

REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO DE UN EFLUENTE CONTAMINADO UTILIZANDO UNA RESINA QUELANTE

Ramona Guadalupe MARTÍNEZ MEZA*, María Teresa CERTUCHA BARRAGÁN,
Paul ZAVALA RIVERA, Agustín GÓMEZ ÁLVAREZ y Luis Alonso ALMAZÁN HOLGUÍN

Universidad de Sonora. Bulevar Luis Encinas y Rosales, Colonia Centro, Hermosillo, Sonora, México, C. P. 83000

*Autor para correspondencia: ramona.martinez@iq.uson.mx

(Recibido julio 2015; aceptado diciembre 2016)

Palabras clave: metales pesados, quelante, capacidad de adsorción

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de la resina quelante Dowex M-4195 para la remoción de hierro y manganeso, a partir de soluciones de dos fuentes: una proveniente de la infiltración de una presa de jales en desuso (J1) y otra de agua residual del proceso de recuperación de cobre (M1). Se aplicó el modelo de Langmuir para determinar la capacidad de adsorción de la resina. El análisis de los resultados muestra una capacidad de adsorción de 7.5 mg Fe/g de resina y 4.0 mg Mn/g, con remoción de 70 y 25 %, respectivamente para la muestra J1 en un tiempo de contacto de 12 h. Para la muestra M1 fue de 12.5 mg Fe/g y de 2.96 mg Mn/g, con remoción del 58 y 20% para cada metal, en un tiempo de contacto de 5 h. Los resultados del análisis de espectroscopía de infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR) muestran las modificaciones en los enlaces del grupo funcional de la resina debido a la adsorción de los metales. Estos resultados indican que el uso de la resina quelante Dowex M-4195 puede ser una alternativa a los tratamientos convencionales para la recuperación o remoción de metales pesados de soluciones acuosas.

Key words: heavy metals, chelating, adsorption capacity

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the ability of removing iron and manganese in the chelating resin Dowex M-4195, from solutions of the infiltration from a tailing dam (J1) and a wastewater in copper recovery process (M1). The Langmuir model was used to determine the adsorption capacity of the resin. The results show an adsorption capacity of the resin of 7.5 mg Fe/g and 4.0 mg Mn/g with a removal of 70 and 25 %, respectively for sample J1, with a contact time of 12 h. For sample M1 it was obtained 12.5 mg Fe/g and 2.96 mg Mn/g, with a removal of 58 and 20 % for each metal with a contact time of 5 h. Results of FTIR analysis show modifications in the functional groups bonded to the resin due to adsorption of metals. These results indicate that the use of resin Dowex M-4195 can be an alternative to conventional treatments for the recovery or removal of heavy metals from aqueous solutions.

INTRODUCCIÓN

La calidad de las aguas puede ser alterada como consecuencia de actividades antrópicas y por procesos naturales que provocan efectos adversos que disminuyen dicha calidad para el uso humano y de la biota. En forma general, puede definirse la contaminación del agua como la alteración desfavorable que sufre al incorporarse en ella una serie de substancias que cambian sus condiciones naturales de calidad y que pueden ocasionar riesgos a la salud y al bienestar de la población humana (Branco 1984). Las especies metálicas liberadas al ambiente por las actividades industriales tienden a persistir indefinidamente, circulando y acumulándose eventualmente en la cadena alimenticia, lo que plantea un serio problema para animales y humanos (Volesky y May-Phillips 1995, Topalian et al. 1999). Además, los metales se incorporan de forma natural en los sistemas acuáticos como resultado de la lixiviación de suelos, rocas y erupciones volcánicas (Laws 1993). Asimismo, pueden provenir de las actividades antrópicas como son: las agrícolas, domésticas, industriales y mineras (Mountouris et al. 2002). Adicionalmente, la actividad minera y metalúrgica, a través del procesamiento de minerales y su fundición, podría causar la dispersión y depósito de cantidades considerables de metales en el ambiente, cuando existe alguna operación inadecuada (Mountouris et al. 2002).

Un ejemplo de contaminación debido a la actividad minera se encuentra en el río San Pedro, localizado en la región noroeste del estado de Sonora, México. Este río ha recibido en varias ocasiones desechos ácidos provenientes del depósito “Concentradora Vieja”, el cual se localiza dentro del área de explotación del mineral de cobre. Además de descargas de aguas residuales urbanas (aguas negras) sin tratamiento, provenientes de un sector de la ciudad de Cananea, Sonora. En estudios realizados durante el periodo 1997-1999, se ha reportado la presencia de altos niveles de metales pesados como cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), zinc (Zn) y sulfatos en agua y sedimento (Gómez-Álvarez 2001, 2002). Los principales efectos nocivos de este tipo de contaminación son el pH ácido y la formación de sedimentos de color amarillo originados por la oxidación del hierro (Gómez-Álvarez et al. 1997, 2001).

Se han realizado varios proyectos de investigación para evaluar la calidad de agua y sedimento del río San Pedro (Gómez-Álvarez et al. 1994, 1996, 2001, Villalba-Atondo et al. 1998, 2000). Sin embargo, éstos se han enfocado a evaluar principalmente los

contenidos totales de metales en agua y sedimento. Se ha encontrado que los sitios más contaminados del río San Pedro son los cercanos al depósito “Concentradora Vieja”. El agua superficial de este río al igual que sus sedimentos, se encuentran contaminados con metales pesados en concentraciones que rebasan la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1996).

Existen varias tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas, una de ellas es la adsorción, la cual constituye una alternativa a los tratamientos convencionales para la recuperación de metales pesados en solución acuosa. Grinstead (1985) reportó la habilidad de la resina Dow XFS-4195 para remover Cu, Ni, Co y Fe en soluciones ácidas de cloruro, encontró que la resina tiene una mayor afinidad para el Cu que para el Mn. Por otro lado, Pavlides y Wyether (1995) reportaron que al incrementar la concentración de cloruro de 0.03 a 1.0 M se favorece la adsorción de Ni y/o Co. La resina Dowex M-4195 también se ha utilizado en la destoxificación de soluciones ácidas de lixiviación de un mineral de manganeso con altas concentraciones metales pesados (Cu, Ni, Fe, Co, Pb y Zn) y se encontró que tiene una gran afinidad hacia el cobre (Diniz et al. 2000). Por otra parte, esta resina se ha utilizado con soluciones provenientes de la industria de galvanoplastia, para el tratamiento de los efluentes de este proceso (Swing et al. 2003). Además, con esta misma resina se han obtenido resultados favorables en la remoción de Co y Ni, en un estudio realizado con soluciones sintéticas y a partir de un licor de lixiviación (Mendes et al. 2004).

El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de adsorción de hierro y manganeso en una resina quelante Dowex M-4195, mediante isotermas de adsorción, con soluciones provenientes de infiltraciones de una presa de jales en desuso situada en la Ciudad de Cananea, Sonora, México, bajo diferentes condiciones experimentales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Resina quelante

En la **figura 1** se presenta la estructura de la resina Dowex M-4195 (Supelco Inc.), es una resina macroporosa, de carácter base débil con un grupo funcional de bispicolilamina. Tiene forma esférica de color café oscuro y un tamaño de partícula entre $-20 + 50$ mallas. Para determinar cualquier modificación química en la resina, debido a las pruebas de remoción de metales, se hizo un análisis por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FITR por sus siglas en inglés), antes y después del proceso

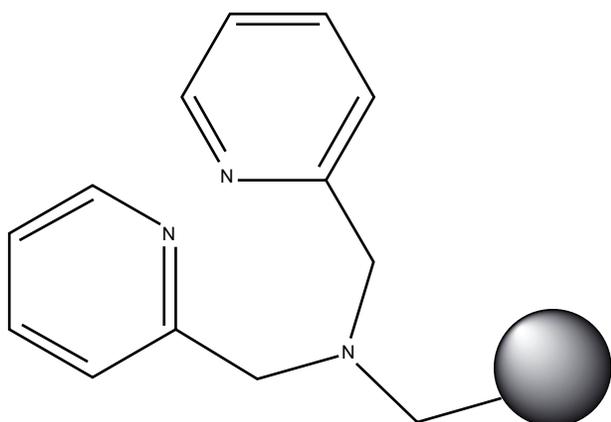


Fig. 1. Estructura de la resina quelante Dowex M-4195

de adsorción, tomando como referencia la señal del grupo funcional de la resina virgen.

Evaluación de parámetros

Muestreo de soluciones con hierro y manganeso

Los métodos que se utilizaron para el análisis de los parámetros de campo y de metales pesados son los que recomienda el manual de métodos de análisis (CNA 1995) y el methods for chemical analysis of water and wastes (EPA 1983). Para la determinación y cuantificación de metales pesados totales (Fe y Mn) se empleó el método de espectroscopía de absorción atómica por flama con un equipo de absorción atómica Perkin-Elmer Modelo 3110 y los siguientes límites de detección: Fe 0.04 mg/L y Mn 0.02 mg/L.

La precisión y exactitud en el análisis de metales fue evaluada a través de muestras enriquecidas. Se obtuvieron los siguientes valores de recuperación: Fe 94.90 % y Mn 98.17 %, mismos que se encuentran dentro del rango recomendado (CNA 1993). Para evaluar la calidad del agua superficial del río San Pedro se utilizaron los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89; SEDUE 1989).

Efecto de la concentración de resina y el tiempo de contacto

Los parámetros que se evaluaron en la adsorción de hierro y manganeso a partir de soluciones reales fueron la concentración de resina (2, 4, 6 y 8 g/L) y tiempo de contacto (4, 12 y 24 h) para ambas muestras (J1, M1), se mantuvo constante el pH natural y la velocidad de agitación de 200 rpm.

Capacidad de adsorción de la resina

Para determinar la capacidad de adsorción de la resina se utilizó un reactor de vidrio al cual se le adicionaron 250 mL de solución (J1 y/o M1) con

diferentes concentraciones de resina (2, 4, 6 y 8 g/L), a temperatura ambiente (25 °C) y una velocidad de agitación de 200 rpm por 24 h. Se tomaron alícuotas de 10 mL cada 4, 12 y 24 h, a pH natural. Para determinar la concentración del metal, las muestras se analizaron por la técnica de espectroscopía de absorción atómica (AAS), con un equipo Perkin-Elmer, Modelo 3110 y los siguientes límites de detección: Fe 0.04 mg/L y Mn 0.02 mg/L.

Para el cálculo de la capacidad de adsorción de la resina en el equilibrio se utilizó la ecuación 1.

$$q_e = \frac{(C_{\text{inicial}} - C_{\text{residual}})V_{\text{(litros)}}}{g_{\text{resina}}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio (mg metal/g de resina), V es el volumen de muestra utilizada en litros, C representa la concentración del metal en mg/L y g_{resina} son los g/L de resina.

Para determinar la máxima capacidad de adsorción de la resina, los datos experimentales se ajustaron al modelo matemático de Langmuir, el cual se representa en la ecuación 2.

$$q_e = \frac{q_{\text{max}} b C_e}{1 + b C_e} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g de resina), C_e es la concentración en el equilibrio (mg/L), q_{max} es la capacidad máxima de adsorción (mg/g) y b es el parámetro de la ecuación. La evaluación de la capacidad máxima de adsorción se determinó con el modelo de Langmuir linealizado en la ecuación 3.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\text{max}}} + \frac{1}{q_{\text{max}} b} \quad (\text{Ec. 3})$$

Caracterización por espectroscopía de infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR)

Para corroborar la presencia de los grupos funcionales de la resina Dowex M-4195 y los cambios ocurridos en éstos, se obtuvieron los espectros infrarrojos para la resina nueva, así como para la resina que estuvo en contacto con la solución J1 y M1 respectivamente. El intervalo de frecuencia de barrido fue de 370-4000 cm^{-1} en un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier de haz doble Perkin Elmer.

Saturación de la resina

Para llevar a cabo este proceso se utilizó un reactor de 500 mL con 2 g de resina y 250 mL de solución J1 y/o M1. Cada 24 h se tomaba una alícuota de 10 mL para el análisis y se desechaba el resto de la solución

para después cargar de nuevo el reactor con solución nueva, pero dejando en él la cantidad de resina con la cual se inició el experimento. Este procedimiento se realizó por siete etapas de 24 a 200 rpm y a temperatura de 25 °C. La concentración de los iones metálicos se determinó por espectrofotometría de absorción atómica.

Despojamiento de la resina

El despojamiento de la resina saturada, se llevó a cabo en un reactor de 500 mL al cual se le agregó la resina que se obtuvo del proceso de saturación junto con 250 mL de H₂SO₄ al 2 %, a 200 rpm y temperatura de 25 °C. Se tomaron alícuotas de 10 mL a 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 24 h de contacto. La concentración de los iones metálicos se determinó por espectrofotometría de absorción atómica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de muestreo

Los resultados de la concentración del contenido metálico de la muestra J1 indican que tiene 60 mg/L de Fe y 40 Mn. En M1, el contenido de Fe y Mn es de 132.5 y de 114.3 mg/L respectivamente, que son los metales de estudio de este trabajo. Además, se detectó la presencia de Cu, Cd y Zn en ambas muestras (**Cuadro I**).

CUADRO I. ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES REALES

Muestra	Cu	Cd	Fe	Mn	Zn
J1 (mg/L)	19.2	20	60	40	15.2
M1 (mg/L)	12.5	15.2	132.5	114.3	47.6

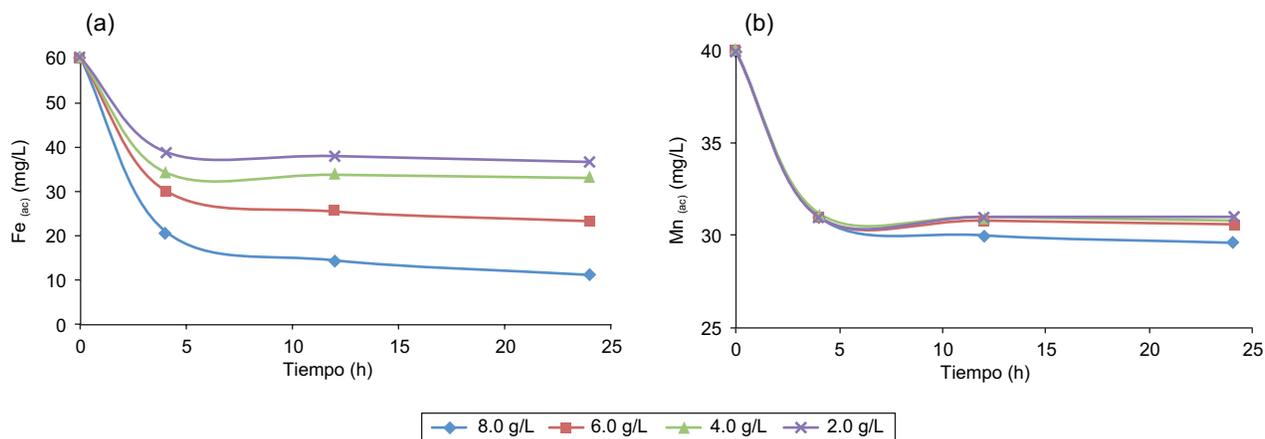


Fig. 2. Efecto de la concentración de la resina y tiempo de contacto: (a) para la muestra J1, [Fe]_i = 60 g/L y (b) para la muestra J1, [Mn]_i = 40 g/L. T = 25 °C, pH = 2.03, 200 rpm, para diferentes tiempos de contacto

Efecto de la concentración de la resina y el tiempo de contacto

En la **figura 2a** se observa el efecto de la concentración de resina en la adsorción de hierro presente en la solución J1, se puede apreciar que la concentración de hierro en la solución disminuye respecto a la concentración de resina, lo que puede ser debido a que al incrementar la cantidad de resina también aumenta el número de sitios activos disponibles para la adsorción. Asimismo, se observa que la adsorción del hierro es de 68 % y ocurre en las primeras 4 h para la relación de 8 g/L de resina.

En la **figura 2b** se observa el efecto de la relación sólido/líquido en la adsorción de manganeso de la solución J1, donde se aprecia que no hay un efecto significativo al incrementar la cantidad de resina, se logró obtener 25 % con 8 g/L.

En la **figura 3a** se muestran los resultados de la relación sólido/líquido para la muestra M1, se aprecia que la concentración de hierro ha disminuido hasta 60 g/L, por lo que la adsorción de hierro es de 54 % en las primeras 12 h de contacto con una concentración de 8 g/L de resina.

En el caso de la adsorción del manganeso presente en la muestra M1, se observa que la adsorción es de 12 % en 4 h de contacto, como se aprecia en la **figura 3b**, independientemente de la cantidad de resina presente. Finalmente, se observa que a una concentración de 8 g/L de la resina, se adsorbe el 18 % de manganeso en la solución.

Capacidad máxima de adsorción

La máxima capacidad de adsorción de la resina se determinó de manera gráfica, utilizando el modelo de Langmuir linealizado, (Ec. 3). En la **figura 4** se muestran los datos obtenidos en el equilibrio, es

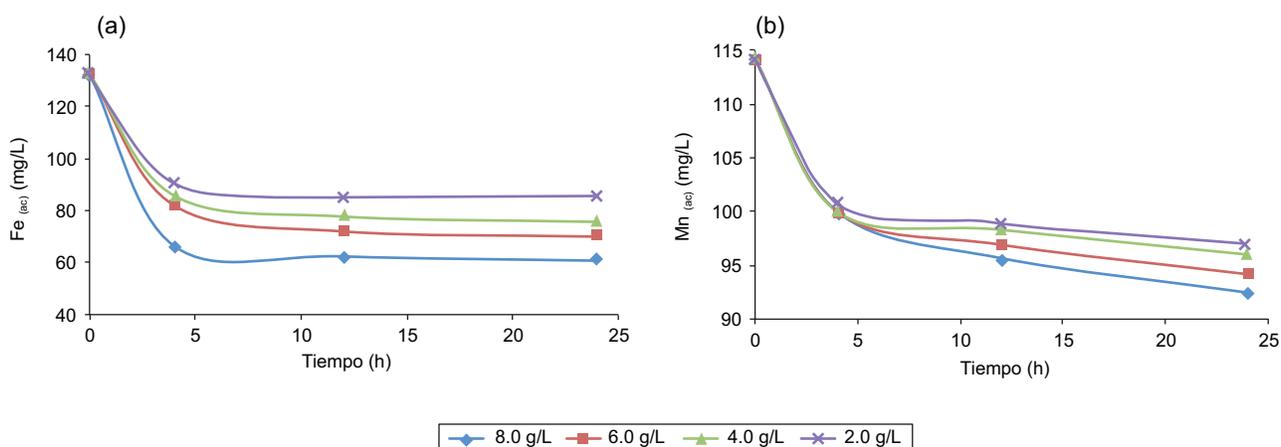


Fig. 3. Efecto de la concentración de la resina y tiempo de contacto: (a) para la muestra M1, $[Fe]_i = 132.5 \text{ g/L}$ y (b) para la muestra M1, $[Mn]_i = 114.3 \text{ g/L}$. $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 2.5$, 200 rpm , para diferentes tiempos de contacto

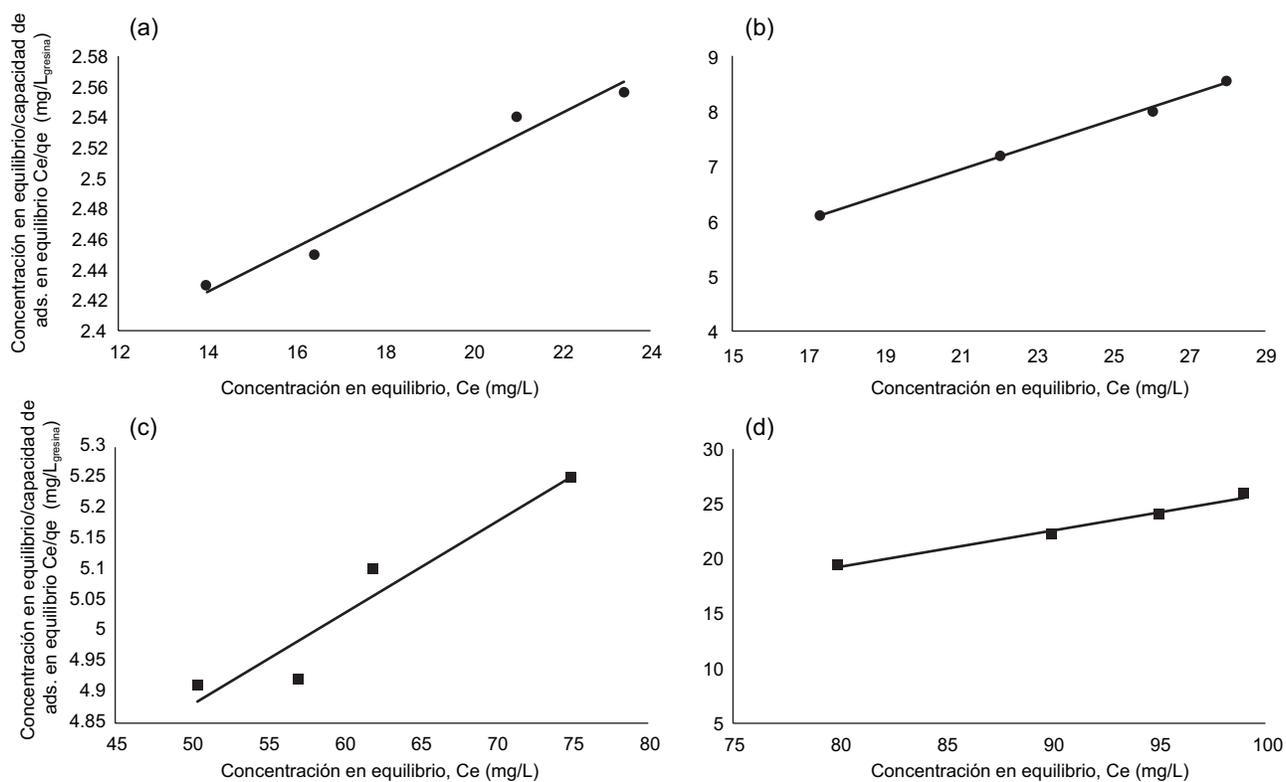


Fig. 4. Isotermas de Langmuir linealizadas para la adsorción de hierro (a) y manganeso (b) a partir de la muestra J1, hierro (c) y manganeso (d) a partir de la muestra M1

decir, cuando el proceso de adsorción ya no presenta cambio alguno. Se determinó que la capacidad de adsorción de la resina es de 7.5 mg Fe/g de resina. Los valores de q_{max} y b se plasman en el **cuadro II**. Los altos valores del coeficiente de determinación (R^2) sugieren que el modelo de isotermas de Langmuir, el cual corresponde a una adsorción monocapa, es aplicable para describir la adsorción de los iones de

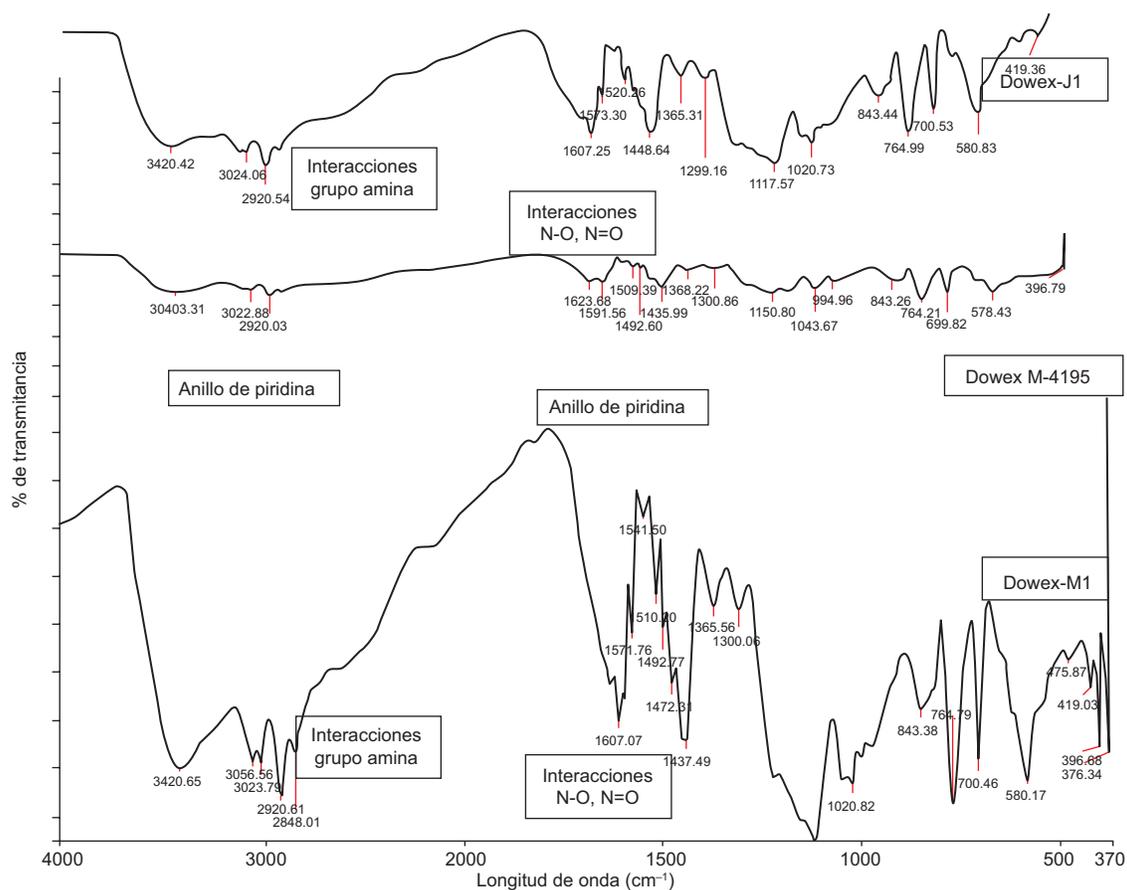
hierro y manganeso presentes en las soluciones J1 y M1. En este trabajo se observa que la afinidad de la resina es mayor hacia el hierro, estos resultados concuerdan con los que reportan Diniz et al. (2005).

Caracterización FTIR

En el espectro de la **figura 5** se muestran los resultados de la estructura de la resina antes y después de

CUADRO II. PARÁMETROS DE LANGMUIR PARA LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO

Muestra	Metal pesado	Parámetros de Langmuir		
		Capacidad máxima de adsorción q_{max} (mg/g)	Constante de Langmuir b (L/mg)	Coefficiente de determinación R^2
J1	Fe	7.5	0.03	0.9847
	Mn	4.0	0.07	0.9891
M1	Fe	12.5	0.04	0.9891
	Mn	2.96	0.08	0.9899

**Fig. 5.** Espectros infrarrojo de la resina Dowex M-4195, antes y después de la adsorción

la adsorción. Se registran bandas intensas (en 1607 a 1541 cm^{-1}) de los anillos correspondientes al grupo funcional bis (2- piridilmetil) amina. Por otro lado, en el espectro Dowex-J1 se observa en 2920 cm^{-1} una banda correspondiente al estiramiento del grupo amina, al igual que en 1607 cm^{-1} . Además, se muestra una elongación del enlace C-H y en la flexión del enlace N-H se aprecia estiramiento en la banda 764 cm^{-1} .

Respecto a Dowex-M1 se encontró una banda ancha intensa correspondiente al estiramiento del grupo

funcional en 2848 cm^{-1} . Asimismo, una elongación a 1607 cm^{-1} . Esto se puede deber a que el grupo insaturado bis (2-piridimetilamina) se transforma en N-óxido de piridina. Algo semejante ocurre a 760 cm^{-1} debido a la elongación del enlace C-H derivado de la interacción del hierro y manganeso. En cambio, en la Dowex M4195 (resina sin tratamiento) no se observan estos picos o elongaciones dentro del espectro de FTIR. Este hecho sugiere que los grupos funcionales de la resina Dowex M4195, podrían ser

oxidados durante el proceso de adsorción. Por lo que se puede concluir que existen modificaciones en los enlaces del grupo funcional de la resina y son más evidentes en la muestra M1, la cual contiene una concentración mayor de los iones metálicos.

Saturación de la resina

Muestra J1

La **figura 6** muestra el perfil de envenenamiento de la resina en la adsorción de hierro y manganeso presentes en la muestra J1. En las primeras 24 h se tiene una adsorción del 75 % del hierro en solución para después disminuir hasta llegar a las 120 h, que es donde se mantiene constante, el total acumulado de hierro en esta etapa es de 79 mg. Respecto al manganeso, se adsorbe un 25 % en solución durante las primeras 24 h de contacto, se aprecia también que después de 48 h no existen cambios significativos en su adsorción. Un balance de masa indica que la cantidad acumulada de manganeso es de 39.9 mg.

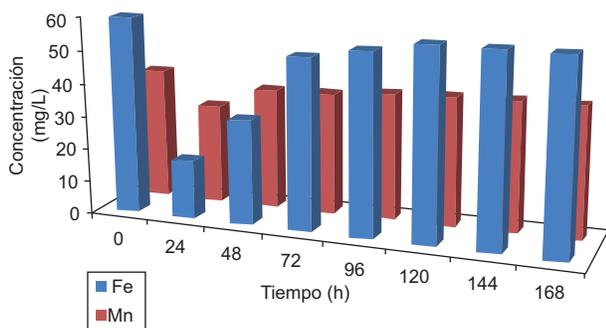


Fig. 6. Perfil de envenenamiento de la resina en la adsorción de hierro de la muestra J1. Hierro $[Fe]_i = 60$ y manganeso $[Mn]_i = 40$ mg/L pH = 2.03, 200 rpm, T = 25 °C, t = 168 h

Muestra M1

Inicialmente la resina se pone en contacto con la solución que tiene una concentración de 132.5 mg/L de Fe y 114.4 mg/L de Mn, por 168 h. La **figura 7** muestra el comportamiento de saturación de la resina para el Fe y Mn, se observa que la cantidad adsorbida de Fe es de 303.9 mg en 96 h, mientras que la de Mn es de 83.7 mg en 48 h.

Despojamiento de la resina

Muestra J1

La **figura 8** muestra la prueba de despojamiento del hierro presente en la resina, el cual se obtuvo de la muestra J1. Se realizó un balance de masa para obtener la cantidad de hierro en la resina,

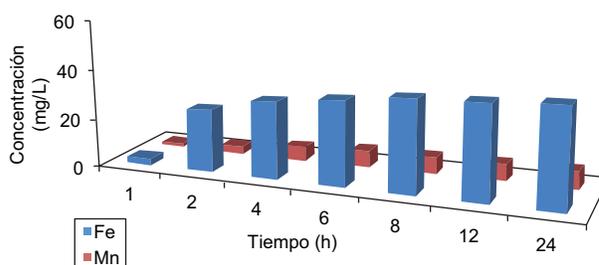


Fig. 7. Perfil de envenenamiento de la resina en la adsorción de hierro (Fe) de la muestra M1. Hierro $[Fe]_i = 132.5$ y manganeso $[Mn]_i = 114.3$ mg/L, pH = 2.5, 200 rpm, T = 25 °C, t = 168 h

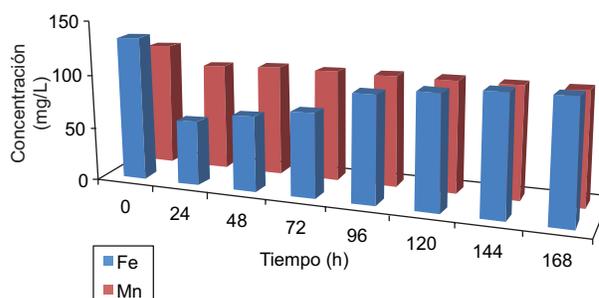


Fig. 8. Prueba de despojamiento de hierro (Fe) y manganeso (Mn) de la resina cargada de la muestra J1. $[Fe] = 79$ mg, $[Mn] = 39.3$ mg, resina 8 g/L

dicha cantidad es de 79 mg cuando se tiene una concentración de resina de 8 g/L en solución. Se puede apreciar que existe una rápida velocidad de disolución respecto al tiempo en las primeras 8 h de contacto, despojándose un 50.7 % del hierro total de la resina. Sobre el manganeso se realizó un balance de masa y se determinó que la cantidad acumulada de manganeso en la resina fue de 39.3 mg, ésta se pone en contacto con la solución de ácido sulfúrico al 2 %. Se observa una rápida velocidad de despojamiento, que ocurre en las primeras 6 h de contacto, se puede apreciar que se obtiene un 20 % de disolución del manganeso.

Muestra M1

En lo que respecta a la muestra M1, el análisis acumulativo indica que se tiene una cantidad de 303.9 mg de Fe en la resina, que al ponerla en contacto con la solución de ácido sulfúrico al 2 %, se desprende 51 % del hierro acumulado. En el caso del manganeso se obtuvo un acumulativo de 83.7 mg y se desprende sólo el 18.8 %, lo que equivale a 15.7 mg/L. En la **figura 9** se puede apreciar el comportamiento de la disolución, la cual ocurre en las primeras 12 h de contacto, a mayores tiempos la disolución no es significativa.

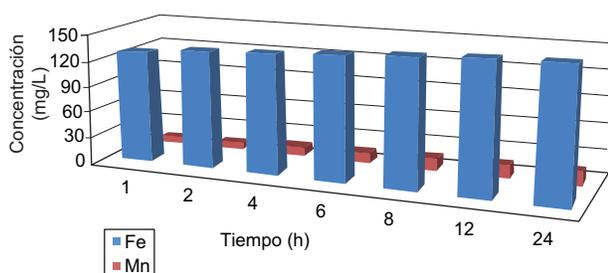


Fig. 9. Prueba de despojamiento de hierro (Fe) y manganeso (Mn) de la resina cargada de la muestra M1. [Fe] = 303.9 mg, [Mn] = 83.7 mg, resina 8 g/L

CONCLUSIONES

En este trabajo se determinó la capacidad de adsorción de Fe y Mn en la resina quelante Dowex M-4195. De acuerdo con la relación sólido/líquido, se demostró que si se incrementa la cantidad de resina (2 a 8 g/L), se eleva el porcentaje de adsorción de ambos elementos debido al mayor número de sitios disponibles. Además, la resina tuvo una mayor afinidad por el Fe que por el Mn, probablemente debido a que el Fe presenta dos estados de oxidación.

Asimismo, los coeficientes de determinación indicaron que el modelo de Langmuir es aplicable al proceso de adsorción de estos dos elementos estudiados.

Los espectros FTIR indicaron una modificación en los enlaces del grupo funcional de la resina debido a la adsorción de Fe y Mn.

El uso de la resina quelante Dowex M-4195 puede ser una alternativa a los tratamientos convencionales para la recuperación o remoción de metales potencialmente tóxicos presentes en soluciones acuosas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Branco-Murgel M.S. (1984). Limnología sanitaria. Estudio de la polución de aguas continentales. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C., EUA, 120 pp.
- CNA (1995). Manual de métodos de análisis. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Subgerencia de Laboratorios y Monitoreo. México, D.F., México, 360 pp.
- Diniz C.V., Doyle F.M. y Martins A.H. (2000). Uptake of heavy metals by chelating resins from acidic manganese chloride solutions. *Miner. Metall. Proc.* 17, 217-222.
- Droste R.L. (1997). Theory and practice of water and wastewater treatment. Wiley, Nueva York, EUA, 184 pp.
- EPA (1983). EPA-600/4-79-020. Methods for chemical analysis of water and wastes. Manual. United States Environmental Protection Agency. Office of Research Development Washington. D.C. EUA., 544 pp.
- Gómez-Álvarez A., Kulatilake P.H.S.W., Villalba-Atondo A. I., Burgos-Flores D. y Sortillón-Valenzuela M. R. (1994). Investigación de la calidad del agua en la cuenca hidrológica del Río San Pedro, Sonora, México. (Primera Etapa). Informe Académico Final. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México, 97 pp.
- Gómez A. A., Villalba A. A. y Romero A. A. (1997). Estudio de la contaminación por metales pesados en el agua superficial del río San Pedro, Sonora, México. *Bol. Dept. Geol. UniSon* 14, 1-16.
- Gómez A. A. (2001). Evaluación de la calidad física y química del agua y sedimento del río San Pedro. Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México, 243 pp.
- Gómez A. A., Villalba A. A., Acosta R. G., Castañeda O. M. y Kamp D. (2004). Metales pesados en el agua superficial del río San Pedro durante 1997 y 1999. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 20 (1), 5-12.
- Grinstead R.R. (1985). Selective adsorption of copper, nickel, cobalt and other transition metals ions from sulfuric acid solutions with the chelating ion exchange resins XFS-4195. *Hidrometallurgy* 12 (11), 387-400. DOI: 10.1016/0304-386X(84)90009-4
- Jermakowiks Bartkowiak D., Cyganowaki P., Lesniewicks A., Tilus W., Checmannowski J. y Marcinowska A. (2015). Spontaneous formation of gold microplates during reduction-coupled removal of noble metals using Dowex M-4195 resin. *J. Appl. Polym. Sci.* 132 (33), 1-12. DOI: 10.1002/app.42425
- Laws A.E. (1993). Aquatic pollution. An introductory text. John Wiley and Sons Inc., Nueva York, EUA. 611 pp.
- Mendes F.D. y Martins A.H. (2004). Selective sorption of nickel and cobalt from sulphate solutions using chelating resins. *Int. J. Miner. Process.* 72 (1-4), 359-371. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.04.003

- Mountouris A., Voutsas E. y Tassios D. (2002). Bioconcentration of heavy metals in aquatic environments: the importance of bioavailability. *Mar. Pollut. Bull.* 44 (10), 1136-1141. DOI: 10.1016/S0025-326X(02)00168-6
- Topalián M.L., Castañé P.M., Rovedatti M.G. y Salibián A. (1999). Principal component analysis of dissolved heavy metals in water of the Reconquista River (Buenos Aires, Argentina). *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.* 63 (4), 484-490. DOI: 10.1007/s001289901006
- Villalba-Atondo A. I., Gómez-Álvarez A., Nubes-Ortiz G., Solís-Garza G., Herrera-Carbajal S., Bringas-Alvarado L., De la O Villanueva M., Cantúa-Sesteaga S., Flores-Ruiz E. y Pérez-Villalba A.M. (2000). Estudio de la calidad del agua en la región fronteriza noreste del estado de Sonora, México. Informe Académico Final. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México, 193 pp.