

Estado: El preprint no ha sido enviado para publicación

Remoción de arsénico en agua con zeolitas naturales con cloruro férrico

George Christian Reyes-Javier, Raby Franklin Chaupis-Cadillo , Sebastian Iglesias-Osores, Carmen Barreto-Pio

DOI: 10.1590/SciELOPreprints.1168

Este preprint fue presentado bajo las siguientes condiciones:

- Los autores declaran que son conscientes de que son los únicos responsables del contenido del preprint y que el depósito en SciELO Preprints no significa ningún compromiso por parte de SciELO, excepto su preservación y difusión.
- Los autores declaran que la investigación que dio origen al manuscrito siguió buenas prácticas éticas y que las aprobaciones necesarias de los comités de ética de investigación se describen en el manuscrito, cuando corresponda.
- Los autores declaran que se obtuvieron los términos necesarios del consentimiento libre e informado de los participantes o pacientes en la investigación y se describen en el manuscrito, cuando corresponde.
- Los autores declaran que la preparación del manuscrito siguió las normas éticas de comunicación científica.
- Los autores declaran que el manuscrito no fue depositado y/o previamente puesto a disposición en otro servidor de preprints.
- El autor que presenta declara que todos los autores responsables de la preparación del manuscrito están de acuerdo con este depósito.
- Los autores declaran que en el caso de que este manuscrito haya sido enviado previamente a una revista y esté siendo evaluado, han recibido el consentimiento de la revista para realizar el depósito en el servidor de SciELO Preprints.
- Los autores declaran que si el manuscrito se publicará en el servidor SciELO Preprints, estará disponible bajo licencia [Creative Commons CC-BY](#).
- El manuscrito depositado está en formato PDF.
- El autor que hace el envío declara que las contribuciones de todos los autores están incluidas en el manuscrito.
- Si el manuscrito está siendo revisado y publicado por una revista, los autores declaran que han recibido autorización de la revista para hacer este depósito.

Enviado en (AAAA-MM-DD): 2020-08-30

Postado en (AAAA-MM-DD): 2020-09-23

Remoción de arsénico en agua con zeolitas naturales con cloruro férrico

Removal of arsenic in water with natural zeolites with ferric chloride

Reyes-Javier George Christian, creyesj25@gmail.com, Universidad Nacional del Callao, Av. Juan Pablo II 306, Bellavista, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3279-0265>

Chaupis-Cadillo Raby Franklin, franklin.unac2015@gmail.com, Universidad Nacional del Callao, Av. Juan Pablo II 306, Bellavista, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0722-2469>

Iglesias-Osores Sebastian, Biólogo, sebasiglo@gmail.com, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Calle Juan XXIII 391, Lambayeque, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4984-4656>

Barreto-Pio Carmen, barpcarmen@yahoo.es, Universidad Nacional del Callao, Av. Juan Pablo II 306, Bellavista, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5510-6978>

Autor corresponsal: Sebastian Iglesias-Osores, email: sebasiglo@gmail.com, siglesias@unprg.edu.pe

Contribuciones de los autores: GR, RC fueron responsables de la concepción del estudio. GR y RC recolectaron los datos. GR, RC y CB contribuyó al análisis de los datos. SI escribió el borrador inicial con todos los autores proporcionando comentarios críticos y ediciones para revisiones posteriores. Todos los autores aprobaron el borrador final del manuscrito. Todos los autores son responsables de todos los aspectos del trabajo para garantizar que las preguntas relacionadas con la precisión o integridad de cualquier parte del trabajo se investiguen y resuelvan adecuadamente.

Conflicto de intereses: se declara no tener ningún conflicto de intereses.

Fuentes de financiamiento: Autofinanciado.

RESUMEN

Se propone un tratamiento de zeolita natural activada con cloruro férrico por considerarse un adsorbente eficiente para remoción de metales en agua superficiales que abastecen a la población de San Mateo de Huanchor, utilizando zeolitas naturales del anexo de Yura Viejo perteneciente al departamento de Arequipa. Los resultados del diseño experimental muestran una eficiencia superior a 90 %. Para la determinación de la capacidad de adsorción se realizaron pruebas con diferentes factores como el tamaño de partícula (Malla # 20 y # 40), tiempo de contacto (5, 15, 30, 180, 360 y 480 min), masa del adsorbente (2, 5 y 10 g) y concentración de la solución contaminada (0,1, 1, 5, 10, 50 y 100 mg/L). El resultado de la capacidad de adsorción obtenida en las pruebas en lotes, fue de 1.668 mg de Arsénico por gramo de Zeolita.

Palabras clave: adsorción, arsénico, zeolita natural, cloruro férrico.

ABSTRACT

A treatment of natural zeolite activated with ferric chloride is proposed as it is considered an efficient adsorbent for the removal of metals in surface water that supplies the population of San Mateo de Huanchor, using natural zeolites from the Yura Viejo annex belonging to the department of Arequipa. The results of the experimental design show an efficiency greater than 90%. To determine the adsorption capacity, tests were carried out with different factors such as particle size (Mesh # 20 and # 40), contact time (5, 15, 30, 180, 360 and 480 min), adsorbent mass (2, 5 and 10 g) and concentration of the contaminated solution (0.1, 1, 5, 10, 50 and 100 mg / L). The result of the adsorption capacity obtained in the batch tests was 1,668 mg of Arsenic per gram of Zeolite.

Key words: adsorption, arsenic, natural zeolite, ferric chloride.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la minería es una de las principales actividades económicas del Perú, la explotación minera trae como consecuencia pasivos como los son los contaminantes (Muradian, Martínez-Alier y Correa, 2003). Estos contaminantes son nocivos para el medio, contaminan los ríos y su tratamiento genera un costo adicional en la minería (Gu, 2018). El arsénico está presente de forma natural en la corteza terrestre como numerosos minerales, pero es a partir de los procesos industriales como la minería que se contaminan las aguas superficiales con metales pesados (Wu *et al.*, 2019). La exposición ambiental al arsénico es un problema de salud pública debido a que afecta a un gran número de poblaciones en el mundo y por tratarse de un agente carcinogénico para humanos (Bui *et al.*, 2016; Fang *et al.*, 2018). Igualmente, alarmantes son las concentraciones de arsénico que se encuentran en la sección del río Rímac que fluye a través de Lima (Chávez, 2009). Un caso muy representativo de esta problemática es el que pasa el distrito de San Mateo de Huanchur (Ramos *et al.*, 2006). San Mateo de Huanchur es un distrito que se encuentra aproximadamente a 92 km de la ciudad de Lima, a una altitud de 3 290 m.s.n.m., donde la minería es una actividad productiva importante y los desechos mineros son depositados como canchas de relave principalmente en las comunidades de Mayoc y Tamboraque.

De acuerdo al Inventario de Pasivos Ambientales Mineros, en el distrito de San Mateo se han identificado 21 pasivos ambientales todos ellos catalogados en condición de inactivos excepto uno catalogado en condición de abandonado; definiéndose como inactivos todos aquellos pasivos que se encontraban localizados dentro de una concesión vigente a la fecha de entrada en vigencia la Ley N° 28271 (Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera) que estaban sin operar dos años o más y como pasivos abandonados todos aquellos que se encontraban localizados fuera de una concesión vigente a la fecha de entrada en vigencia de la mencionada ley como es el caso del pasivo C.M. San Mateo.

El uso de material zeolítico sintetizado a partir de cenizas volantes de carbón para la inmovilización de contaminantes en suelos contaminados se investigó suelos contaminados (Querol *et al.*, 2006). La zeolita natural se puede modificar mediante un tratamiento simple o combinado de calentamiento y modificación química utilizando ácidos, bases y sales inorgánicas (Dignos *et al.*, 2019). El material zeolítico disminuye considerablemente la lixiviación de Cd, Co, Cu, Ni y Zn (Querol *et al.*, 2006). La utilización de zeolita natural como material absorbente y de intercambio iónico de bajo costo en el control de la contaminación y la recuperación de metales (Kesraoui-Ouki, Cheeseman y Perry, 1994).

El objetivo del presente estudio es desarrollar una metodología para modificar una zeolita natural con cloruro ferrico y determinar la capacidad para disminuir la concentración de arsénico en agua para consumo humano.

MÉTODOS

Tipo de investigación

De acuerdo al propósito de la investigación analítico - correlacional. El diseño de la investigación es de carácter experimental que constó de una pre prueba y post prueba, que permite administrar simultáneamente la pre prueba, realizar un tratamiento a un grupo y a otro grupo no, finalmente se administra la post prueba.

Ubicación del distrito de San Mateo de Huanchor

Está ubicado en la provincia de Huarochirí perteneciente al departamento de Lima y a una altitud promedio de 3 500 msnm. Hidrográficamente está localizado en la cuenca alta del río Rímac, teniendo como afluentes principales al río Blanco y la quebrada Párac ubicados en la margen izquierda del río Rímac.

Muestra

Para el diseño de la investigación se consideró el muestreo de las aguas superficiales de San Mateo de Huanchor, Lima, Perú y el muestreo de las zeolitas naturales ubicado en el distrito de Yura, Arequipa, Perú. Se realizó estudios de Fluorescencia de Rayos X al mineral muestreado con la finalidad de determinar la composición química elemental del mineral.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

El recojo de las muestras se realizó en la superficie descubierta del cuerpo mineral donde según el uso de suelo característico (Suelo extractivo) se consideró una profundidad de 10 cm.

Análisis preliminar de adsorción de arsénico usando zeolitas naturales

Para determinar la capacidad de adsorción de arsénico usando zeolitas naturales, se pesaron 10 g de zeolitas, tamizadas en malla # 20 previamente molidas y seleccionadas. Se preparó agua contaminada sintéticamente con arsénico a 10 mg/L, utilizando arseniato de sodio heptahidratado ($Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$) al 98 % de pureza. Se realizó el ensayo de las dos muestras en una prueba de jarras manteniéndose constante la agitación (180 RPM), tiempo de contacto (360 min), masa de zeolita (10 g), tamaño de partícula de zeolita (Malla #20), concentración inicial de arsénico (10 mg/L), temperatura y pH inicial. Las muestras se filtraron conservándose con Ácido Nítrico a 0.1 N y se refrigeraron.

Activación de zeolitas naturales con Cloruro Férrico

Las Zeolitas Naturales fueron activadas con una solución de 500 ml de Cloruro Férrico ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) al 10 %. Se pesaron 50 g de zeolitas naturales tamizadas con malla # 20

y se remojaron por un tiempo de 24 horas con la solución de cloruro férrico preparada, posteriormente fueron llevadas a la estufa y secadas a 120 °C por 1 hora.

Análisis preliminar de adsorción de arsénico usando zeolitas naturales activadas.

Se pesó 10 g de masa para cada muestra a, b y c, como se detalla a continuación:

Muestra a: Se pesaron 10 g de zeolitas activadas. Muestra b: Se pesaron 10 g de zeolitas activadas, se lavaron las zeolitas con agua desionizada hasta el pH 3,42 y se secaron a 120 °C por 10 minutos. Muestra c: Se pesaron 10 g de zeolitas activadas, se lavaron hasta el pH 6.40 y se secaron a 120 °C por 10 minutos. Las muestras a, b y c, se introdujeron a 3 vasos precipitados conteniendo 250 ml de agua contaminada sintéticamente con arsénico a 10 mg/L. Se realizó el ensayo de las tres muestras en un test de jarras manteniéndose constante la agitación (180 RPM), tiempo de contacto (360 min), masa de zeolita (10 g), tamaño de partícula de zeolita (Malla #20), concentración inicial de arsénico (10 mg/L) temperatura y pH inicial. Las muestras se filtraron conservándose con Ácido Nítrico a 0,1 N y se refrigeraron.

Efecto de la masa de zeolita natural activada en función del tiempo de contacto

Se preparó 3 grupos de 6 vasos cada uno, los cuales contienen una masa de 2, 5 y 10 gramos de zeolitas naturales activadas de tamaño malla # 20, en cada vaso por grupo respectivamente.

Se preparó agua contaminada sintéticamente con arsénico a 10 mg/L, utilizando arseniato de sodio heptahidratado ($Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$) al 98 % de pureza, se distribuyeron 250 ml de la solución para cada vaso, teniendo un total de 18 vasos (18 muestras).

Se realizó el ensayo de las dieciocho muestras en un test de jarras a tiempos diferentes de 5 min, 15 min, 30 min, 180 min, 360 min y 480 min para cada grupo, manteniéndose constante la agitación (180 RPM), tamaño de partícula de zeolita (Malla #20), concentración inicial de arsénico (10 mg/L), temperatura y pH inicial. Las muestras se filtraron conservándose con Ácido Nítrico a una concentración de 0,1 N y se refrigeraron.

Efecto del tamaño de la partícula de la zeolita natural activada

Se pesaron 20 g de zeolitas naturales activadas de tamaño malla # 20, posteriormente se distribuyeron en masas de 10 g en 2 vasos beaker, lo mismo se realizó para las zeolitas naturales activadas de tamaño de malla # 40.

Se preparó agua contaminada sintéticamente con arsénico a 10 mg/L, utilizando arseniato de sodio heptahidratado ($Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$) al 98 % de pureza, se distribuyeron 250 ml de la solución para cada vaso, teniendo un total de 4 vasos (4 muestras).

Se realizó el ensayo de las cuatro muestras en un test de jarras manteniéndose constante la agitación (180 RPM), tiempo de contacto (360 min), masa de zeolita (10 g), concentración inicial de arsénico (10 mg/L), temperatura y pH inicial. Las muestras se filtraron conservándose con Ácido Nítrico a una concentración de 0,1 N y se refrigeraron.

Adsorción de arsénico en aguas contaminadas sintéticamente

Teniendo en cuenta los parámetros óptimos de masa y tamaño de partícula de la zeolita natural activada y tiempo de contacto, se pesó 60 g de zeolita natural activada de tamaño malla # 40, posteriormente se distribuyeron en 6 vasos beaker con 10 g cada una.

Se preparó agua contaminada sintéticamente con arsénico a 10 mg/L, utilizando arseniato de sodio heptahidratado ($Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$) al 98 % de pureza, se distribuyeron 250 ml de la solución para cada vaso, teniendo un total de 6 vasos (6 muestras).

Se realizó el ensayo de las seis muestras en un test de jarras manteniéndose constante la agitación (180 RPM), tiempo de contacto (360 min), masa de zeolita (10 g), tamaño de partícula de zeolita (Malla #40), concentración inicial de arsénico (10 mg/L), temperatura y pH inicial.

Las muestras se filtraron conservándose con Ácido Nítrico a una concentración de 0,1 N y se refrigeraron.

Adsorción de arsénico en aguas superficiales de San Mateo de Huanchor

Teniendo en cuenta los parámetros óptimos de masa y tamaño de partícula de la zeolita natural activada y tiempo de contacto, se pesó 60 g de zeolita natural activada de tamaño malla # 40, posteriormente se distribuyeron en 6 vasos beaker con 10 g cada una.

Se empleó las aguas de San Mateo de Huanchor con una concentración de arsénico previamente analizada de 0,015 mg/L, se distribuyeron 250 ml de la solución para cada vaso, teniendo un total de 6 vasos (6 muestras).

Se realizó el ensayo de las seis muestras en un prueba de jarras manteniéndose constante la agitación (180 RPM), tiempo de contacto (360 min), masa de zeolita (10 g), tamaño de partícula de zeolita (Malla #40), concentración inicial de arsénico (10 mg/L), temperatura y pH inicial. Las muestras se filtraron conservándose con Ácido Nítrico a una concentración de 0,1 N y se refrigeraron.



Zeolitas naturales sin activación	Zeolitas naturales con activación con Cloruro Férrico
	
<p>Se realizó la selección de impurezas y molido de las zeolitas naturales hasta el tamaño requerido.</p>	<p>Las zeolitas naturales se remojaron con Cloruro Férrico por 24 horas, secadas a 120^o C por 1 hora, lavado hasta un pH=6.40 y secado a 120^o C por 10 min.</p>

Gráfico 1. Activación de las zeolitas naturales con cloruro férrico

Procesamiento estadístico y análisis de datos

Se determinó las medidas de tendencia central y medida de dispersión. La primera consiste en ubicar el centro de los datos y estos no son suficientes para describir un conjunto de valores de alguna variable. Los promedios indican en centro, pero nada indican acerca de cómo están situados los datos respecto al centro para ello se empleará las medidas de dispersión. Se consideraron los siguientes análisis. Relación entre la media de las variables, Determinación de la varianza. Se uso el software estadístico Stata 14 y la hoja de procesamiento de datos Microsoft Excel 2016.

RESULTADOS

Las pruebas experimentales se realizaron desde el 26 de setiembre del 2017 al 14 de mayo 2018. Los resultados muestran una concentración de arsénico de 0,010 mg/L, así como las concentraciones de los distintos metales existentes en las aguas superficiales de San Mateo de Huanchor, tal como se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Niveles de la concentración de metales en las aguas superficiales de San Mateo de Huanchor.

Ensayo	Límite de Detección	Resultado (mg/L)	Ensayo	Límite de Detección	Resultado (mg/L)
Aluminio	0,0077	< 0,0077	Magnesio	0,0107	7,660
Antimonio	0,0015	< 0,0015	Manganeso	0,0004	0,3476
Arsénico	0,001	0,010	Molibdeno	0,0018	< 0,0018

Bario	0,0004	0,0495	Níquel	0,0015	< 0,0015
Berilio	0,0002	< 0,0002	Plata	0,0014	< 0,0014
Boro	0,0012	< 0,0012	Plomo	0,0004	0,010
Cadmio	0,00005	0,0005	Potasio	0,0463	2,520
Calcio	0,0035	88,16	Selenio	0,001	< 0,001
Cerio	0,0096	< 0,0096	Silicio	0,0051	5,211
Cobalto	0,0007	< 0,0007	Sodio	0,0074	11,40
Cobre	0,0005	0,1916	Talio	0,0002	< 0,0002
Cromo	0,0023	< 0,0023	Titanio	0,0021	< 0,0021
Estaño	0,0026	< 0,0026	Uranio	0,0070	< 0,007
Estroncio	0,0002	0,9140	Vanadio	0,0005	< 0,0005
Fósforo	0,0237	< 0,0237	Mercurio	0,0001	< 0,0001
Hierro	0,0052	1,147	Zinc	0,0009	1,948
Litio	0,0006	< 0,0006	-	-	-

Los resultados del análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX), muestran los porcentajes en peso de los elementos encontrados en la muestra de Zeolita natural, expresados en forma de óxidos, tal como se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis de Fluorescencia de Rayos X en la muestra de Zeolita natural

Compuesto Químico	Formula Química	(%) en peso
Óxido de silicio	SiO ₂	73.30
Óxido de Aluminio	Al ₂ O ₃	13.70
Óxido de Sodio	Na ₂ O	4.45
Óxido de Potasio	K ₂ O	3.57
Óxido de Calcio	CaO	1.83
Óxido de Hierro	Fe ₂ O ₃	1.67
Óxido de Magnesio	MgO	0.62
Óxido de Azufre	SO ₃	0.40
Cloro	Cl	0.25
Óxido de Manganeso	MnO	0.10
Óxido de Estroncio	SrO	0.05
Óxido de Cobre	CuO	0.04
Óxido de Zinc	ZnO	0.02
Total		100.0

El análisis preliminar de adsorción de arsénico usando zeolitas naturales, muestran las concentraciones de arsénico del análisis preliminar de adsorción de arsénico con zeolitas naturales en aguas contaminadas sintéticamente con arsénico fueron de 6,54 mg/L y 6,91 mg/L. Los resultados muestran las concentraciones de arsénico del análisis preliminar de adsorción de arsénico con zeolitas naturales activadas con cloruro férrico a diferentes condiciones, cuyas concentraciones presentan 0,006 hasta 5,322 mg/L (ver tabla 3).

Tabla 3. Concentraciones de arsénico del análisis preliminar de adsorción de arsénico con zeolitas naturales

Zeolitas naturales sin activar		
Muestra	Descripción	Tiempo (min.)
As 00	*ZN + Sol.	360
As 01	*ZN + Sol.	360
As 02	Patrón	360
Zeolitas naturales activadas		
Muestra	Descripción	Tiempo (min)
M-As-01	Patrón	0
M-As-02	*ZNA (Muestra a) + Sol	360
M-As-03	**ZNA (Muestra b) + Sol	360
	***ZNA	
M-As-04	(Muestra c) + Sol	360

**ZN+Sol: Zeolita natural + Aguas contaminadas sintéticamente con arsénico.*

** ZNA (Muestra a) + Sol: Zeolita natural según las consideraciones de la muestra a + Aguas contaminadas sintéticamente con arsénico.*

*** ZNA(Muestra b) + Sol: Zeolita natural según las consideraciones de la muestra b + Aguas contaminadas sintéticamente con arsénico.*

El efecto de la masa de zeolita natural activada en función del tiempo de contacto muestran las concentraciones de arsénico para los tratamientos con masas de 2, 5 y 10 gramos de Zeolita Natural activada en función del tiempo de contacto en la tabla 4.

Tabla 4. Efecto de la masa de zeolita natural activada en función del tiempo de contacto

Tiempo (min)	Masa 5 gramos		Masa 2 gramos		Masa 10 gramos	
	Análisis de arsénico (mg/L)	Remoción (%)	Análisis de arsénico (mg/L)	Remoción (%)	Análisis de arsénico (mg/L)	Remoción (%)
0	9,80	-	10	-	10,07	-
5	3,88	60,4	8,31	16,9	3,83	62
15	2,55	74	8,14	18,6	2,12	79
30	1,37	86	7,84	21,6	0,90	91,10
180	0,34	96,5	6,91	30,9	0,10	99
360	0,15	98,4	6,19	38,1	0,06	99,40
480	0,18	98,2	6,20	38	0,04	99,60

El efecto del tamaño de la partícula de la zeolita natural activada muestran los resultados de las concentraciones de arsénico a diferentes tamaños de partícula de zeolita natural activada, se detallan en la tabla 5:

Tabla 5. Efecto del tamaño de la partícula de la zeolita natural activada

Muestra	Tiempo (min)	Análisis de arsénico (mg/L)	Remoción (%)
M4-As-00	0	9,902	-
Malla # 20			
M4-As-01	360	0,035	99,6
M4-As-02	360	0,027	99,7
Malla # 40			
M4-As-03	360	0,017	99,8
M4-As-04	360	0,017	99,8

La adsorción de arsénico en aguas contaminadas sintéticamente muestran concentraciones de arsénico desde 0,034 hasta 0,060 mg/L para el tratamiento de aguas contaminadas sintéticamente con arsénico, tal como se detallan en la tabla 6.

Tabla 6. Adsorción de arsénico en aguas sintéticas.

Nº	Tiempo (min)	Análisis de arsénico (mg/L)	de Remoción (%)
PL-AS-00	0	9,855	-
PL-AS-01	360	0,034	99,65
PL-AS-02	360	0,045	99,54
PL-AS-03	360	0,044	99,55
PL-AS-04	360	0,057	99,42
PL-AS-05	360	0,039	99,60
PL-AS-06	360	0,040	99,59
PL-AS-07	360	0,056	99,43
PL-AS-08	360	0,060	99,39
PL-AS-09	360	0,050	99,49
PL-AS-10	360	0,057	99,42

La adsorción de arsénico en aguas superficiales de San Mateo de Huanchor muestran en todas las pruebas, concentraciones de arsénico de <0,001 mg/L para el tratamiento de aguas superficiales de San Mateo de Huanchor, tal como se detallan en la tabla 7.

Tabla 7. Adsorción de arsénico en aguas superficiales de San Mateo de Huanchor

Nº	Tiempo (min)	Análisis de arsénico (mg/L)	de Remoción (%)
PL-SMH-00	0	0,015	-
PL-SMH-01	360	<0,001	>93,33
PL-SMH-02	360	<0,001	>93,33
PL-SMH-03	360	<0,001	>93,33
PL-SMH-04	360	<0,001	>93,33
PL-SMH-05	360	<0,001	>93,33
PL-SMH-06	360	<0,001	>93,33

Los resultados obtenidos muestran las concentraciones finales de arsénico del tratamiento con zeolitas naturales activadas para cada concentración inicial de 0,1; 0,446; 4,415; 9,634; 44,52 y 93,52 mg/L de arsénico, tal como se detallan en la tabla 8.

A partir de estos resultados se determinó la relación de la diferencia de la concentración de Arsénico inicial y final (masa de arsénico adsorbido) por unidad de masa de zeolita natural activada (masa de adsorbente) y así hallar la capacidad de adsorción máxima experimental de 1,668 mg/g la cual corresponde a la prueba N° 6 que se presenta en la tabla 8.

Tabla 8. Concentración de arsénico antes y después de las pruebas en lotes

N°	Concentración (mg/L)	Antes del tratamiento (mg/L)	Después del tratamiento (mg/L)
M5-AS-01	0.1	0.1	0.001
M5-AS-02	1	0.446	0.001
M5-AS-03	5	4.415	0.007
M5-AS-04	10	9.634	0.076
M5-AS-05	50	44.52	28.36
M5-AS-06	100	93.52	76.84

Tabla 9. Masa de arsénico adsorbido por unidad de masa adsorbente (qe)

Prueba N°	$\frac{x}{m}$ (mg/g)
1	0,010
2	0,045
3	0,441
4	0,956
5	1,616
6	1,668

Las concentraciones de arsénico existentes en las aguas de San Mateo de Huanchor, presenta un valor de 0,010 mg/L, el cual indica la contaminación por arsénico existente en dichas aguas, superan los Estándares de Calidad Ambiental (MINAM, 2017). La relación molar de Si/Al para la muestra de Zeolita Natural es de 4,73, característico de los aluminosilicatos y típico de las zeolitas de grupos estructurales como modernita y heulandita. Los iones intercambiables en la superficie de la zeolita natural no fueron afines con el arsénico existente en la muestra de agua sintética para que pueda generar una adsorción ideal, por ello se dio una remoción de arsénico casi nula. La mejor remoción de arsénico fue del 99,9 % considerando una activación de la zeolita mediante cloruro férrico, lavada hasta pH 6,4 y secado a 120 °C por 1 hora. En cuanto al lavado realizado, se obtuvieron mejores resultados con un lavado hasta un pH 6,40 casi a neutro (pH7).

La prueba con una mayor remoción de arsénico (99,65 %) fue correspondiente a la masa de 10 g de zeolita natural activada; esto debido al aumento de masa ya que proporcionalmente se da un aumento de la superficie de contacto, tal como se representa en el gráfico 2.

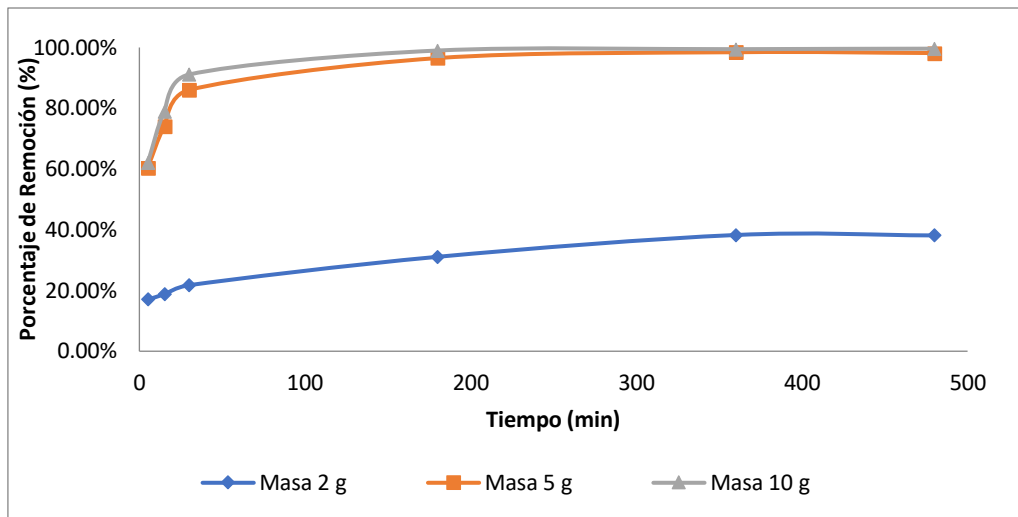


Gráfico 2. Influencia de la masa de zeolita natural activada en función del tiempo de contacto

Para el tiempo de contacto, se evidenció el aumento del porcentaje de remoción con respecto al aumento del tiempo próximo al equilibrio de adsorción, la gradiente de absorción es mayor en los primeros 30 min la cual va disminuyendo con el transcurso del tiempo hasta llegar al equilibrio, esto sucede en el minuto 360.

La mayor remoción de arsénico (99,8 %) se da en la prueba correspondiente al tamaño de partícula de malla # 40, esto debido a la disminución de tamaño de partícula generando así una mayor área específica de contacto.

Se obtuvieron concentraciones de arsénico entre 0,034 y 0,060 mg/L con capacidades de remoción desde 99,39 % hasta 99,65 %, esto se debe a que se tomaron en cuenta los mejores resultados de la influencia de masa de zeolita, tiempo de contacto y tamaño de la zeolita que intervienen en la remoción de arsénico empleando zeolitas naturales activadas.

Se obtuvieron en todos los casos concentraciones menores a 0,001 mg/L de arsénico con una capacidad de remoción mayor a 99,33 %, esto debido a que se tomaron en cuenta los mejores resultados de la influencia de masa de zeolita, tiempo de contacto y tamaño de la zeolita que intervienen en la remoción de arsénico empleando zeolitas naturales activadas.

DISCUSIÓN

Las zeolitas son usadas para adsorber contaminantes en medios acuáticos, ya sea de manera natural o activada con otros elementos químicos, pueden remover fluor (Montiel Cota *et al.*, 2013), aguas duras (Gutiérrez, Scull y Oramas, 2006), elementos en el aire (Flores, Maubert y Martín, 2006), etc. La zeolita pretratada es un buen adsorbente de arsénico, (Mejía-Zamudio *et al.*, 2009). La incorporación de otros elementos ayuda a su capacidad de retener contaminantes (Payne y Abdel-Fattah, 2005). Las influencias de

diferentes parámetros de adsorción, como el tiempo de contacto, el pH de la solución, la concentración inicial de arsénico y la temperatura sirven para optimizar las condiciones de reacción de las zeolitas (Chutia *et al.*, 2009). Para el tiempo de contacto, se evidenció el aumento del porcentaje de remoción con respecto al aumento del tiempo próximo al equilibrio de adsorción, la gradiente de absorción es mayor en los primeros 30 min la cual va disminuyendo con el transcurso del tiempo hasta llegar al equilibrio, esto sucede en el minuto 360.

Al igual que en este estudio la baja relación Si / Al fue un factor importante que rige el rendimiento mejorado de esta zeolita en comparación con otras zeolitas probadas con una relación Si / Al más alta (Shevade y Ford, 2004).

En este estudio se usó cloruro férrico como el estudio de Bilici Baskan & Pala (2011), en otros se usan otros elementos químicos que también tiene la capacidad de mejorar la adsorción. En otro estudio se usó zeolita modificada con hierro que también se demuestra con adsorbente de arsénico (Bilici Baskan y Pala, 2011). Al igual que en este estudio la eficacia de eliminación obtenida con la zeolita modificada aumentó en comparación con la obtenida con la zeolita sin modificar (Camacho, Parra y Deng, 2011). Los factores que afectan la adsorción dependen ligeramente del pH inicial (Xu, Nakajima y Ohki, 2002). Se obtuvieron concentraciones de arsénico entre 0,034 y 0,060 mg/L con capacidades de remoción desde 99,39 % hasta 99,65 %, esto se debe a que se tomaron en cuenta los mejores resultados de la influencia de masa de zeolita, tiempo de contacto y tamaño de la zeolita que intervienen en la remoción de arsénico empleando zeolitas naturales activadas.

Se obtuvieron en todos los casos concentraciones menores a 0,001 mg/L de arsénico con una capacidad de remoción mayor a 99,33 %, esto debido a que se tomaron en cuenta los mejores resultados de la influencia de masa de zeolita, tiempo de contacto y tamaño de la zeolita que intervienen en la remoción de arsénico empleando zeolitas naturales activadas.

CONCLUSIONES

Las zeolitas naturales no remueven eficientemente el arsénico en su estado natural, es necesario realizar una activación con cloruro férrico. La mejor remoción de arsénico con zeolitas naturales activadas, se presenta con un tamaño de partícula malla # 40, masa de 10 g y tiempo de equilibrio de 360 min.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bilici Baskan, M. y Pala, A. (2011) «Removal of arsenic from drinking water using modified natural zeolite», *Desalination*. Elsevier, 281(1), pp. 396-403. doi: 10.1016/j.desal.2011.08.015.

Bui, A. T. K. *et al.* (2016) «Accumulation and potential health risks of cadmium, lead and arsenic in vegetables grown near mining sites in Northern Vietnam», *Environmental Monitoring and Assessment*. Springer International Publishing, 188(9),

pp. 1-11. doi: 10.1007/s10661-016-5535-5.

Camacho, L. M., Parra, R. R. y Deng, S. (2011) «Arsenic removal from groundwater by MnO₂-modified natural clinoptilolite zeolite: Effects of pH and initial feed concentration», *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier, 189(1-2), pp. 286-293. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.035.

Chávez, M. (2009) «Evaluación de dos técnicas analíticas para la especiación de arsénico en aguas superficiales del sur del Perú», *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*. Instituto Nacional de Salud, 26(1), pp. 20-26.

Chutia, P. *et al.* (2009) «Arsenic adsorption from aqueous solution on synthetic zeolites», *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier, 162(1), pp. 440-447. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.05.061.

Dignos, E. C. G. *et al.* (2019) «The comparison of the alkali-treated and acid-treated naturally mined Philippine zeolite for adsorption of heavy metals in highly polluted waters», en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, p. 012030. doi: 10.1088/1757-899X/478/1/012030.

Fang, X. *et al.* (2018) «miRNA-182-5p, via HIF2 α , contributes to arsenic carcinogenesis: evidence from human renal epithelial cells», *Metallomics*. Royal Society of Chemistry, 10(11), pp. 1607-1617. doi: 10.1039/c8mt00251g.

Flores, J., Maubert, A. y Martín, N. (2006) «Evaluación de los intercambios iónicos en una zeolita natural mexicana para la separación de N₂ -O₂ en el aire atmosférico», *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5, pp. 119-129.

Gu, J. D. (2018) «Mining, pollution and site remediation», *International Biodeterioration and Biodegradation*. Elsevier Ltd, pp. 1-2. doi: 10.1016/j.ibiod.2017.11.006.

Gutiérrez, O., Scull, I. y Oramas, A. (2006) «Zeolita natural para la reducción de la dureza del agua. Nota técnica», *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(2), pp. 191-192.

Kesraoui-Ouki, S., Cheeseman, C. R. y Perry, R. (1994) «Natural zeolite utilisation in pollution control: A review of applications to metals' effluents», *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 121-126. doi: 10.1002/jctb.280590202.

Mejía-Zamudio, F. *et al.* (2009) «Adsorción de arsénico en zeolita natural pretratada con óxidos de magnesio», *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(4), pp. 217-227. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000400002 (Accedido: 30 de agosto de 2020).

MINAM (2017) «Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias», *El peruano*, pp. 10-19. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones> (Accedido: 30 de agosto de 2020).

Montiel Cota, A. *et al.* (2013) «Eliminación de flúor en agua potable utilizando zeolita natural (clinoptilolita)», *BIOtecnia*. División de Ciencias Biológicas y de la Salud,

UNISON, 15(2), p. 10. doi: 10.18633/bt.v15i2.143.

Muradian, R., Martinez-Alier, J. y Correa, H. (2003) «International capital versus local population: The environmental conflict of the Tambogrande Mining Project, Peru», *Society and Natural Resources*. Informa UK Ltd , 16(9), pp. 775-792. doi: 10.1080/08941920309166.

Payne, K. B. y Abdel-Fattah, T. M. (2005) «Adsorption of arsenate and arsenite by iron-treated activated carbon and zeolites: Effects of pH, temperature, and ionic strength», *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 40(4), pp. 723-749. doi: 10.1081/ESE-200048254.

Querol, X. *et al.* (2006) «Immobilization of heavy metals in polluted soils by the addition of zeolitic material synthesized from coal fly ash», *Chemosphere*. Pergamon, 62(2), pp. 171-180. doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.05.029.

Ramos, W. *et al.* (2006) «Queratosis arsenical en pobladores expuestos a relaves mineros en altura en San Mateo de Huanchor: ¿sinergismo entre arsenicismo y daño actínico crónico?», *Dermatología Peruana*. Sociedad Peruana de Dermatología., 16(1), pp. 41-45. Disponible en: <http://ateneo.unmsm.edu.pe//handle/123456789/2715> (Accedido: 23 de agosto de 2020).

Shevade, S. y Ford, R. G. (2004) «Use of synthetic zeolites for arsenate removal from pollutant water», *Water Research*. Elsevier Ltd, 38(14-15), pp. 3197-3204. doi: 10.1016/j.watres.2004.04.026.

Wu, T. L. *et al.* (2019) «Speciation and location of arsenic and antimony in rice samples around antimony mining area», *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd, 252, pp. 1439-1447. doi: 10.1016/j.envpol.2019.06.083.

Xu, Y. H., Nakajima, T. y Ohki, A. (2002) «Adsorption and removal of arsenic(V) from drinking water by aluminum-loaded Shirasu-zeolite», *Journal of Hazardous Materials*, 92(3), pp. 275-287. doi: 10.1016/S0304-3894(02)00020-1.