



## Evaluación de la cinética de adsorción de Fe (III) de drenaje ácido de mina mediante organoarcilla

### Evaluation of the adsorption kinetics of Fe (III) of acid mine drainage by organoclay

Walter Segundo Fuentes López<sup>1</sup> / Yessica Bendezú Roca<sup>1</sup> / Rosalinda Rosado Baldeón<sup>2</sup>

Thalia Consuelo Loyola Zevallos<sup>2</sup> / Fiorella Deyssi Uscuvilca Simeón<sup>2</sup>



----- / 0000-0001-7619-2588 / 0000-0001-7618-9872 / ----- / -----

**Autor correspondiente:** wfuentes@uncp.edu.pe

ybendezu@uncp.edu.pe / ----- / ----- / e\_2013100293c@uncp.edu.pe

#### Cómo citar:

Fuentes López, W. S.; Bendezú Roca, Y.; Rosado Baldeón, R.; Loyola Zevallos, T. C. & Uscuvilca Simeón, F. D. (2021). *Evaluación de la cinética de adsorción de Fe (III) de drenaje ácido de mina mediante organoarcilla*. *Prospectiva Universitaria*, revista de la UNCP. 18(1), 143-150. <https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2021.18.1421>

#### Resumen

El drenaje ácido de mina (DAM) de Yanamina - Apaycancha - Ricrán-Jauja, situada a 3848,58 msnm, tiene 215,88 mg/l de hierro total que discurre con las aguas de escorrentía, su mitigación requiere del conocimiento del mecanismo de adsorción del Fe (III) sobre la organoarcilla, elegido como adsorbente por su capacidad de intercambio iónico, extensión superficial, abundancia en la zona y su bajo costo. Se usó un reactor Batch para estudiar la concentración inicial de Fe (III) y su relación con el tiempo de contacto, para determinar las isothermas y cinética de adsorción. La isoterma de Langmuir es la que mejor representa la capacidad de adsorción, alcanzando 15,85 mg/g en la monocapa de la superficie de adsorción, con la cual se consiguió una remoción de 99,5 en 180 minutos, tiempo en que va llegando al equilibrio. La cinética de pseudo segundo orden obtiene una alta correlación y es la que mejor representa proceso, donde el Fe(III) se adsorbe por los sitios activos de la organoarcilla cuya capacidad llega a adsorber 7,776 mg/g, logrando una remoción de 90,3 % del hierro presente en la muestra.

**Palabras clave:** isoterma, drenaje ácido de mina (DAM), adsorción de Fe (III), organoarcilla, escorrentía

#### Abstract

The Acid Mine Drainage (DAM) of Yanamina - Apaycancha - Ricrán-Jauja, located at 3848.58 meters above sea level, has 215.88 mg/l of total iron which flows with runoff water, its mitigation requires knowledge of the mechanism of adsorption of Fe (III) on organoclay, chosen as an adsorbent for its capacity of ion exchange, surface extension, abundance in the area and its low cost. A Batch reactor was used to study the initial Fe (III) concentration and its relationship with contact time, to determine the isotherms and adsorption kinetics. Reaching 15.85 mg/g in the monolayer of the adsorption surface, with which a removal of 99.5 is achieved in 180 minutes, time that equilibrium is reached. The pseudo second-order kinetics obtained a high correlation and is the one that best represents the process, where Fe (III) is adsorbed by the active sites of the organoclay whose capacity reaches 7.776 mg/g, achieving a removal of 90.3 % of iron present in the sample.

**Keywords:** isotherm, acid mine drainage (AMD), Fe (III) adsorption, organoclay, runoff

## Introducción

Más del 50 % de las divisas del Perú provienen de la minería. Desde hace siglos la explotación minera continua ha generado residuos; al no existir normas que regulen el cierre de las minas y el manejo adecuado de esos residuos, aparecieron los pasivos ambientales mineros que se acumularon en extensas áreas, generando la contaminación de acuíferos y otros recursos naturales, poniendo en riesgo la salud de los seres vivos de su entorno. Un pasivo ambiental en el departamento de Junín se encuentra en la provincia de Jauja, corresponde a la mina abandonada “Yanamina”, ubicada en el anexo de Apaycancha - Ricrán - Jauja, a una altitud de 3848,58 msnm, con ubigeo: 442545,3 E, 8 719 394,8 N 18L.

En el año 2003, se reguló el cierre de esta mina siendo necesario realizar el tratamiento de los residuos y pasivos ambientales para controlar los impactos negativos en el ambiente y en los pobladores de la zona. La investigación se realiza con el propósito de mitigar los impactos ambientales negativos que generan los drenajes ácidos con alta concentración de hierro, cuyo efecto es el retardo del crecimiento o acumulación indeseable en los tejidos de las plantas y, en los humanos, puede generar acumulación de hierro en la médula ósea y otros órganos, así como causar una hemocromatosis.

Para mitigar la presencia de Fe(III), se estudia la velocidad de adsorción del adsorbato en el adsorbente hasta llegar al equilibrio. Para determinar el tiempo y comprender el mecanismo de adsorción, se emplea el modelo cinético de pseudo primer orden de Lagergren:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 * (q_e - q_t) \quad (1)$$

y el modelo cinético de Pseudo segundo orden de Ho y McKay:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 * (q_e - q_t)^2 \quad (2)$$

## Materiales y métodos

De entre los diversos materiales adsorbentes que existen en el mercado, como el carbón activado, las arcillas, las zeolitas, los óxidos metálicos y los biomateriales, se utilizó la organoarcilla como adsorbente para remover el hierro por su gran capacidad de intercambiar iones, ser física y químicamente estables, su extensa área superficial de adsorción, su bajo costo y su abundancia en esta región.

Los materiales de vidrio utilizados son propios del laboratorio, algunos de los equipos, como el espectrofotómetro VARIAN modelo 220FS, el espectrofotómetro de masa con plasma acoplado inductivamente

(ICP MS) se han solicitado a laboratorios, como SGS del Perú. Entre los reactivos se han considerado la bentonita caracterizada, el surfactante bromuro de hexadeciltrimetilamonio  $C_{19}H_{42}BrN$  y la solución estándar de  $Fe(NO_3)_3$  1000 mg/l de MERCK, a partir del cual se prepararon las soluciones diluidas para las corridas, las soluciones diluida de NaOH 5 M y 0,1 M, y solución diluida de  $HNO_3$  1:1 v/v.

## Elaboración de la organoarcilla

La elaboración de organoarcilla siguió la metodología de síntesis y caracterización de nanoarcillas con sales de amonio (Arriola & Rojas, 2017), trabajando a 80 °C y secado a 90 °C por 24 horas, pulverizándolo a malla N° 170 y guardándolo en un ambiente fresco y seco.

## Muestreo del DAM

El drenaje ácido de mina (DAM) se muestreó a la entrada de la mina abandonada “Yanamina” de acuerdo al protocolo del MEM: R.M. N° 154 – 2012 MEM y el protocolo de la ANA: R.J. N° 010 – 2016 – ANA.

## Condiciones para determinar el tipo de isoterma

Para determinar el tipo de isoterma, se trabajó a temperatura ambiente con 180 min de contacto, con agitación a 300 rpm y un pH de 4. Se mezclaron 10 g de organoarcilla y 40 ml de solución de Fe(III). La concentración para las 5 muestras se incrementó en 50 mg/l, desde 100 mg/l hasta 300 mg/l, después de la centrifugación, el contenido de Fe (III) en el líquido se determinó por Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP – MS).

## Experimento para determinar la cinética de adsorción

En la determinación de la cinética de adsorción del Fe(III) se trabajaron a las mismas condiciones que para la determinación del tipo de isoterma, variando los tiempos de contacto desde una hasta 5 horas, al final de los cuales se leyeron los resultados por el método de ICP – MS

## Diseño experimental para la adsorción del Fe(III)

Para las pruebas de adsorción se trabajó a un pH = 4 con 10 g de organoarcilla y un volumen de 40 ml de Fe(III) variando su concentración al igual que para la determinación de las isotermas; del mismo modo, variando el tiempo cada 60 min hasta 300 min, distribuidos en 25 matraces Erlenmeyer de 250 ml, a temperatura ambiente y agitadas a 300. Finalmente, para separar adsorbente del líquido se centrifugó a 5000 rpm por 30 minutos. En la Tabla 1, se muestran las condiciones de experimentación. Los análisis se hicieron con ICP – MS.

**Tabla 1**

Condiciones experimentales para la adsorción.

Constante	Condición experimental
Concentración inicial de Fe (III) (C <sub>0</sub> )	100, 150, 200, 250 y 300 mg/l
Volumen de solución acuosa de Fe(III) (V)	40 ml
Tiempo de contacto (t <sub>c</sub> )	60, 120, 180, 240 y 300 min
Masa de organoarcilla	10 g
Velocidad de agitación de las muestras	300 rpm
Tiempo de centrifugación	30 min
Velocidad de centrifugación	5000 rpm
Temperatura de adsorción	Temperatura ambiente

## Resultados

### Características del DAM

El caudal del DAM es de 0,9 l/s en tiempos de estiaje, con pH = 6,35 y 12,8 °C de temperatura.

En la caracterización química inicial del DAM, reportado por SGS del Perú SA, en la Tabla 2, se ha encontrado que la concentración de Fe (III) alcanza 215,88 mg/l, valores que sobrepasan los LMP con que deberían verse al ambiente; además, de altas concentraciones de otros metales.

**Tabla 2**

Características químicas del DAM de "Yanamina" Ricrán-Jauja-Junín.

Metales totales	Símbolo	Concentración (mg/l)
Aluminio	Al	3,216
Arsénico	As	0,995
Boro	B	1,163
Calcio	Ca	177,053
Cerio	Ce	0,153
Cobalto	Co	3,133
Cobre	Cu	31,226
Estroncio	Sr	0,128
<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	<b>215,886</b>
Lantano	La	0,041
Litio	Li	0,121
Magnesio	Mg	48,214
Manganeso	Mn	10,246
Niquel	Ni	0,941
Plomo	Pb	0,002
Potasio	K	11,900
Rubidio	Rb	0,084
Silicio	Si	6,870
Sodio	Na	57,651
Uranio	U	0,001
Zinc	Zn	0,646

La cantidad de metal que se adsorbe al adsorbente y la cantidad del metal que queda en el líquido, en el equilibrio a determinada temperatura, se relacionan con la forma de la isoterma.

Con los datos experimentales de la Tabla 3, se describen las isotermas de adsorción del Fe (III) aplicando la ecuación (1) que estima el rendimiento del sistema, en este caso, las isotermas de adsorción corresponden al modelo de Langmuir.

**Tabla 3**

Concentraciones para determinar las isotermas de adsorción.

Nº	C <sub>0</sub> Fe (III) (mg/l)	C <sub>e</sub> Fe (III) (mg/l)	% remoción	q <sub>e</sub> (mg/g)
1	100	0,505	99,5	3,980
2	150	0,743	99,5	5,970
3	200	1,609	99,2	7,936
4	250	2,598	98,9	9,896
5	300	3,989	98,6	11,840

### La ecuación para la Isoterma de Langmuir es:

$$q_e = \frac{q_{e, \max} k_L C_e}{1 + k_L C_e} \quad (2)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{e, \max}} + \frac{1}{q_{e, \max} k_L} \quad (3)$$

Donde:

$q_e$  : Fe (III) adsorbido por la organoarcilla en mg/g.

$q_{e, \max}$  : Capacidad de adsorción en mg/g de la monocapa.

$K_L$  : constante de equilibrio de Langmuir.

$C_e$  : concentración de la solución (mg/l) en el equilibrio.

Al aplicar la ecuación (3) a los datos de la Tabla 3, se obtienen los valores consignados en la Tabla 4.

**Tabla 4**

Concentraciones para construir la isoterma de Langmuir.

Nº	C <sub>0</sub> Fe (III) (mg/l)	C <sub>e</sub> Fe (III) (mg/l)	q <sub>e</sub> (mg/g)	C <sub>e</sub> / q <sub>e</sub>
1	100	0,505	3,980	0,127
2	150	0,743	5,970	0,124
3	200	1,609	7,936	0,203
4	250	2,598	9,896	0,263
5	300	3,989	11,840	0,337

La ecuación (3) permite linealizar los resultados y la isoterma de Langmuir expresado como una constante adimensional, conocida como constante de equilibrio de Langmuir, se representa por la ecuación (4).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (4)$$

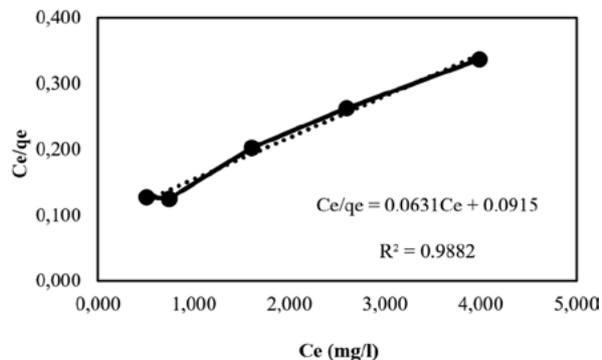
Con la aplicación de los datos a ambas ecuaciones, la ecuación (3) y la ecuación (4) se obtienen la ecuación linealizada y el valor del coeficiente de correlación, respectivamente:

$$\frac{C_0}{q_e} = 0,0631 C_e + 0,0915 \quad R^2 = 0,9882 \quad (5)$$

Y de acuerdo a los resultados encontramos que la constante de equilibrio de Langmuir, para el coeficiente de correlación que se encuentra entre los valores de  $0 < R_L < 1$ , indica que la adsorción del Fe(III) es favorable, como se observa en la Figura 1.

**Figura 1**

Isoterma de adsorción de Fe(III) con organoarcilla, según Langmuir.



Además, con esos resultados, se calcula  $q_{e,max} = 15,85$  mg/g, que es la capacidad de adsorción de la monocapa y  $K_L = 0,689$  que corresponde a la constante de equilibrio de Langmuir.

### Análisis de la Isoterma de Freundlich

Para la isoterma de Freundlich, se adecúan los datos, mostrados en la Tabla 4, aplicando la ecuación (5).

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Que se linealiza como:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (6)$$

Donde:

$K_f$  : Constante de Freundlich en mg/g

$\frac{1}{n}$  : Intensidad de adsorción

$C_e$  : Concentración de la solución en el equilibrio (mg/l)

$q_e$  : Fe(III) adsorbido por la organoarcilla (mg/g)

**Tabla 5**

Concentraciones para construir la isoterma de Freundlich.

Nº	$C_0$ Fe (III) (mg/l)	$C_e$ Fe (III) (mg/l)	$q_e$ (mg/l)	Log $C_e$	Log $q_e$
1	100	0,505	3,980	-0,297	0,600
2	150	0,743	5,970	-0,129	0,776
3	200	1,609	7,936	0,207	0,900
4	250	2,598	9,896	0,415	0,995
5	300	3,989	11,840	0,601	1,073

Con las cuales se obtienen la ecuación linealizada y el coeficiente de correlación:

$q_e = 6,1679 C_e^{0,4942}$   $R^2 = 0,967$  como se aprecia en la Figura 2.

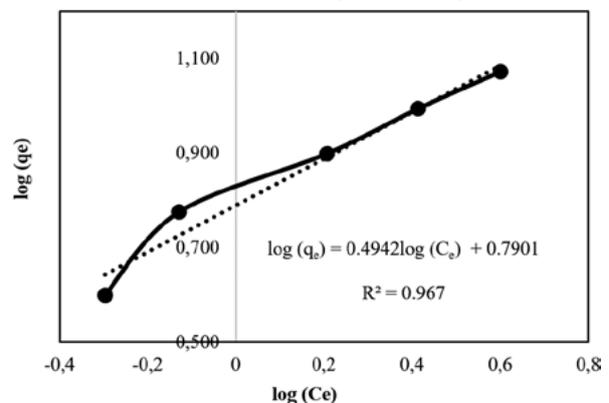
A partir de los valores de la Tabla 5, se calcula la constante de equilibrio de Freundlich:  $K_f = 6,1679$  mg/g y la intensidad de adsorción:

$$1/n = 0,2435 \text{ a partir de } n = 2,023.$$

Como  $1/n < 1$  la adsorción es favorable para el Fe(III).

**Figura 2**

Isoterma de adsorción de Fe(III) con organoarcilla según Freundlich.



### Cinética Química

Para determinar la Cinética Química de Pseudo primer orden del proceso,  $k_1$  se obtiene despejándola de la ecuación (1) linealizada:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - K_1 * t \quad (7)$$

Sabiendo que:

$q_t$  : Adsorción en un tiempo t (mg/g)

$q_e$  : Adsorción en el equilibrio (mg/g)

$K_1$  : Constante cinética de primer orden ( $\text{min}^{-1}$ )

En cuanto a la cinética química de pseudo segundo orden del proceso, la constante  $k_2$  se halla a partir de la ecuación (2) que linealizada sería:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{t}{q_e} \tag{8}$$

Donde:

$q_t$  : Adsorción en un tiempo  $t$  (mg/g)

$q_e$  : Adsorción en el equilibrio (mg/g)

$K_2$  : Constante de pseudo segundo orden (g/g.min)

También, la velocidad de adsorción inicial se calcula en mg/g.min, según la ecuación:

$$h = k_2 * q_e^2 \tag{9}$$

Los cálculos de la cinética de adsorción del Fe(III), se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6**

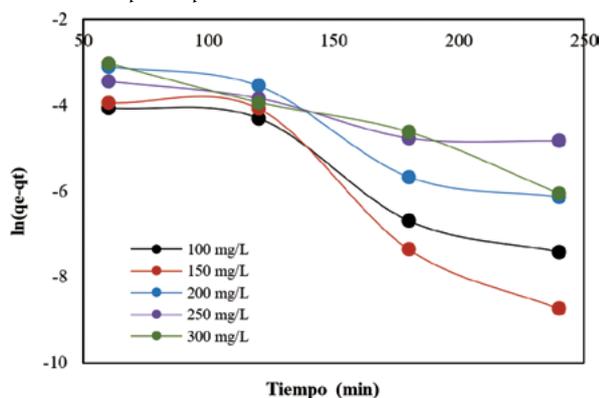
Adsorción de Fe (III) utilizando organoarcilla en la determinación de la cinética de pseudo primer orden y pseudo segundo orden.

Concentraciones	Pseudo - Primer orden			Pseudo - Segundo orden		
	$q_{e1}$ (mg/g)	$K_1$ (l/min)	$R^2$	$q_{e2}$ (mg/g)	$K_2$ (g/mg.min)	$R^2$
100	3,981	0,0476	0,908	3,987	0,597	1
150	5,971	0,0679	0,904	5,980	0,508	1
200	7,939	0,0431	0,919	7,960	0,251	1
250	9,905	0,0195	0,913	9,911	0,338	1
300	11,850	0,0373	0,976	11,862	0,262	1

El comportamiento de la adsorción, mostrado en la Figura 3, es según la concentración de Fe(III) al inicio del proceso, de acuerdo a los parámetros cinéticos de pseudo primer orden.

**Figura 3**

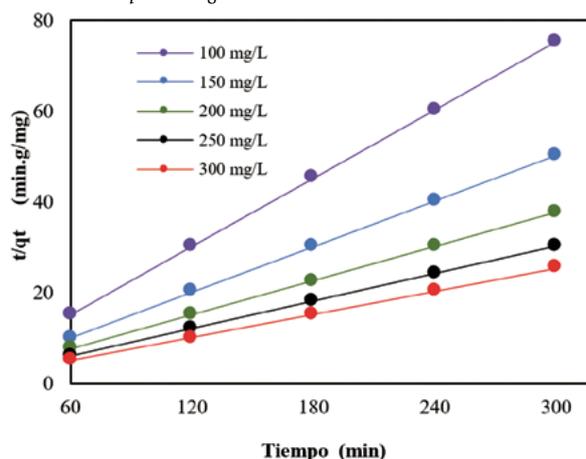
Adsorción de Fe (III) utilizando organoarcilla en la determinación de la cinética de pseudo primer orden.



El comportamiento de la adsorción, mostrado en la Figura 4, es según la concentración del Fe(III) al inicio del proceso, de acuerdo a los parámetros cinéticos de pseudo segundo orden.

**Figura 4**

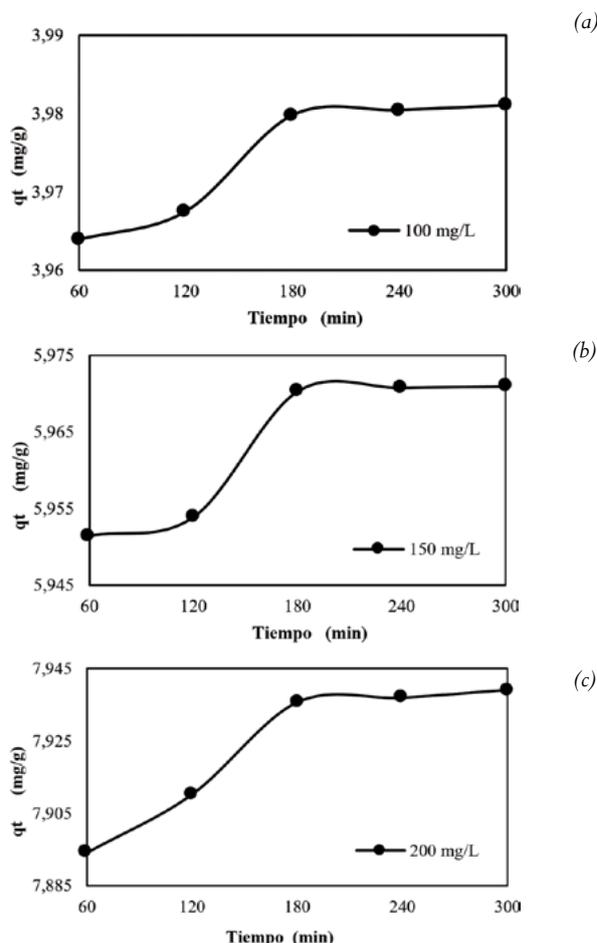
Adsorción de Fe (III) utilizando organoarcilla en la determinación de la cinética de pseudo segundo orden.

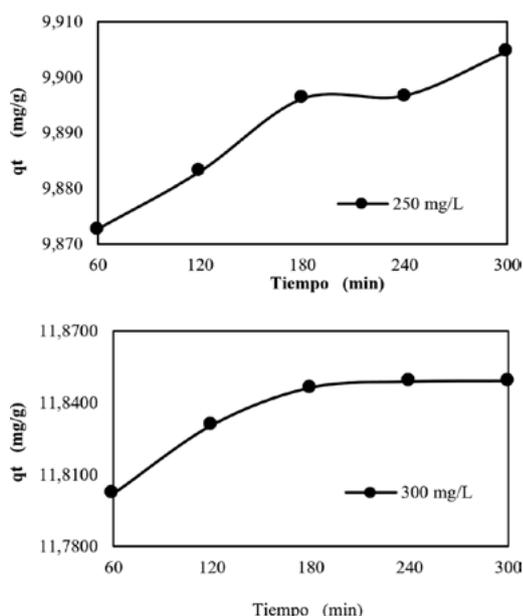


En la Figura 5 (a), (b), (c), (d) y (e), representa el comportamiento de la adsorción para cada una de las concentraciones y el modelo de pseudo segundo orden. Se aprecia que la velocidad de adsorción es rápida al inicio, disminuyendo hasta alcanzar el equilibrio alrededor de los 180 minutos.

**Figura 5**

Comparación de los datos experimentales con el modelo de pseudo segundo orden para las concentraciones de Fe(III) desde: (a) 100, (b) 150, (c) 200, (d) 250, (e) 300 en mg/l.





(d) diferencia sucede porque los puntos de actividad del adsorbente son ocupados por otros metales presentes en el DAM, además del hierro.

Tabla 7

Concentraciones de adsorción del DAM, antes y después del tratamiento.

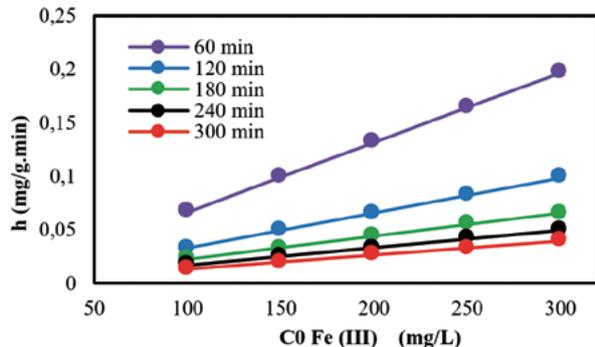
Total de metal pesado	C <sub>0</sub> (mg/l)	C <sub>e</sub> (mg/l)			Promedio de C <sub>e</sub> (mg/l)	q <sub>e</sub> (mg/g)	% Remoción
		I	II	III			
Arsénico	0,995	0,018	0,014	0,011	0,014	0,039	98,59
Cobalto	3,133	1,590	1,587	1,607	1,594	0,062	49,12
Cobre	31,226	4,329	4,274	4,305	4,303	1,077	86,22
Níquel	0,941	0,470	0,467	0,474	0,470	0,019	50,05
<b>Hierro</b>	<b>215,886</b>	<b>20,982</b>	<b>21,350</b>	<b>22,120</b>	<b>21,483</b>	<b>7,776</b>	<b>90,3</b>

(e)

En la Figura 6, se observa que la adsorción del Fe (III) es alta a menor tiempo de contacto, así como la proporcionalidad entre la velocidad de adsorción y la concentración.

Figura 6

Concentración inicial de Fe(III) y su relación con la velocidad de adsorción.



**Adsorción de Fe(III) del DAM de Yanamina con organoarcilla**

La prueba de adsorción con el DAM de Yanamina se realizó con las mismas condiciones usadas para determinar el tipo de isoterma, en este caso se emplearon 3 muestras, cuyos resultados se promediaron.

Al realizar el tratamiento del DAM, se encuentra que la concentración inicial del hierro total, el promedio de las tres pruebas y la concentración en el equilibrio han variado sustancialmente, al final de la adsorción con la organoarcilla, como se observa, la Tabla 7, donde, también, se muestra la adsorción de arsénico (As), cobalto (Co) y níquel (Ni), con más del 50 % removido.

En solución acuosa, la adsorción de Fe (III) llegó a 15,85 mg/g removiéndose el 99,5 % y la remoción de Fe(III) del DAM alcanzó una remoción de 7,776 mg/g alcanzando porcentaje de 90,3 %. Esta

**Discusión**

La presencia de hierro en el DAM es alta, llega a 215,88 mg/l y no cumple con los LMP de 2 mg/l y 1,6 mg/l como promedio anual y siendo necesario su remoción, se elige la organoarcilla como adsorbente por su alta capacidad de intercambio iónico.

Al encontrar y comparar las isotermas de adsorción, el modelo de Langmuir representa mejor los resultados con un coeficiente de correlación R<sup>2</sup>=0,9882, ligeramente superior al de Freundlich R<sup>2</sup>=0,967 y; como la adsorción es favorable en ambos casos, significa que la superficie de adsorción es heterogénea y; además, la adsorción incrementa su capacidad al crearse nuevos puntos de adsorción.

Al comparar los modelos cinéticos, en el modelo de pseudo segundo orden la velocidad de adsorción inicialmente es rápida, disminuyendo gradualmente hasta alcanzar el equilibrio alrededor de los 180 minutos, esto significa que, cuando el tiempo de contacto es menor la rapidez de adsorción es alta, lo que indica que la proporcionalidad entre la velocidad de adsorción y la concentración inicial es directa.

La cinética de pseudo segundo orden indica que, se puede remover el Fe(III) y otros metales como el As, Co, Ni, etc., con la organoarcilla, debido a su gran capacidad de intercambiar iones, su estabilidad física y química, su gran área superficial; además, de su bajo costo y abundancia.

**Conclusiones**

- Al observar que el drenaje ácido de mina - DAM, de la mina abandonada “Yanamina” de Ricrán-Jauja, alcanza una concentración de hierro de 215,886 mg/l, el cual supera largamente los límites máximos permisibles - LMP para la descarga de efluentes líquidos de acti-

vidades minero metalúrgicos, se propone la adsorción del Fe (III) con organoarcilla para minimizar efectos indeseables.

- La particularidad de la organoarcilla de contar con una superficie monomolecular y heterogénea, según las isothermas de Langmuir y Freundlich que alcanzan un coeficiente de correlación  $R^2=0,9882$  y  $R^2=0,967$ , respectivamente y, que esta última corresponde a una cinética de pseudo segundo orden, los que facilita la creación de nuevos puntos de adsorción y le dan mayor efectividad al tratamiento, ya que cada ión de Fe (III) es adsorbido por dos sitios activos de la arcilla en los primeros 180 minutos, donde alcanza el equilibrio.
- La capacidad de adsorción de la arcilla es alta, logra adsorber 7,776 miligramos de Fe (III) por cada gramo de organoarcilla, alcanzando una remoción del 90,3 % del Fe (III) contenido en la muestra. Tomando en consideración que la arcilla, después del proceso de remoción, puede ser empleada para la elaboración de ladrillos estructurales en construcción.

## Referencias bibliográficas

- Adame Romero, A. (2010). *Contaminación ambiental y calentamiento global* (Primera ed.). México: Trillas S.A.
- Adame Romero, A. & Salín Pascual, D. A. (1997). *Contaminación ambiental* (Tercera ed.). México, Mexico: Trillas S.A.
- Aduviré, O. (2006). *Drenaje ácido de mina generación y tratamiento*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Arriola Marquez, M. C. & Rojas Pomalima, P. L. (2017). *Síntesis y caracterización de organoarcillas a partir de montmorillonita utilizando sales de amonio*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Berglund, S. & Cvetkovic, V. (1996). *Contaminant displacement in aquifers: Coupled effects of flow heterogeneity and nonlinear sorption*. Water Resources Research.
- Bhattacharyya, K. & Sen Gupta, S. (5 de September de 2006). *Adsorption of Fe(III) from water by natural and acid activated clays: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions*. Springer Science, 185-204. Recuperado el Abril de 2018
- Esteban Bocado, P. & Ferreira Rocha, S. (2006). *Precipitación de hierro (III) utilizando óxido de magnesio en lecho fluidizado*. Revista de Metalurgia, 270-278.
- Ferguson, K. & Erickson, P. (1987). *An Overview of methods to predict acid mine drainage*. Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium in Campbell River, 41-43.
- Hernández Hernández, L. (2012). *Evaluación del riesgo para la salud en una población de la zona rural de Bogotá D.C. por la presencia de metales en aguas de consumo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Ho, Y. & McKay, G. (1999). *Pseudo-second order model for sorption processes*. Process Biochemistry. Elsevier, 451-465.
- Juárez, M.; Cerdán, M. & Sánchez Sánchez, A. (2015). *Hierro en el sistema suelo - Planta*. España: Universidad de Alicante.
- Langmuir, I. (1916). *The adsorption of gases on plane surface of glass*. J Am Chem, 1361-1403.
- Lenntech, B. (2018). *Water treatment solutions*. (C. ©. 1998-2018, Ed.) Recuperado el 05 de Setiembre de 2018, de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm>
- López Olivares, J. R. (2017). *Hierro: Beneficios y riesgos*. Boletín Médico en Línea, 15. Recuperado el 12 de Setiembre de 2018, de [www.lopezolivares.com](http://www.lopezolivares.com)
- Martín Martínez, J. M. (1990). *Adsorción física de gases y vapores por carbones*. Alicante, España: Espagrafic.
- Maya Pabon, R. E. (2015). *Fundamentos de la Investigación I*.
- McCabe, W. L.; Smith, J. C. & Harriott, P. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (Cuarta ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
- MINAM. (21 de Agosto de 2010). *Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividad minera-metalúrgicas*. D.S. N° 010-2010. El Peruano.
- Naseem, Rauf. & Tahir, S. S. (2000). *Thermodynamics of Fe(II) and Mn(II) adsorption onto bentonite from aqueous solutions*. J. Chem. Thermodynamics, 32, 651-658.
- Nebel, B. J. & Wright, R. T. (1999). *Ciencias ambientales ecología y desarrollo sostenible* (Sexta ed.). México: Pearson.
- Obianuju Orakwue, E.; sokbunyarat, V.; Rene, E.; Lens, P. & Annachhatre, A. (21 de September de 2015). *Adsorption of iron(II) from acid mine drainage contaminated groundwater using coal fly ash, coal bottom ash, and bentonite clay*. Springer, 74.
- Ocola Salazar, J. J. (2005). *Protección del agua - Vigilancia y control de vertimientos* - PAVER. Lima, Peru: s.n.

- Perugachi, B. R.; Paredes, V. C. & Cornejo, M. M. (Octubre de 2006). *Las organoarcillas y sus potenciales aplicaciones en el Ecuador*. Revista Tecnológica ESPO, 19(1), 121-124.
- Picasso, G. & Sun Kou, M. D. (Marzo de 2008). *Aplicaciones tecnológicas de las arcillas modificadas*. Revista de la Sociedad Química del Perú, 74(1), 1-10.
- Pinzón Bedoya, M. L. & Vera Villamizar, L. E. (30 de Marzo de 2009). *Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cr(III) usando cáscara de naranja*. 76(160), 95-106. Recuperado el 23 de Abril de 2018, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/13588/14379>
- Poppe, L. J.; Paskevich, V. F.; Hathway, J. C. & Blakwood, D. S. (20 de mayo de 2015). *A laboratory manual for X-Ray powder diffraction*. U. S. Geological Survey, 59. Recuperado el 11 de noviembre de 2017
- Roque Villanueva, W. F.; Pacheco Tanaka, M. E. & Pimentel Frisancho, J. P. (Julio de 2010). *Cinética de la bioadsorción de iones de cadmio (II) y plomo (II) de soluciones acuosas por biomasa residual de café (Coffea Arabica L.)*. Revista de la Sociedad Química del Perú, 76(3), 279-292.
- Sans Fonfría, R. & De Pablo Ribas, J. (1989). *Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos*. Barcelona, España: Marcombo S.A.
- Supplements, O. (2014). *Datos sobre el hierro*. National Institutes of Health, 1-3.
- Suprakas Sinha, R. & Masami, O. (2003). *Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing*. Elsevier, 1539-1641.
- Tejada Sánchez, K. F. (2014). *Optimización del proceso de adsorción de hierro total con quitina nativa de eme-rita análoga "muy muy", mediante análisis factorial*. Arequipa: Universidad Católica de Santa María. Recuperado el 12 de Septiembre de 2018, de <https://core.ac.uk/download/pdf/54221014.pdf>
- Timofeev, K.; Maltsev, G. & Sviridov, A. (2016). *Sorption kinetics of indium, iron and zinc ions on modified montmorillonite*. Springer, 1-7.
- Treybal, R. E. (1981). *Operaciones de transferencia de masa* (Segunda ed.). (R. A. Garcia, Trad.) México, México: McGraw-Hill.
- U'nlu, N. & Ersoz, M. (2006). *Adsorption characteristics of heavy metal ions onto a low cost biopolymeric sorbent from aqueous solutions*. J. Hazard. Mater, 136.
- Gómez Miguel, V. D. & Sotés, V. (2014). *El manganeso y la viticultura: una revisión*. Madrid, España: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Vázquez Gonzáles, O. (1994). *Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales*. En Universidad Autónoma de Nuevo Leon. Monterrey.
- Zhansheng, W.; Chun, L.; Xifang, S.; Xiaolin, X.; Bin, D.; Jine, L. & Hongsheng, Z. (Abril de 2006). *Characterization, Acid Activation and Bleaching Performance of Bentonite from Xinjiang*. Elsevier, 253-258.