 - Evaluado: 25/02/2024 - Aceptado: 24/03/2024

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue comparar la eficiencia de diferentes adsorbentes modificados con bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) en la remoción de cromo hexavalente (Cr (VI)) en agua proveniente de un efluente industrial. Se evaluaron hidróxido férrico (HF-SC), carbón activado de cáscara de coco (CC-SC) y zeolita (ZC-SC). Las pruebas de adsorción se realizaron a un pH de 8.55 y se analizaron mediante modelos cinéticos e isotérmicos. Los resultados mostraron que el HF-SC presentó la mayor cantidad de Cr (VI) adsorbida (0.066 mg/g), seguido del CC-SC (0.0021 mg/g) y la ZC-SC (0.0017 mg/g). La modificación con CTAB aumentó la carga superficial positiva de los adsorbentes, favoreciendo la interacción electrostática con el Cr (VI). Se concluye que el HF-SC es el adsorbente más eficiente en estas condiciones, resaltando la importancia de optimizar las variables operativas para su aplicación en efluentes reales.

ABSTRACT

The aim of this study was to compare the efficiency of different adsorbents modified with cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) in the removal of hexavalent chromium (Cr (VI)) in water from an industrial effluent. Ferric hydroxide (HF-SC), coconut shell activated carbon (CC-SC) and zeolite (ZC-SC) were evaluated. Adsorption tests were performed at pH 8.55 and analyzed using kinetic and isothermal models. The results showed that HF-SC presented the highest amount of Cr (VI) adsorbed (0.066 mg/g), followed by CC-SC (0.0021 mg/g) and ZC-SC (0.0017 mg/g). Modification with CTAB increased the positive surface charge of the adsorbents, favoring the electrostatic interaction with Cr (VI). It is concluded that HF-SC is the most efficient adsorbent under these conditions, highlighting the importance of optimizing the operating variables for its application in real effluents.

Palabras clave: adsorción, cromo hexavalente, efluente industrial, surfactante CTAB
Keywords: adsorption, hexavalent chromium, industrial effluent, CTAB surfactant

INTRODUCCIÓN

El cromo hexavalente (Cr (VI)) es una de las formas más tóxicas del cromo y se encuentra ampliamente en los efluentes industriales. Su presencia está vinculada a procesos como la galvanoplastia, la fabricación de acero inoxidable, la producción de pigmentos y el curtido de cuero, que generan descargas contaminantes al medio ambiente (Velma *et al.*, 2009; Baral & Engelken, 2002). Su elevada solubilidad en agua y su movilidad en sistemas acuáticos lo convierten en un peligro significativo para la calidad del agua y los ecosistemas (Jain *et al.*, 2009; Rengaraj *et al.*, 2001).

La exposición al Cr (VI) representa un riesgo severo para la salud humana, ya que puede ocurrir a través de la inhalación, la ingesta de agua contaminada o el contacto dérmico. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha identificado una fuerte relación entre el Cr (VI) y el cáncer de pulmón, además de otros efectos adversos como irritación severa de las vías respiratorias, daños hepáticos y renales (WHO, 2011a; OEHHA, 2016). En consecuencia, la OMS establece un límite de 0.05 mg/L para el Cr (VI) en agua potable, mientras que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) fija un límite de 0.1 mg/L para el cromo total en agua potable (WHO, 2011b; USEPA, 2020). En el caso de México, la norma oficial NOM-127-SSA1-2021 establece un límite máximo permisible de 0.05 mg/L para cromo total en agua destinada al consumo humano, alineándose así con las recomendaciones internacionales (DOF, 2021). Estas regulaciones han impulsado el desarrollo de tecnologías eficientes y sostenibles para su eliminación.

Entre las estrategias de remoción de Cr (VI), se han estudiado diversos métodos como la reducción química, la precipitación, el intercambio iónico, la filtración por membranas y la electrocoagulación (Mohan & Pittman, 2006; Picazo Rodríguez *et al.*, 2022). Sin embargo, muchas de estas tecnologías presentan limitaciones como altos costos operativos, generación de residuos secundarios o eficiencia reducida en matrices complejas (Fu & Wang, 2011). En este contexto, la adsorción ha surgido como una de las opciones más prometedoras debido a su bajo costo, alta eficiencia y facilidad de implementación (Aksu, 2005; Ali *et al.*, 2012). Diversos materiales adsorbentes han sido evaluados, incluyendo biomateriales naturales, residuos agroindustriales, adsorbentes sintéticos y comerciales, muchos de los cuales han mostrado una alta eficiencia en la remoción de Cr (VI) (Muñoz Martínez, 2021).

Para mejorar la capacidad de adsorción de estos materiales, se ha explorado la modificación química con surfactantes catiónicos como el Bromuro de Cetiltrimetilamonio (CTAB). La aplicación de CTAB altera las propiedades fisicoquímicas de los adsorbentes, incrementando su afinidad por los aniones de Cr (VI) y mejorando la eficiencia del proceso (Zhou *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2015). Estudios recientes han reportado que el uso de CTAB no solo incrementa la capacidad de adsorción, sino que también reduce el tiempo necesario para alcanzar la remoción del contaminante, lo que lo hace una opción viable para el tratamiento de grandes volúmenes de agua contaminada (Zhou *et al.*, 2018). Además, el empleo de este tipo de surfactantes podría facilitar el desarrollo de tecnologías descentralizadas para el tratamiento de efluentes en regiones con recursos limitados (Sarfray *et al.*, 2022).

Entre las ventajas del CTAB frente a otros surfactantes catiónicos se encuentra su alta capacidad para formar una doble capa sobre la superficie del adsorbente, lo que incrementa significativamente la adsorción de especies aniónicas como el Cr (VI) (Wahyuni *et al.*, 2018). Además, presenta buena estabilidad química y disponibilidad comercial. No obstante, entre sus desventajas se señala su posible toxicidad residual, especialmente si no se remueve completamente tras el tratamiento, y su costo ligeramente superior respecto a otros surfactantes como el cloruro de benzalconio (BAC) (Duan *et al.*, 2024). Asimismo, algunos estudios han evidenciado que, en ciertas condiciones operativas, otros surfactantes pueden generar una mayor eficiencia en la adsorción específica dependiendo del tipo de matriz acuosa (Fu & Wang, 2011; Mohan & Pittman, 2006).

En este estudio se evaluó la influencia del surfactante catiónico CTAB en la capacidad de remoción de Cr (VI) de tres adsorbentes comerciales mediante su aplicación en un efluente industrial real. La selección de los adsorbentes se basó en criterios como su disponibilidad en el mercado, área superficial específica y antecedentes

documentados sobre su capacidad de adsorción. El objetivo principal de la investigación fue determinar la eficacia de la modificación con CTAB en la mejora de las propiedades adsorbentes de estos materiales, así como su desempeño en condiciones reales de contaminación por Cr (VI).

METODOLOGÍA

Para evaluar la eficiencia de los adsorbentes modificados con CTAB en la remoción de Cr (VI) en un efluente industrial, la investigación se llevó a cabo en tres etapas principales: (1) preparación de los adsorbentes, incluyendo su modificación con CTAB; (2) pruebas de adsorción bajo condiciones controladas, considerando factores como el pH y la concentración inicial de Cr (VI); y (3) análisis cinético para caracterizar la interacción entre el adsorbente y el contaminante. El efluente utilizado fue proporcionado de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales del giro automotriz ubicada en el estado de Aguascalientes, México, y se caracterizó conforme a los lineamientos de la norma NOM-001-SEMARNAT-2021, la cual establece los métodos para el análisis de descargas en cuerpos receptores.

Selección y pretratamiento de los adsorbentes comerciales

Los adsorbentes comerciales seleccionados fueron zeolita natural tipo clinoptilolita (ZC), proveniente de la mina San Francisco en San Luis Potosí; carbón activado derivado de cáscara de coco (CC; Carmex); e hidróxido férrico de alta pureza (HF; Watch Water México). Cada adsorbente fue molido y tamizado para obtener la fracción retenida en tamices estándar de malla 35. Posteriormente, se lavaron con agua desionizada hasta alcanzar un pH constante y se secaron a 110 °C durante 24 horas para su acondicionamiento previo a los estudios experimentales.

Modificación de los adsorbentes

Los adsorbentes acondicionados fueron modificados siguiendo la metodología propuesta por Dimas *et al.* (2021). Inicialmente, se preparó una solución de cloruro de sodio (NaCl) a una concentración de 2 M para incrementar la disponibilidad de iones intercambiables en la superficie del adsorbente. Se mezclaron 50 mL de esta solución con 1 g de cada adsorbente y la mezcla se mantuvo en contacto durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, los materiales fueron enjuagados con agua destilada hasta alcanzar un pH constante y secados a 60 °C durante 24 horas.

En el siguiente paso, los adsorbentes fueron modificados con el surfactante catiónico CTAB. Se preparó una solución de CTAB con una concentración de 0.006 M, de la cual se tomaron 10 mL y se mezclaron con 1 g del adsorbente previamente tratado. Esta mezcla fue agitada en un termobañero (WiseBath) a 150 rpm y temperatura ambiente durante 24 horas. Posteriormente, el material fue recuperado por filtración, lavado con agua desionizada hasta alcanzar un pH constante y secado a 80 °C por 24 horas. Los adsorbentes modificados se identificaron con la siguiente nomenclatura: ZC-SC para la zeolita clinoptilolita, CC-SC para el carbón activado de cáscara de coco y HF-SC para el hidróxido férrico.

Estudios cinéticos de adsorción

Los estudios cinéticos de adsorción de Cr (VI) se realizaron agregando 0.1 g de cada adsorbente, tanto sin modificar como modificado con CTAB, a 10 mL de efluente industrial previamente filtrado con papel de poro ultrafino (0.45 µm). Las muestras se colocaron en tubos de polipropileno con tapa y se mantuvieron en agitación constante a 150 rpm a temperatura ambiente (25 °C) durante distintos tiempos de contacto, desde 10 minutos hasta 24 horas. El pH de la solución se mantuvo sin alteraciones.

Los datos obtenidos se ajustaron a los modelos cinéticos de pseudo-primer y pseudo-segundo orden. La ecuación linealizada de pseudo-primer orden se expresa como:

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (1)$$

donde k_1 es la constante de velocidad de pseudo-primer orden (1/h), y q_e y q_t representan la cantidad adsorbida (mg/g) en el equilibrio y en el tiempo t , respectivamente.

Para la cinética de pseudo-segundo orden, la ecuación linealizada se expresa como:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

donde k_2 es la constante de velocidad de pseudo-segundo orden (g/mg h). Los valores de q_e y k_2 se determinaron a partir de la pendiente e intersección de la gráfica $\left(\frac{t}{q_t}\right)$ vs t . El producto $k_2 q_e^2$ representa la tasa de adsorción inicial, denominada h . El tiempo de vida media ($t_{1/2}$) se definió como el tiempo requerido para adsorber la mitad de la cantidad total en equilibrio y se calculó mediante la ecuación:

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e} \quad (3)$$

Esta ecuación se deriva de la reorganización de la ecuación de pseudo-segundo orden, considerando $t = t_{1/2}$ y $q_t = \frac{q_e}{2}$.

Finalmente, la concentración residual de Cr (VI) se determinó por espectrofotometría UV-Vis (Hach DR-5000) mediante el método Hach 8023.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del efluente industrial

El efluente utilizado en este estudio provino de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales del sector automotriz, ubicada en el estado de Aguascalientes, México. La caracterización del efluente se realizó conforme a la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 (ver Tabla 1). Entre los parámetros más relevantes se encontró una concentración inicial de Cr (VI) de 0.048 mg/L, valor inferior al límite máximo permisible de 1 mg/L establecido por la misma norma. Además, se identificaron otras características importantes del efluente como un pH alcalino de 8.55, una DQO de 195 mg/L y la presencia de iones competitivos como sulfatos (112 mg/L) y nitratos (28.1 mg/L), que pueden influir en los mecanismos de adsorción. Estas condiciones influyen significativamente en los mecanismos de adsorción debido a la interacción de los aniones presentes en el sistema con los sitios activos de los adsorbentes (Villavicencio *et al.*, 2009).

Evaluación de las cinéticas de adsorción

El análisis cinético de la adsorción de Cr (VI) mostró diferencias significativas entre los materiales modificados con CTAB. El hidróxido férrico (HF-SC) presentó la mayor capacidad de adsorción, alcanzando 0.066 mg/g y una eficiencia de remoción superior al 41 %. El comportamiento cinético del proceso se ajustó al modelo de pseudo-primer orden, lo que sugiere que la velocidad del proceso depende de la disponibilidad de los sitios activos en la superficie del adsorbente. Este comportamiento puede atribuirse a la alta afinidad superficial del hidróxido férrico modificado hacia los aniones cromato y dicromato, facilitada por la presencia del surfactante catiónico CTAB. Este tipo de interacción se ha observado también en otros materiales modificados, donde la carga superficial positiva inducida por el surfactante favorece la atracción electrostática con aniones como HCrO_4^- en medios ligeramente ácidos o neutros (Duan *et al.*, 2024; Wahyuni *et al.*, 2018).

Tabla 1: Resultados del análisis fisicoquímico a la muestra de agua residual

Parámetro	Resultado	Unidades	Límite Máximo Permissible
Cr (VI)	0.048	mg/L	1
Grasas y aceites	3	mg/L	21
Sólidos sedimentables	< 0.2	mg/L	N.A.
Sólidos suspendidos totales	28	mg/L	42
Sólidos suspendidos volátiles	24	mg/L	N.A.
Materia flotante	Ausente		Ausente
Temperatura	23.2	°C	35
pH	8.55	Unidades de pH	6-9
Nitrógeno total	3.6		N.A.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	32	mg/L	N.A.
Fósforo total	8.3	mg/L	N.A.
Demanda Química de Oxígeno	195	mg/L	84
Turbiedad	15	UNT	N.A.
Cloro total	0.54	mg/L	N.A.
Ion sulfato	112	mg/L	N.A.
Nitratos	28.1	mg/L	N.A.

N.A. No aplica

Por su parte, la zeolita natural tipo clinoptilolita modificada (ZC-SC) mostró una capacidad significativamente menor (0.0017 mg/g), pero se ajustó al modelo de pseudo-segundo orden ($R^2 = 0.9997$), lo que indica un proceso dominado por interacciones químicas específicas. Resultados similares han sido reportados por Jorfi *et al.* (2017), quienes encontraron que la capacidad de la zeolita natural depende fuertemente del tipo de modificación superficial y la competencia iónica. A pesar de su menor eficiencia comparada con el HF-SC, la ZC-SC demostró un comportamiento predecible y estable, lo que puede resultar útil para aplicaciones donde se requiera una adsorción más prolongada y controlada.

El carbón activado modificado (CC-SC) presentó una capacidad intermedia (0.0021 mg/g), también con un ajuste al modelo de pseudo-segundo orden ($R^2 = 0.9997$). Esta menor eficiencia puede estar relacionada con la competencia de otros compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales por los sitios activos del adsorbente, así como con las características físicas de la superficie del carbón activado después de su modificación. A pesar de su alta área superficial, su rendimiento se vio limitado por la posible obstrucción de sitios activos debido a la competencia iónica, lo cual coincide con los hallazgos de Céspedes *et al.* (2007), quienes observaron que la modificación de la superficie del carbón activado afecta significativamente su capacidad de adsorción de Cr (VI), especialmente en presencia de otros iones que compiten por los sitios activos.

Efecto del pH

El pH del sistema influye significativamente en la eficiencia de remoción. A pH 8.55, las especies dominantes de Cr (VI) son HCrO_4^- y CrO_4^{2-} . La interacción con la superficie de los adsorbentes depende de su carga superficial. El uso de CTAB como surfactante catiónico mejoró esta interacción, particularmente para el HF-SC, al incrementar la densidad de carga positiva. Sin embargo, a pH alcalinos, la desprotonación parcial puede reducir la eficacia global de algunos adsorbentes, lo cual ha sido ampliamente reportado por autores como Park *et al.* (2010) y Leyva *et al.* (2008).

Tabla 2: Parámetros cinéticos de la adsorción de Cr (VI) sobre materiales adsorbentes modificados con CTAB

Material	Modelo cinético	R ²	k (1/h o g/mg h)	q _{e,calc} (mg/g)	q _{e,exp} (mg/g)
HF-SC	Pseudo-primer orden	0.9958	0.0265	0.0660	0.0018
ZC-SC	Pseudo-segundo orden	0.9997	1439.0749	0.0017	0.0016
CC-SC	Pseudo-segundo orden	0.9997	839.1996	0.0021	0.0021

Comparando con trabajos previos, el HF-SC mostró una capacidad de adsorción mayor que la reportada para otros materiales férricos no modificados. Por ejemplo, Céspedes *et al.* (2007), reportaron una capacidad de adsorción de 0.03 mg/g para carbones activados modificados con hierro bajo condiciones similares. En contraste, las zeolitas naturales han mostrado capacidades de hasta 0.005 mg/g sin modificación, lo que confirma que la modificación con CTAB no fue suficiente para superar la baja afinidad intrínseca del material por Cr (VI) (Vedenyapina *et al.*, 2021).

En el caso del carbón activado, estudios han reportado valores de capacidad de adsorción de Cr(VI) de aproximadamente 0.0015 mg/g para carbones sin modificación, por lo que la mejora observada en este estudio es limitada. Esto sugiere que, para este tipo de contaminantes aniónicos, el carbón activado necesita modificaciones adicionales, como la funcionalización con grupos amina o la magnetización, para alcanzar eficiencias superiores, como lo sugieren Céspedes *et al.* (2007) y Leyva *et al.* (2008).

CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó la eficiencia de diferentes materiales adsorbentes modificados con CTAB para la remoción de cromo hexavalente en aguas residuales industriales. El hidróxido férrico modificado (HF-SC) fue el material más eficiente, con una capacidad de adsorción de 0.066 mg/g y un ajuste al modelo cinético de pseudo-primer orden. En contraste, la zeolita clinoptilolita modificada (ZC-SC) y el carbón activado de cáscara de coco (CC-SC) presentaron menores capacidades de adsorción (0.0017 y 0.0021 mg/g, respectivamente), ajustándose al modelo de pseudo-segundo orden.

La modificación con CTAB mejoró en general la afinidad de los adsorbentes hacia Cr (VI), pero su efectividad final dependió de las características estructurales y químicas de cada material.

Los resultados indican que el uso de adsorbentes modificados con surfactantes catiónicos, particularmente el hidróxido férrico, representa una estrategia viable y económica para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con cromo hexavalente. Este enfoque contribuye al desarrollo de tecnologías sostenibles en el ámbito del tratamiento de aguas industriales.

REFERENCIAS

- Aksu, Z. (2005). Application of biosorption for the removal of organic pollutants: A review. *Process Biochemistry*, 40 (3–4), 997–1026. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.04.008>
- Ali, I., Asim, M. & Khan, T. A. (2012). Low-cost adsorbents for the removal of heavy metals from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*, 113, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.028>
- Baral, S.S. & Engelken, R.D. (2002). Chromium-based regulations and greening in metal finishing industries in the USA. *Environmental Science & Policy*, 5 (2), 121–133. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(02\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(02)00028-X)

- Céspedes, N., Valencia, J. & Díaz, J. de J. (2007). Remoción de cromo VI de soluciones acuosas por adsorción sobre carbones activados modificados. *Revista Colombiana de Química*, 36 (2), 123–135. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/24010>
- Chen, W. F., Zhang, J. H., Wang, W. Y. & Zhang, X. M. (2015). Comparison of cationic surfactants for activated carbon modification for Cr(VI) removal. *Asian Journal of Chemistry*, 27 (5), 1881–1884. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2015.17903asianpubs.org>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2021). *NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Secretaría de Salud. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705
- Dimas, G.L., Martínez, A., Pérez, A.F., Rivas, E.L., Liñán, A., Flores, G.A., et al. (2021). Removal of chromate anions and immobilization using surfactant-modified zeolites. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101889. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101717>
- Duan, J., Chen, B., Zhang, Y., Cai, P. & Wang, F. (2024). Enhanced adsorption of Cr(VI) from aqueous solutions by CTAB-modified schwertmannite: Adsorption performance and mechanism. *Chemical Engineering Research and Design*, 208, 464–474. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.02.017>
- Fu, F. & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Jain, M., Garg, V. K. & Kadirvelu, K. (2009). Chromium(VI) removal from aqueous system using Helianthus annuus (sunflower) stem waste. *Journal of Hazardous Materials*, 162 (1), 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.048>
- Jorfi, S., Rezaee, A. & Jaafarzadeh, N. (2017). Adsorption of Cr(VI) by natural clinoptilolite zeolite from aqueous solutions: Isotherms and kinetics. *Polish Journal of Chemical Technology*, 19 (3), 106–114. <https://doi.org/10.1515/pjct-2017-0056>
- Leyva, R., Flores, J. V., Díaz, P.E. & Berber, M.S. (2008). Adsorción de Cromo (VI) en Solución Acuosa sobre Fibra de Carbón Activado. *Ingeniería*, 12 (5), 345–353. <https://revistaschilenas.uchile.cl/handle/2250/58122>
- Mohan, D. & Pittman, C.U. (2006). Activated carbons and low-cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials*, 137 (2), 762–811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.060>
- Muñoz Martínez, M.X. (2021). *Adsorción de cromo hexavalente en solución acuosa empleando un compuesto organoarcilla-alginato y su potencial aplicación en un efluente de curtiembre: caso de estudio municipio de Belén-Nariño*. Trabajo Final presentado como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería – Ingeniería Ambiental <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80919>
- OEHHA. (2016). Health Effects of Hexavalent Chromium. Office of Environmental Health Hazard Assessment. <https://oehha.ca.gov/air/health-effects-hexavalent-chromium>
- Park, D., Yun, Y. S. & Park, J. M. (2010). The past, present, and future of biosorption of heavy metals. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 15 (1), 86–102. [10.1007/s12257-009-0199-4](https://doi.org/10.1007/s12257-009-0199-4)
- Picazo Rodríguez, N. G., Carrillo Pedroza, F. R., Soria Aguilar, M. de J., Baltierra Costeira, G. & González Zamarripa, G. (2022). Adsorción de cromo mediante el uso de residuos minero-metalúrgicos como adsorbentes de bajo costo. *EPISTEMUS*, 15 (31), 44–48. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.195>

Rengaraj, S., Yeon, K.H. & Moon, S.H. (2001). Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins. *Journal of Hazardous Materials*, 87(1–3), 273–287. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00291-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00291-6)

Sarfraz, R., Ameer, S., Javed, M., Iqbal, S., Aljazzar, S.O., Zahra, M., et al. (2022). Removal of hexavalent chromium ions using micellar modified adsorbent: isothermal and kinetic investigations. *RSC Advances*, 12(42), 27476–27486. <https://doi.org/10.1039/D2RA03906K>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

USEPA-United States Environmental Protection Agency (2020). *Chromium (VI) in drinking water*. <https://www.epa.gov/dwstandardsregulations/chromium-drinking-water>

Vedenyapina, M., Kurmysheva, A., Kulaishin, S. & Kryazhev, Y. (2021). Adsorption of heavy metals on activated carbons: A review. *Solid Fuel Chemistry*, 55(2), 83–104. <https://doi.org/10.3103/S0361521921020099>

Velma, V., Vutukuru, S. S., & Tchounwou, P. B. (2009). Ecotoxicology of hexavalent chromium in freshwater fish: A critical review. *Reviews on Environmental Health*, 24(2), 129–145. <https://doi.org/10.1515/reveh.2009.24.2.129>

Villavicencio, C., Molina, A. & Fernández, L. (2009). Estudio de la adsorción de aniones sobre zeolitas sintéticas modificadas con surfactantes. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 32(3), 234–241. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652009000300008&lng=es&nrm=iso

Wahyuni, E.T., Roto, R., Nissah, F.A., Mudasir, M. & Aprilita, N. H. (2018). Modified silica adsorbent from volcanic ash for Cr(VI) anionic removal. *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(3), 428–433. <https://doi.org/10.22146/ijc.26905>

WHO-World Health Organization (2011a). *Guidelines for drinking-water quality*. <https://www.who.int/publications/item/9789240045064>

World Health Organization. (2011b). *Chromium in drinking-water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. Geneva: World Health Organization. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/338062/WHO-HEP-ECH-WSH-2020.3-eng.pdf>

Zhou, Y., Zhao, Y., Wu, X., Yin, W., Hou, J., Wang, S., et al. (2018). Adsorption and reduction of hexavalent chromium on magnetic greigite (Fe₃S₄)-CTAB: leading role of Fe(II) and S(-II). *RSC Advances*, 8(55), 31568–31574. <https://doi.org/10.1039/c8ra06534a>