



## ELIMINACIÓN DE CROMO DE EFLUENTES ÁCIDOS, MEDIANTE ADSORCIÓN CON WOLLASTONITA NATURAL

MARTÍN ANTONIO ENCINAS ROMERO\*, LUIS ALBERTO NÚÑEZ RODRÍGUEZ, AGUSTÍN GÓMEZ ÁLVAREZ, GUILLERMO DEL CARMEN TIBURCIO MUNIVE

### RESUMEN

El presente trabajo evalúa las características de la remoción de cromo con wollastonita natural a partir de soluciones sintéticas de cromo (VI) en medio ácido. Para realizar este estudio se desarrolló un diseño factorial  $2^3$  en el cual se estudiaron los factores: relación sólido/líquido, concentración de cromo en solución y temperatura. Se analizó el efecto de los factores principales y sus interacciones sobre el porcentaje de remoción de cromo mediante análisis gráficos. Asimismo, se desarrolló una ecuación de predicción del porcentaje de remoción de cromo en función de los efectos principales e interacciones más significativas, obteniendo correlaciones satisfactorias entre la información experimental y la predicha por la ecuación.

**Palabras clave:** Wollastonita, Cromo (VI), Adsorción.

### ABSTRACT

*This study evaluates the characteristics of chromium removal with natural wollastonite from synthetic solutions of chromium (VI) in acidic medium. To achieve this goal, a factorial  $2^3$  design was used. The effects of solid/liquid relationship, chromium concentration and temperature were studied. The effects of main variables and their interactions on the percentage of chromium removal from solutions were obtained. Also, a prediction equation was developed for percentage of chromium removal as a function of the input variables and the most significant interactions, obtained a good fit between experimental and computed values.*

**Keywords:** Wollastonite, Chromium (VI), Adsorption.

DR. MARTÍN ANTONIO ENCINAS ROMERO  
Correo: maencinas@iq.uson.mx  
M.C. LUIS ALBERTO NÚÑEZ RODRÍGUEZ  
Correo: lui\_iq1983@hotmail.com  
DR. AGUSTÍN GÓMEZ ÁLVAREZ  
Correo: agomez@iq.uson.mx

DR. GUILLERMO DEL CARMEN TIBURCIO MUNIVE  
Correo: gtmunive@iq.uson.mx  
Depto. de Ingeniería Química y Metalurgia,  
Universidad de Sonora

\*Autor para correspondencia: Dr. Martín Antonio Encinas Romero  
Correo electrónico: maencinas@iq.uson.mx  
Recibido: 17 de Marzo del 2015  
Aceptado: 17 de Junio del 2015  
ISSN: 2007-4530

## INTRODUCCIÓN

Los malos manejos de los desechos industriales en el pasado están provocando cambios en los ecosistemas y en sus habitantes a nivel mundial, esto ha forzado a que gobiernos, universidades, centros de investigación y población en general busquen soluciones a este problema.

La contaminación de ecosistemas por lo general es consecuencia de la rápida expansión y muchas veces sin planificación previa de áreas urbanas y de asentamiento de numerosas industrias, desde donde se vierten desechos residuales. Los problemas de contaminación de aguas y suelos han llevado a los países de América Latina a encarar proyectos de evaluación y tratamientos de los recursos deteriorados y desarrollar políticas para su recuperación. Ante esta problemática, nuestro país ha iniciado una serie de cambios dentro de su legislación, tendientes a abatir o en su caso prevenir o controlar la contaminación producida por la actividad industrial. Uno de estos contaminantes es el cromo hexavalente, cuyos compuestos son carcinógenos y corrosivos de tejidos. A largo plazo sensibiliza la piel y daña a los riñones. Cuando éste es asimilado por humanos busca siempre su forma estable Cr (III). Las reacciones que lo llevan de la forma (VI) a (III) generan el consiguiente perjuicio para la salud, derivando en procesos tóxicos, carcinógenos y mutagénicos [1, 2].

Entre las industrias y/o establecimientos de servicio con procesos donde se utiliza el cromo y sus derivados se encuentra la metalúrgica (aleaciones ferrosas y no ferrosas), curtidurías, electroplatinado, colorantes, textiles, imprentas, entre otras [3].

Se ha desarrollado una amplia gama de procesos físicos y químicos para la remoción de cromo hexavalente, dentro de los que destacan precipitación química, ósmosis inversa, intercambio iónico y adsorción en carbón activado. Este último ha sido adoptado por varias industrias debido a su excelente capacidad de adsorción, sin embargo, su uso está limitado debido a su elevado costo. Por otra parte, la wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) es un silicato de calcio, donde su reconocida cualidad como "adsorbente químico" lo cataloga como un mineral utilizable en los procesos de corrección y restauración ambiental [4-6].

En este contexto, el presente trabajo propone una técnica sencilla y práctica: utiliza un material accesible, económico y de gran importancia regional en el Estado de Sonora, como la wollastonita, para separar iones de cromo de soluciones sintéticas de cromo (VI) en medio ácido, como una alternativa a los procesos de remoción convencionales.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se utilizó wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ), NYAD M-200 (Minera NYCO, S.A. de C.V.) con una pureza del 98.25%. Las características más importantes aparecen en la tabla 1.

Para el desarrollo de las pruebas se utilizó un reactor de vidrio Pyrex, equipado con sistemas de agitación y

calentamiento, en el cual se colocaron 500 mL de solución sintética de Cr (VI), expuesta durante 120 min a la reacción de adsorción con la wollastonita. Posteriormente las soluciones agotadas se colectaron para el análisis de cromo remanente, en un equipo de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3110.

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, se utilizó un diseño factorial  $2^3$  completo con dos réplicas de cada tratamiento [7].

### Condiciones Constantes

- Volumen de la solución para adsorción: 500 mL
- pH controlado a: 2.5
- Velocidad de agitación: 120 rpm.

### En este diseño se evaluaron los siguientes factores y sus respectivos niveles:

Relación Sólido/Líquido (A)	(+) 0.04 g/mL (-) 0.02 g/mL
Concentración de Cromo (B)	(+) 10 ppm (-) 2.5 ppm
Temperatura (C)	(+) 50°C (-) 30°C

Tabla 1. Propiedades típicas de la Wollastonita NYAD® M-200, producida por la Minera NYCO, S.A. de C.V. [8].

PROPIEDADES TÍPICAS	VALOR
Apariencia	Blanca
Morfología	Acicular
Peso molecular	116.00
Gravedad específica	2.90
Tamaño de partícula promedio ( $\mu\text{m}$ )	9.00
Área superficial ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) (BET)	1.30
Índice de refracción	1.63
pH (10%)	9.90
Solubilidad en agua (g/100cc.)	0.0095
Densidad (lbs./cu.ft.)	181.00
Dureza Mohs	4.50
Coeficiente de expansión ( $\text{mm}/\text{mm}/^\circ\text{C}$ )	$6.5 \times 10^{-6}$
Punto de fusión ( $^\circ\text{C}$ ) – Teórico	1540.00
Punto de fusión ( $^\circ\text{C}$ ) – ASTM D1857	1410.00

Para el análisis de los datos obtenidos en la sección experimental se desarrollaron análisis gráficos para los efectos e interacciones, tanto para los valores promedio del porcentaje de remoción de cromo, así como para los valores de la desviación estándar. Con los cuales se tuvo conocimiento de los efectos e interacciones

más significativos, así como también una idea clara de la variabilidad del proceso. Con lo anterior se pudo identificar cuáles de los factores analizados se proyectan como “Factores de Control” y cuáles no presentan esta característica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 2, muestra los resultados experimentales para los porcentajes remoción de Cr con wollastonita natural, para un tiempo de procesamiento de 120 minutos. En ésta

se aprecian porcentajes de remoción que varían desde 24.98% hasta 76.08%, con valores de desviación estándar pequeños en relación con los valores de porcentaje de remoción de Cr.

La figura 1 muestra el efecto de cada factor e interacciones sobre la variable de respuesta, también se puede apreciar que el mayor efecto sobre el proceso de remoción de Cr con wollastonita se atribuye al Factor C (temperatura), seguido de la interacción BC, los factores B (Concentración de Cr), A (relación Sólido/Líquido) y finalmente la interacción ABC.

Tabla 2. Matriz de datos experimentales del porcentaje de remoción de Cr con un diseño factorial 2<sup>3</sup>.

PRUEBA	RELACIÓN SÓLIDO/LÍQUIDO (A)	CONCENTRACIÓN DE Cr (B)	TEMPERATURA (C)	Y1 %	Y2 %	PROM %	S
1	-	-	-	26.76	30.76	28.76	2.82
2	-	-	+	54.07	62.16	58.11	5.72
3	-	+	-	22.42	27.56	24.98	3.62
4	-	+	+	31.94	37.87	34.9	4.18
5	+	-	-	28.77	25.2	26.98	2.52
6	+	-	+	78.37	73.8	76.08	3.23
7	+	+	-	30.53	33.57	32.05	2.14
8	+	+	+	40.03	41.99	41.01	1.38

En la figura 2 se ilustra el diagrama de Pareto, en el cual se observa que el orden de significancia de los factores e interacciones resultó como se muestra a continuación: la temperatura (Factor C), la concentración de Cr en solución (B), la interacción entre ambos (BC), la relación sólido/líquido (A) y finalmente la interacción triple (ABC).

La figura 3 presenta el efecto de las interacciones entre los tres factores principales, mostrando el efecto combinado que surge al cambiar sus respectivos valores, desde los niveles bajos hasta los niveles altos, reafirmando las apreciaciones encontradas en los análisis gráficos anteriores.

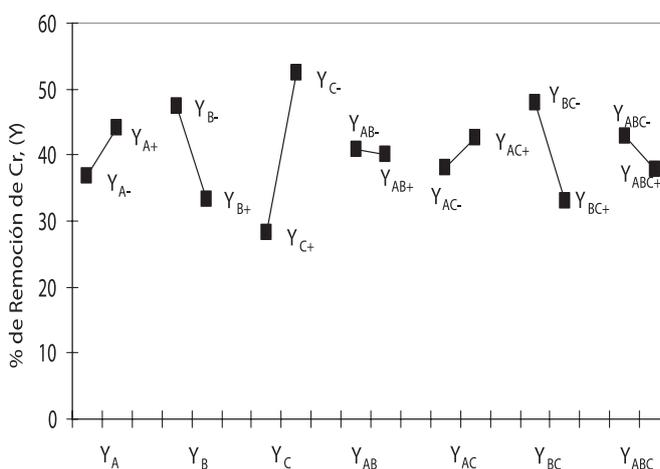


Figura 1. Efectos principales e interacciones sobre el porcentaje de remoción de Cr.

A = Relación sólido/líquido, B = Concentración de Cr en solución, C = Temperatura.

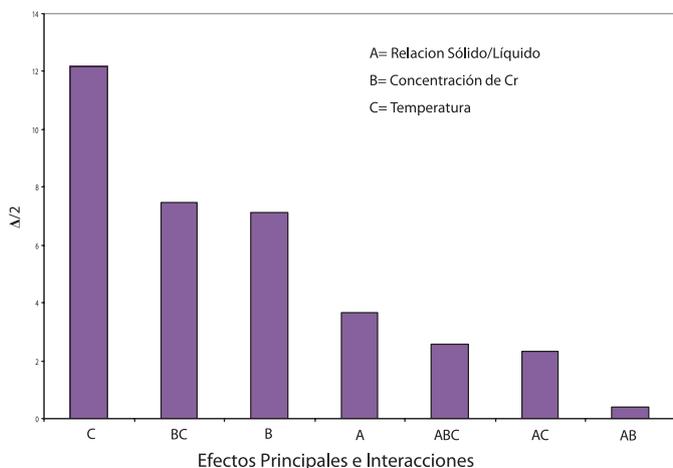


Figura 2. Diagrama de Pareto para el proceso de adsorción de Cr con Wollastonita.

A = Relación sólido/líquido, B = Concentración de Cr en solución, C = Temperatura.

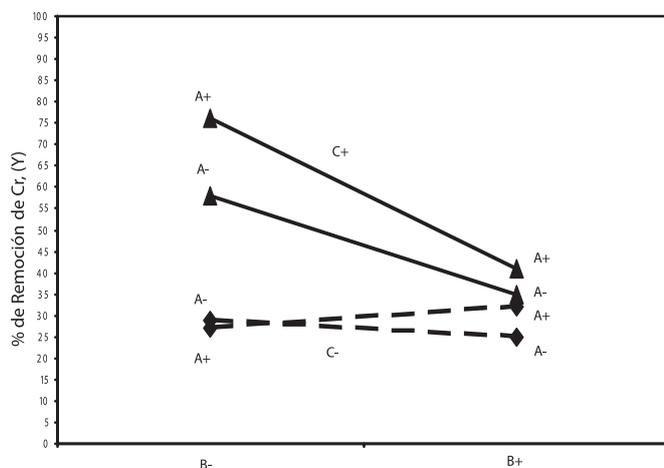


Figura 3. Análisis de las interacciones entre los factores principales.

A = Relación sólido/líquido, B = Concentración de Cr en solución C = Temperatura.

Con esta información se obtuvo la ecuación de predicción en la cual se expresa la variable de respuesta (Y), en función de los factores e interacciones más significativas; misma que se muestra a continuación:

$$Y = \hat{Y} + (\Delta_A / 2) A + (\Delta_B / 2) B + (\Delta_C / 2) C + (\Delta_{BC} / 2) BC + (\Delta_{ABC} / 2) ABC \quad (1)$$

donde : Y = Valor calculado por la correlación.  
 $\hat{Y}$  = Promedio global de las respuestas.  
 A, B, C = Factores codificados en los niveles alto y bajo (+1 y -1).  
 $\Delta$  = Diferencia entre los promedios en los niveles bajo y alto de cada factor.

Con la información anterior resultó la siguiente ecuación de predicción, para el porcentaje de remoción de cromo:

$$Y = 40.34 + 3.16 A - 7.12 B + 12.16 C - 7.44 BC - 2.58 ABC \quad (2)$$

Con la ecuación (2) se calcularon los porcentajes de remoción de cromo para todas las pruebas, cuyos resultados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los resultados obtenidos mediante la ecuación de predicción y los datos experimentales para el porcentaje de remoción de Cr.

PRUEBA	REMOCIÓN DE Cr EXPERIMENTAL (%)	REMOCIÓN DE Cr CALCULADA CON LA ECUACIÓN DE PREDICCIÓN (%)	DIFERENCIA ENTRE LA REMOCIÓN CALCULADA Y LA REMOCIÓN EXPERIMENTAL (%)
1	28.76	26.75	2.00
2	58.11	60.82	2.70
3	24.98	22.75	2.23
4	34.90	37.36	2.36
5	26.98	28.42	1.44
6	76.08	72.81	3.28
7	32.05	34.23	2.18
8	41.01	38.51	2.50

Esto demuestra que la correlación encontrada así como la asociación de factores puede ser utilizada con gran confiabilidad para la predicción de la remoción de Cr con wollastonita, a cualquier otro nivel de los factores analizados.

Asimismo, el análisis de varianza presentado en la tabla 4 demuestra que existen diferencias significativas en el porcentaje de remoción de Cr, con respecto a los efectos e interacciones más importantes, reportadas en el análisis gráfico.





Tabla 4. Análisis de varianza para el proceso adsorción de Cromo con wollastonita natural.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	MEDIA DE LOS CUADRADOS	F <sub>o</sub>
Relación S/L (A)	215.64	1	215.64	18.49
Concentración inicial de Cr (B)	789.69	1	789.69	67.72
Temperatura (C)	2363.76	1	2363.76	202.7
Interacción AB	24.86	1	24.86	2.13
Interacción AC	88.28	1	88.28	7.57
Interacción BC	910.01	1	910.01	78.09
Interacción ABC	84.63	1	84.63	7.25
Error	93.32	8	11.66	
Total	1475.19	15		
		$F_{0.05, (1, 8)} = 5.32$		

## CONCLUSIONES

El análisis demostró que es posible utilizar la wollastonita natural con buena eficiencia para la remoción de Cr a partir de soluciones sintéticas Cr (VI) en medio ácido, resumiéndose a continuación las condiciones operativas más importantes.

A partir de los resultados del análisis gráfico y el criterio de maximización de la respuesta y minimización de la desviación estándar se determinó que el mejor tratamiento o conjunto de condiciones dentro del rango de niveles estudiados es A (+), B (-), C (+), es decir, 0.04 g de wollastonita/mL de solución, 2.5 ppm Cr en solución y 50°C.

Asimismo, la ecuación de predicción del porcentaje remoción de Cr en función de los efectos e interacciones más significativos resultó en muy buenas correlaciones entre la información experimental y la predicha por esta

ecuación.

Comparando los resultados de esta investigación con otros trabajos, se puede distinguir que éste es el único en donde se utiliza wollastonita natural para adsorción de iones Cromo (VI); en contraste con la investigación desarrollada por Sharma y colaboradores [5, 6], donde se utilizó wollastonita sintética.

Aunque los resultados de porcentaje de remoción de Cromo (VI) en ambas investigaciones son del mismo orden, el uso de materiales naturales en relación con el uso de materiales sintéticos hace más económicos los procesos a escala mayor; asimismo, se ponen de manifiesto una aplicación adicional de un mineral no metálico de gran importancia en el Estado de Sonora.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) F. Ulrich, Changes in Metals Mobilities in Aquatic and Terrestrial Cycles, in Metals Speciation, Separation, and Recovery. Patterson, J.W. and Passino, R, Eds. Lewis Publishers, Inc. USA. 3-26, 1987.
- 2) M.E. Losi, C. Amrhein, and W.T. Frankenberger, Environmental Biochemistry of Chromium, Review of Environmental Toxicology. 136: 91-121, 1994.
- 3) A. Esmaeili, A. Mesdaghinia, and R. Vazirinejad, Chromium (III) Removal and Recovery from Tannery Wastewater by Precipitation Process, American Journal of Applied Sciences: 2 (10): 1471-1473, 2005.
- 4) C.D. Palmer, and P.R. Wittbrodt, Processes Affecting the Remediation of Chromium-Contaminated Sites, Environmental Health Perspectives. 92: 25-40, 1991.
- 5) Y.C. Sharma, Adsorption of Cr (VI) onto Wollastonite: Effect of pH, NISCAIR-CSIR, India, 186-190, 2001.
- 6) Y.C. Sharma, V. Uma, Srivastava, J. Srivastava, M. Mahto, Reclamation of Cr (VI) rich water and wastewater by wollastonite, Chemical Engineering Journal, 127, 151-156, 2007.
- 7) D.C. Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, Primera Edición en español, editorial Iberoamérica., México D.F. 1991.
- 8) NYCO Minerals Inc., Premium Quality Wollastonite NYAD<sup>3</sup> M325. NYCO IN-299-04-01 Booklet, Nycos Minerals Inc., Willsboro NY., 2001.