

Influencia de variables independientes en la recuperación de Cr(VI) mediante compuestos laminares

Influence of independent variables on Cr(VI) recovery using laminar compounds

A. Lemus Solorio ^a, J. Apolinar Cortés ^a, M. A. Martínez-Cinco ^a, R. Huirache-Acuña ^a, M. A. Lemus-Solorio ^b, J. L. Rivera Rojas ^{b,*}

^a División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58030, Morelia, Michoacán, México.

^b División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas "Mat. Luis Manuel Rivera Gutiérrez", Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58030, Morelia, Michoacán, México.

Resumen

En este estudio se aborda la recuperación de dicromato (Cr(VI)) en fase acuosa utilizando hidróxidos dobles laminares (HDL) sintetizados mediante el efecto memoria, un proceso que permite reconstruir la estructura laminar original tras su calcinación. Se emplearon compuestos tipo MgFeAl como base inorgánica para la formación de materiales híbridos. Se analizó cómo variables independientes como el pH de la solución, la temperatura del sistema y la concentración del HDL influyen significativamente en la eficiencia del proceso de remoción. Los resultados destacan la importancia de controlar estas condiciones para optimizar los mecanismos de adsorción e intercambio aniónico, fundamentales en la captura efectiva del Cr(VI).

Palabras Clave: toxicidad, cromo, materiales, salud, ambiente

Abstract

This study addresses the recovery of dichromate (Cr(VI)) in aqueous phase using double laminar hydroxides (DLH) synthesized through the memory effect, a process that allows the original laminar structure to be reconstructed after calcination. MgFeAl compounds were used as the inorganic base for the formation of hybrid materials. Independent variables such as solution pH, system temperature, and HDL concentration were analyzed for their significant influence on the efficiency of the removal process. The results highlight the importance of controlling these conditions to optimize the adsorption and anion exchange mechanisms, which are fundamental to the effective capture of Cr(VI).

Keywords: toxicity, chromium, materials, health, environment

1. Introducción

1.1. Cromo: presencia en la naturaleza, toxicología y transporte

El cromo es un elemento metálico de transición, de número atómico 24, que se encuentra de forma natural en rocas, suelos y aguas, principalmente en dos estados de oxidación: Cr(III) y Cr(VI). El Cr(III) es una forma relativamente estable y menos tóxica, que puede estar presente en minerales como la cromita (FeCr_2O_4), y suele encontrarse asociado a partículas sólidas, con baja movilidad en el medio ambiente. En contraste, el Cr(VI) se presenta en forma de aniones como cromato

(CrO_4^{2-}) y dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), especies altamente solubles en agua, móviles y tóxicas. Esta forma hexavalente se genera principalmente por procesos industriales como la galvanoplastia, curtido de pieles, fabricación de pigmentos y procesos mineros. La toxicología del Cr(VI) ha sido bien documentada, y ha sido clasificado por la IARC (2012) como un compuesto cancerígeno para los humanos, asociado a efectos genotóxicos, mutagénicos y al desarrollo de cáncer pulmonar tras exposición prolongada por inhalación. Además, puede causar daños en riñones, hígado y sistema reproductivo.

En México y en otras regiones del mundo, se han identificado concentraciones elevadas de Cr(VI) en cuerpos de agua cercanos a zonas industriales y mineras. La CONAGUA

*Autor para la correspondencia: jlrivera@umich.mx

Correo electrónico: 1209689X@umich.mx (Alfonso Lemus Solorio), jose.apolinar@umich.mx (José Apolinar Cortés), marco.martinez@umich.mx (Marco Antonio Martínez-Cinco), rafael.huirache@umich.mx (Rafael Huirache-Acuña), 1414433d@umich.mx (Martha Angélica Lemus-Solorio), jlrivera@umich.mx (José Luis Rivera Rojas).

Historial del manuscrito: recibido el 29/09/2025, última versión-revisada recibida el 18/02/2026, aceptado el 18/02/2026, en línea (postprint) desde el 11/09/2026, publicado el 05/01/2027. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14i28.16170>



(2020) reportó casos de contaminación en estados como Jalisco, Coahuila y Guanajuato, donde se ha relacionado la presencia de Cr(VI) en aguas subterráneas con afectaciones en la salud pública, incluyendo enfermedades respiratorias, dérmicas y posibles efectos cancerígenos. Desde el punto de vista ambiental, el Cr(VI) también representa un riesgo ecotoxicológico significativo, ya que puede bioacumularse en organismos acuáticos e interferir con procesos biológicos esenciales, afectando la biodiversidad acuática (Ghimire et al., 2019). En términos de transporte, el Cr(VI) es particularmente preocupante por su capacidad de migrar largas distancias en medios acuosos, influenciado por variables como el pH, el potencial redox y la presencia de materia orgánica. A valores de pH neutro o alcalino, el Cr(VI) permanece en forma de cromato, una especie más estable y difícil de remover, lo que complica su tratamiento en sistemas naturales y artificiales (Richard & Bourg, 1991).

1.2. Adsorción como fenómeno físicoquímico

La adsorción es un fenómeno superficial mediante el cual moléculas o iones se acumulan sobre la superficie de un sólido, y puede clasificarse en fisisorción o quimisorción, dependiendo de la naturaleza de las fuerzas involucradas. En la fisisorción predominan las fuerzas de Van der Waals, es reversible y generalmente se da a bajas temperaturas, mientras que en la quimisorción intervienen enlaces químicos, siendo más específica e irreversible (Foo & Hameed, 2010). Según la clasificación tradicional, se distinguen adsorciones monomoleculares (modelo de Langmuir) y multimoleculares (modelo de Freundlich y BET). Este proceso es clave para el tratamiento de contaminantes en agua, ya que permite remover metales pesados como el Cr(VI) mediante mecanismos de intercambio iónico o afinidad química con el adsorbente.

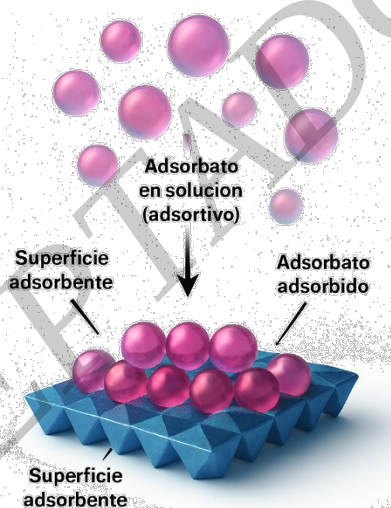


Figura 1: Adsorción en materiales.

1.3. Compuestos laminares (HDL): propiedades, aplicaciones y estructura

Los hidróxidos dobles laminares, conocidos también como compuestos laminares tipo hidrotalcita, son materiales con estructura tipo brucita en donde algunos cationes divalentes son sustituidos por trivalentes, generando una carga positiva que se compensa con aniones interlaminares. Su fórmula

general es $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}(A^{n-})_{x/n} \cdot mH_2O$, donde M puede ser Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , entre otros (Rives, 2002). Estos materiales destacan por su alta capacidad de intercambio aniónico, memoria estructural tras la calcinación, y su estabilidad en medios acuosos, lo cual los hace útiles para la captura de aniones como fosfatos, nitratos o dicromato (Goh et al., 2008). En aplicaciones ambientales, su uso ha sido reportado en la remediación de aguas contaminadas y como soporte catalítico. La física del material influye directamente en su desempeño: una alta área superficial, porosidad y ordenamiento estructural son claves para una adsorción eficiente.

1.4. Variables del proceso de adsorción en compuestos laminares

Las variables que afectan el proceso de adsorción de aniones como el dicromato en compuestos laminares incluyen el pH, la temperatura y la concentración del adsorbente. El pH es crítico, ya que determina la distribución de especies del cromo; por ejemplo, a $pH < 6$ predominan $Cr_2O_7^{2-}$ y $HCrO_4^-$, mientras que a $pH > 6$ se encuentra principalmente CrO_4^{2-} (McBride, 1994). Estas especies interactúan de forma distinta con los sitios activos del material. La temperatura, por su parte, influye en la energía de activación del proceso: si la adsorción es endotérmica, un aumento de temperatura mejora la remoción. La concentración del HDL en solución también es clave: mayores dosis del adsorbente aumentan la disponibilidad de sitios activos. Estas variables se consideran independientes porque se controlan experimentalmente, mientras que la capacidad de adsorción y el porcentaje de remoción se consideran dependientes, ya que son el resultado del sistema bajo esas condiciones.

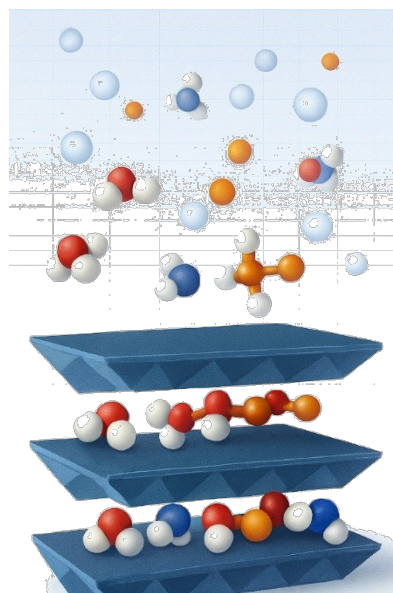


Figura 2: Adsorción de iones de interés en estructuras de compuestos laminares.

1.5. Cinética e isotermas de adsorción: herramientas para entender el proceso

El estudio de la cinética y las isotermas de adsorción permite comprender el mecanismo y la eficiencia del proceso. La cinética describe la velocidad con la que ocurre la adsorción, y modelos como el de pseudo-primero orden o pseudo-segundo orden permiten inferir si el proceso está controlado por difusión o por interacción química (Ho &

McKay, 1999). Las isotermas, por otro lado, representan cómo varía la cantidad de adsorbato retenido en el sólido en equilibrio con su concentración en solución. Modelos como Langmuir (adsorción monolayer en sitios homogéneos) o Freundlich (adsorción heterogénea) ayudan a identificar la naturaleza del proceso. Si los datos se ajustan mejor a Langmuir y a cinéticas de pseudo-segundo orden, se infiere un mecanismo de quimisorción; si ajustan mejor a Freundlich y cinética de pseudo-primer orden, se sugiere una fisisorción. Estos estudios no solo permiten entender el proceso, sino también optimizarlo.

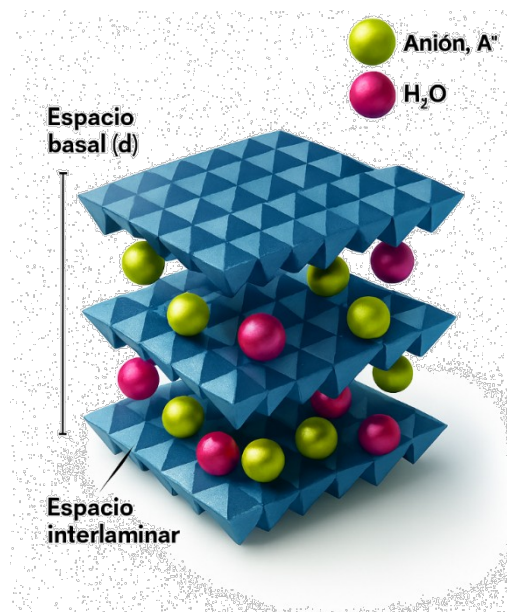


Figura 3: Composición de materiales de un teléfono móvil.

2. Estado del Arte

En las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), la remoción de cromo se ha abordado mayormente mediante procesos físico-químicos como la reducción química y precipitación. El método más común consiste en reducir Cr(VI) a Cr(III) mediante agentes reductores como sulfito o Fe(II), seguido de su precipitación como Cr(OH)_3 en condiciones alcalinas. Este tipo de tratamiento puede alcanzar eficiencias de remoción superiores al 90 %, pero depende bastante del pH, que debe mantenerse entre 8.5 y 9.5, así como de la dosis del reductor y el tiempo de retención (Gheju, 2011). Por ejemplo, en condiciones controladas de laboratorio, se ha registrado una remoción de 91,7 % usando Ca(OH)_2 como agente precipitante, con tiempos de contacto de 45 minutos (Universidad Alas Peruanas, 2022). A pesar de su eficiencia, estos métodos presentan desventajas operativas como la generación de grandes volúmenes de lodos tóxicos y la necesidad de tratamientos posteriores.

En paralelo, se ha desarrollado una gran variedad de materiales sorbentes para capturar Cr(VI) desde soluciones acuosas, con alternativas más sostenibles como carbones activados modificados, biosorbentes, arcillas, óxidos metálicos, materiales poliméricos y compuestos laminares tipo HDL (hidróxidos dobles laminares). Estos últimos han demostrado una alta capacidad de intercambio aniónico, especialmente

cuando se sintetizan por efecto memoria y se activan térmicamente. En estudios recientes, materiales como carbón activado modificado con magnetita lograron una eficiencia de remoción de 96,39 % a pH 2 y 60 minutos de contacto (Water Practice & Technology, 2024), mientras que nanopartículas de $\text{Ag}_2\text{Cu}_2\text{O}_3$ reportaron hasta 96,66 % de remoción con soluciones de 40 ppm (Akhter et al., 2022). En el caso de los HDL tipo MgAl y MgFeAl, se han reportado remociones de entre 80 % y 94 %, dependiendo de la concentración inicial de Cr(VI), el tipo de anión intercalado y las condiciones del proceso (Goh et al., 2008; González et al., 2018).

Las principales variables independientes estudiadas en estos procesos de remoción incluyen el pH, la temperatura, la dosis del adsorbente y la concentración inicial de Cr(VI). El pH es clave, ya que determina la especie química predominante del cromo en solución (por ejemplo, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ en pH ácido y CrO_4^{2-} en pH alcalino), lo cual afecta directamente la afinidad con el adsorbente (McBride, 1994). A pH 2, donde domina el HCrO_4^- , se ha observado una mayor eficiencia de remoción en muchos materiales por el aumento de protonación de la superficie activa. La temperatura también tiene un rol importante, ya que puede favorecer la adsorción si el proceso es endotérmico. Otras variables como el tiempo de contacto y la agitación se consideran secundarias, pero también influyen en el equilibrio. Las variables dependientes suelen ser la capacidad de adsorción (mg/g) y el porcentaje de remoción, indicadores que permiten comparar la eficiencia entre materiales y condiciones operativas (Foo & Hameed, 2010). Comprender y controlar estas variables permite diseñar sistemas más eficientes y ajustados a distintas matrices acuosas contaminadas con cromo.

3. Material y métodos

3.1. Preparación de los compuestos laminares Mg/Al/Fe por reconstrucción (efecto memoria)

La síntesis de hidróxidos dobles laminares (HDL) tipo Mg/Al/Fe se realizó mediante el método de reconstrucción por efecto memoria, el cual implica la calcinación térmica de un precursor tipo hidrotalcita para inducir la pérdida de su estructura laminar, seguida por un proceso de rehidratación en solución acuosa bajo condiciones controladas. Esta reconstrucción permite restaurar la estructura laminar original con nuevas capacidades de intercambio aniónico. El precursor fue sintetizado por coprecipitación a pH básico controlado, utilizando sales metálicas en proporciones definidas. Tras la calcinación, el sólido fue suspendido en una solución conteniendo aniones de interés, promoviendo la recuperación estructural mediante el reordenamiento de las láminas (Goh, Lim & Dong, 2008; Rives, 2001).

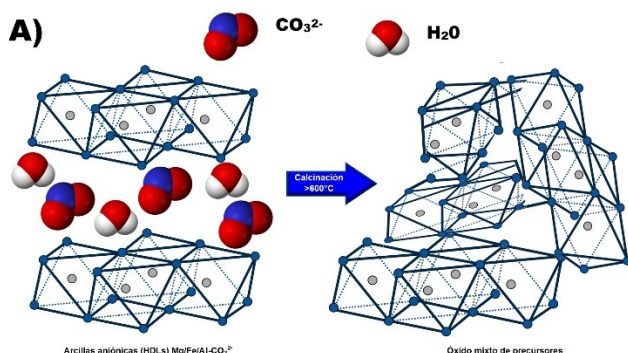


Figura 4: A) Proceso de reconstrucción por efecto de memoria de forma HDL.

3.2. Diseño Experimental de Superficie de Respuesta (RSM)

La presente investigación empleó un Diseño de Superficie de Respuesta (RSM) con el objetivo de optimizar las condiciones de adsorción de Cr(VI) utilizando materiales laminares tipo HDL como adsorbentes. Se seleccionaron dos variables independientes principales: la masa del adsorbente y el tiempo de contacto, evaluadas en un rango amplio de niveles definidos en función de estudios preliminares. Estas variables fueron estudiadas mediante un diseño experimental rotacional compuesto, que permitió modelar el comportamiento del sistema considerando efectos lineales, cuadráticos e interactivos sobre la variable dependiente, que fue el porcentaje de remoción de Cr(VI).

Las pruebas se realizaron en sistema discontinuo (batch), utilizando soluciones acuosas contaminadas con dicromato de potasio, preparadas de acuerdo con métodos estandarizados. El pH de trabajo se mantuvo dentro de un rango ligeramente ácido y la temperatura en condiciones ambientales controladas. Las mezclas fueron agitadas constantemente durante los tiempos definidos, y luego se separó el sólido por filtración para analizar la concentración residual de cromo hexavalente por espectrofotometría UV-Vis. Todas las pruebas se realizaron por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Posteriormente, se ajustaron los datos experimentales a un modelo cuadrático utilizando análisis de regresión, y se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia estadística de cada factor y sus interacciones. Se generaron gráficos de superficie tridimensional y curvas de contorno, lo cual permitió identificar las condiciones óptimas para maximizar la remoción del contaminante. Este enfoque multivariable es ampliamente utilizado para sistemas de tratamiento de aguas debido a su capacidad para reducir el número de experimentos sin perder calidad en el análisis (Myers, Montgomery, & Anderson-Cook, 2016; Montgomery, 2017).

3.3. Evaluación de los compuestos laminares como adsorbentes de dicromato

Para la evaluación del material como adsorbente, se utilizaron soluciones acuosas de dicromato de potasio como fuente de Cr(VI), preparadas de acuerdo con normativas nacionales para análisis de aguas. Los ensayos se realizaron en sistema discontinuo, en un rango de pH ligeramente ácido

y a temperatura ambiente controlada, condiciones seleccionadas por su relevancia en aguas residuales reales y por favorecer la estabilidad del anión dicromato. Las mezclas fueron agitadas por tiempos definidos, y posteriormente se separó el sólido para determinar la concentración residual de cromo hexavalente por espectrofotometría UV-Vis, empleando el método colorimétrico del reactivo 1,5-difenilcarbazida (APHA, 2017).

4. Resultados

La figura 5 que se presenta ilustra de manera contundente la eficacia del proceso de adsorción para eliminar el cromo (III) de soluciones acuosas, empleando Hidróxidos Dobles Laminares (HDL) como material adsorbente. Los resultados demuestran claramente que la cantidad de adsorbente es la variable clave que gobierna la eficiencia del tratamiento. Al aumentar la dosis de HDL hasta la cantidad máxima probada (alrededor de 0.5 gramos), se logra alcanzar una remoción de cromo cercana al 100%. Este fenómeno se debe a la mayor disponibilidad de sitios activos de adsorción que ofrece la dosis más alta, asegurando que todos los iones de cromo en el agua encuentren un lugar donde fijarse. En contraste, una dosis insuficiente del adsorbente reduce drásticamente esta capacidad, dejando cromo residual en el medio.

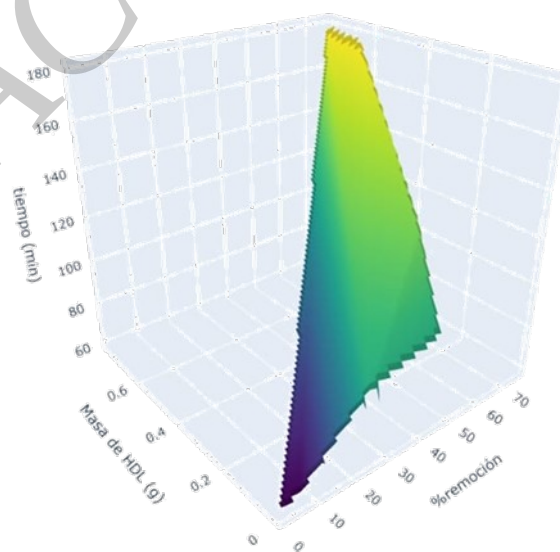


Figura 5: Superficie de Respuesta para la Remoción de Cromo (III) en Función de la Dosis de HDL y la Concentración Inicial (pH≈6).

La concentración inicial de cromo en el agua (que varió entre 0 y 75mg/L) también juega un papel importante, pero su impacto puede ser completamente mitigado. Cuando se utiliza una dosis baja de HDL, el sistema se satura rápidamente; por ende, a mayor concentración de cromo, menor es el porcentaje de remoción alcanzado. Sin embargo, el estudio revela un hallazgo crucial para el diseño de sistemas de tratamiento: al aplicar la dosis óptima de HDL (aproximadamente 0.5g), el material es tan eficiente que la remoción se mantiene cercana a la perfección (≈100%) a lo largo de todo el rango de concentraciones de cromo evaluadas. Esto significa que el HDL no solo funciona bien para aguas ligeramente contaminadas, sino que es capaz de manejar cargas contaminantes significativas.

El análisis de la superficie de respuesta generada permite determinar el punto de inflexión operativo del sistema. La meseta plana observada en la región superior del gráfico, donde la remoción se estabiliza en un 100%, indica que la capacidad máxima de adsorción del HDL no fue alcanzada dentro del rango de concentración de cromo estudiado (75mg/L). Este resultado sugiere que el proceso se encuentra limitado por la transferencia de masa del cromo hacia la superficie del adsorbente y no por la saturación de sitios activos, siempre que se emplee una dosis de HDL suficiente. Desde una perspectiva de ingeniería, esta curva de respuesta es ideal, ya que proporciona una zona de seguridad operativa amplia: el sistema es robusto y mantiene su máxima eficiencia ante fluctuaciones en la concentración de cromo, permitiendo optimizar el costo al seleccionar la dosis mínima de HDL que garantice el 100% de remoción para la concentración máxima esperada en la aplicación real.

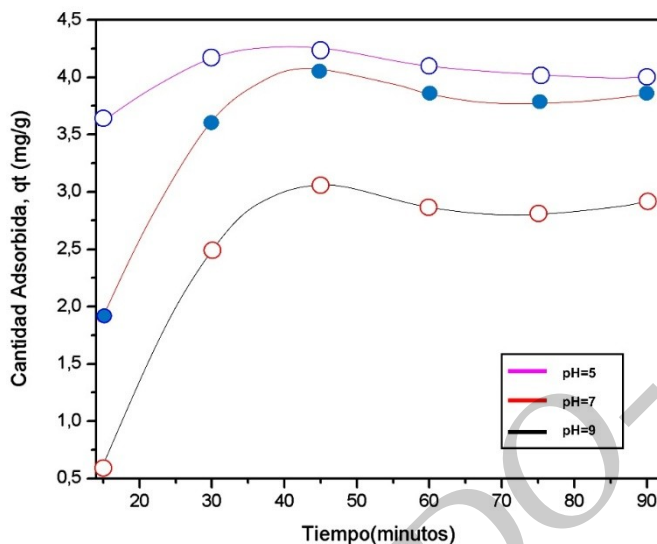


Figura 7: Efecto del pH sobre el proceso de adsorción del del ion $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ sobre la muestra HDL-Mg/Fe/Al.

La Figura 7 ilustra la cinética de adsorción del cromo (III), mostrando la evolución de la cantidad adsorbida por unidad de masa de adsorbente (q_t , en mg/g) en función del tiempo de contacto y a diferentes valores de pH inicial (5, 7 y 9). En todas las condiciones evaluadas, se observa una cinética bifásica característica: una etapa inicial de rápida adsorción, donde la mayoría de los sitios activos superficiales son ocupados velozmente, seguida de una fase más lenta hasta alcanzar el equilibrio dinámico. Los tiempos de equilibrio se establecen aproximadamente a los 45 minutos para todos los valores de pH estudiados. Específicamente, para pH=5 y pH=7, la capacidad de adsorción en equilibrio es de aproximadamente 4.2mg/g y 4.0mg/g respectivamente. Sin embargo, a pH=9, la cantidad adsorbida en equilibrio es notablemente inferior, alcanzando solo alrededor de 3.0mg/g. Este comportamiento cinético sugiere que la adsorción está inicialmente controlada por la disponibilidad de sitios, para luego pasar a un control por difusión interna o equilibrio de las interacciones.

El pH inicial de la solución ejerce una influencia crítica sobre la capacidad de adsorción, debido a su impacto en la especiación del cromo (III) y las propiedades superficiales del adsorbente. La mayor eficiencia de adsorción se registra a pH=5, lo que es consistente con la predominancia de especies catiónicas de cromo (Cr^{3+} o hidroxocomplejos cargados positivamente) que interactúan favorablemente con la superficie del adsorbente (suponiendo que esta presenta carga negativa o sitios de Lewis). A medida que el pH aumenta hacia 7, la capacidad de adsorción se mantiene elevada, aunque ligeramente inferior. No obstante, a pH=9, se observa una disminución significativa en la capacidad de adsorción. Este descenso a pH alcalino puede atribuirse a la formación de especies hidroxiladas de cromo (III) que tienen menor afinidad por la superficie del adsorbente, la posible precipitación de hidróxidos de cromo (III) reduciendo la concentración de especies disueltas, o cambios en la carga superficial del adsorbente que resultan en una menor atracción electrostática o incluso repulsión con las especies de cromo presentes.

5. Discusión

El análisis de la superficie de respuesta obtenida indica una relación directamente proporcional entre la masa del material HDL y el porcentaje de remoción de Cr(VI) , donde se observa un aumento progresivo en la eficiencia del sistema al incrementar la cantidad de adsorbente. Esta tendencia se atribuye a la mayor disponibilidad de sitios activos para la retención de aniones cromato y dicromato a medida que aumenta la masa del HDL. Por otro lado, el tiempo de contacto muestra una influencia significativa durante las primeras etapas del proceso, alcanzando una remoción cercana al máximo en tiempos moderados, lo que sugiere una cinética rápida de adsorción. En conjunto, la superficie generada es suavemente inclinada, lo que refleja un comportamiento estable sin presencia de interacciones no lineales fuertes entre los factores estudiados. Estos resultados son consistentes con estudios previos donde la adsorción de aniones oxometálicos sobre hidróxidos dobles laminares mostró una eficiencia alta en rangos similares de operación (Goh et al., 2008; Foo & Hameed, 2010)

6. Abreviaciones y Acrónimos

Acrónimo / Abreviación	Significado
Cr(VI)	Cromo hexavalente
Cr(III)	Cromo trivalente
HDL	Hidróxidos Dobles Laminares
RSM	Metodología de Superficie de Respuesta (<i>Response Surface Methodology</i>)
CCD	Diseño Compuesto Central (<i>Central Composite Design</i>)
ANOVA	Análisis de Varianza (<i>Analysis of Variance</i>)
%R	Porcentaje de remoción
pH	Potencial de hidrógeno
T	Temperatura
UV-Vis	Espectrofotometría Ultravioleta-Visible
BET	Análisis de área superficial Brunauer-Emmett-Teller
IR	Espectroscopía Infrarroja
XRD	Difracción de Rayos X (<i>X-ray</i>)

	<i>Diffraction)</i>
NMX-AA-044	Norma Mexicana para determinación de Cr(VI) en agua
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de potasio
APHA	Asociación Americana de Salud Pública (<i>American Public Health Association</i>)
LDH	<i>Layered Double Hydroxides</i> (equivalente en inglés de HDL)
q _e	Capacidad de adsorción en equilibrio
t	Tiempo
m	Masa del adsorbente
C ₀	Concentración inicial del contaminante
C _e	Concentración en equilibrio del contaminante

7. Conclusiones

A partir del modelo generado mediante diseño de superficie de respuesta, se concluye que tanto la masa del HDL como el tiempo de contacto son variables determinantes en la eficiencia del proceso de adsorción de Cr(VI), siendo la masa del adsorbente el factor con mayor impacto positivo. La remoción de cromo se ve favorecida significativamente al incrementar la cantidad de material, mientras que el tiempo necesario para alcanzar un equilibrio es relativamente corto, lo cual es deseable en aplicaciones prácticas de tratamiento de aguas. El modelo gráfico confirma que, bajo condiciones moderadas de operación, es posible alcanzar porcentajes de remoción elevados sin necesidad de recurrir a condiciones extremas, lo que evidencia el potencial de estos materiales laminares en sistemas reales de descontaminación.

Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, así como al comité editorial.

Referencias

- Akhter, M., Saeed, M., Ahmed, A., & Iqbal, M. (2022). Adsorption of hexavalent chromium using Ag₂Cu₂O₃ nanoparticles: Isotherm and kinetic study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108902.
- APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- ATSDR. (2012). Toxicological profile for Chromium. Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- CONAGUA. (2020). Calidad del agua en México: Informe 2020. Comisión Nacional del Agua.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10.
- Gheju, M. (2011). Hexavalent chromium removal from aqueous solutions by reduction with Fe(II). *Journal of Hazardous Materials*, 196, 131–138.
- Ghimire, R., Bundschuh, J., & Nath, B. (2019). Chromium removal from drinking water: A review of best available treatment methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 2474–2489.
- Goh, K. H., Lim, T. T., & Dong, Z. (2008). Application of layered double hydroxides for removal of oxyanions: A review. *Water Research*, 42(6–7), 1343–1368.
- González, M. A., Martínez, R., & López, J. (2018). Adsorción de cromo hexavalente en medios acuosos: una revisión de materiales y mecanismos. *Revista Colombiana de Química*, 47(1), 33–45.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465.
- IARC. (2012). Chromium(VI) Compounds. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans.
- McBride, M. B. (1994). *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Richard, F. C., & Bourg, A. C. M. (1991). Aqueous geochemistry of chromium: A review. *Water Research*, 25(7), 807–816.
- Rives, V. (2002). *Layered Double Hydroxides: Present and Future*. Nova Science Publishers.
- Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-044-SCFI-2001: Análisis de agua – Determinación de cromo hexavalente en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (cromatografía de iones).
- Universidad Alas Peruanas. (2022). *Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales utilizando floculantes tradicionales*. Facultad de Ingeniería Ambiental.
- Water Practice & Technology. (2024). Cr(VI) adsorption onto magnetite-modified activated carbon from aqueous media. *Water Practice & Technology*, 19(1), 156–166.