

hasta 4.48 meq/g. Si se compara este valor con la capacidad de intercambio catiónico de la clinoptilolita, la zeolita natural más abundante en México, la zeolita P sintetizada en este estudio presentó hasta el doble de la capacidad de intercambio catiónico de ésta zeolita natural. Para evaluar a la zeolita P, en cuanto a su capacidad para remover Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} y Fe^{2+} , se realizaron pruebas en reactor discontinuo. A continuación se presentan los parámetros cinéticos obtenidos mediante el modelo de pseudo segundo orden y los parámetros al equilibrio obtenidos con los modelos de Langmuir y de Freundlich.

Tabla 1. Parámetros del modelo de pseudo segundo orden y de Langmuir y de Freundlich para la remoción de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} y Fe^{2+} con la zeolita P sintetizada con jales de cobre.

Metal	Modelo cinético			Modelo de isoterma					
	Pseudo segundo orden			Langmuir			Freundlich		
	k_2 (g/mg min)	q_e (meq/g)	R^2	Q_L	b'	R^2	n	K_F	R^2
Cd^{2+}	0.007	0.816	0.998	33.89	-16.38	0.905	-2.92	76.70	0.265
Pb^{2+}	0.254	0.495	1	36.76	-2.17	0.459	-1.56	104.58	0.334
Cu^{2+}	0.0027	0.863	0.976	161.29	0.007	0.926	1.97	6.22	0.986
Fe^{2+}	0.0008	1.493	0.987	91.74	0.045	0.993	8.89	44.87	0.927

k_2 : constante de pseudo segundo orden; q_e : capacidad de adsorción al equilibrio; Q_L : capacidad de adsorción en la monocapa al equilibrio; b' : constante de Langmuir; n y K_F : constantes de Freundlich.

El proceso de remoción de los metales evaluados mediante la utilización de la zeolita P fue descrito, para los cuatro cationes, mediante el modelo cinético de pseudo segundo orden ($R^2 > 0.97$). Este modelo, para el caso específico de zeolitas, asume que la velocidad de intercambio iónico ocurre sobre la superficie y es la etapa limitante de la cinética de remoción. La cinética es de orden dos respecto al número de sitios disponibles para la adsorción o para el intercambio iónico. En cuanto a los modelos de isothermas, el modelo de Langmuir fue el que describió mejor los datos de remoción para el caso de Cd^{2+} , Cu^{2+} y Fe^{2+} . Para el caso de Pb^{2+} , ni el modelo de Freundlich describió de manera adecuada el proce-

so de remoción. En este último caso, se observó en las gráficas correspondientes (no presentadas) que se está llevando a cabo una desorción debido a la pérdida de la cristalinidad de la zeolita P (Moirou *et al.*, 2000). Por lo anterior, la zeolita P sintetizada con jales de cobre presentó la siguiente selectividad hacia los cationes evaluados: $\text{Fe}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$. Ya que el agua residual generada en el mismo complejo minero (Drenaje Ácido de Minas, DAM), contiene una cantidad considerable de Fe, de hasta 1380 mg/L (Ríos *et al.*, 2008) y de hasta 178 mg/L de Cu^{2+} (Dinelli *et al.*, 2001), se podría utilizar la zeolita P para remover primeramente el Fe^{2+} presente en el DAM, para posteriormente recuperar el Cu^{2+} . De ésta manera se podría reutilizar el agua en el mismo complejo minero y se podría recuperar una cantidad considerable de Cu^{2+} .

Conclusiones. Mediante la implementación de dos etapas en el proceso de síntesis de zeolitas, a) fusión jal-NaOH y, b) cristalización en medio hidrotermal, se logró realizar la síntesis de zeolita P utilizando jales de cobre. Esta zeolita sintetizada fue evaluada para remover Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} y Pb^{2+} , presentando la siguiente selectividad: $\text{Fe}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$. La zeolita P podría utilizarse en el mismo complejo minero para recuperar Cu e incorporarlo al proceso de refinamiento del mismo. Por otra parte, el DAM libre de estos principales cationes, se podría reutilizar en el proceso de extracción primaria de cobre sin afectar el rendimiento del mismo. El proceso de síntesis de zeolitas con estos residuos se encuentra en proceso de registro de una patente (Proceso de fusión-hidrotermal alcalino para la síntesis de zeolita P a partir de jales mineros, No. De expediente ante IMPI: MX/a/2010/005636, Fecha de registro: 21 de mayo de 2010). 📄

BIBLIOGRAFÍA.

Dinelli, E. Lucchini, F. Fabbri, M. Corтеcci G. (2001). J. Geochem. Explora. (74) 141-152.
INEGI, 2010. Instituto <www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/comunicados/minbol.asp> (consulta 9. September. 2010).

Moirou, A. Vaxevanidou, A. Chriridis, G. E. Paspaliaris, I. (2000). The Clay Minerals Society. (48). 563-571.
Ríos, C. A. Williams, C.D. Roberts, C.L. (2007). J. Hazardous Materials. (156) 23-35.