

Remoción de Al³⁺, Cu²⁺ y Pb²⁺ mediante adsorción aplicando un filtro de zeolitas naturales

Removal of Al³⁺, Cu²⁺ and Pb²⁺ by adsorption applying a natural zeolite filter

Karen Melissa Garces Porras^{1*} , Maeva Laura Valverde Franco¹  & Rosa María Guzmán Mora¹ 

¹ Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú.

*Autor corresponsal:
Karen Melissa Garces
Porras
kgarces@uandina.edu.pe

Citar como:
Garces Porras, K. M.,
Valverde Franco, M. L.,
& Guzmán Mora, R. M.
(2024). Remoción de Al³⁺,
Cu²⁺ y Pb²⁺ mediante
adsorción aplicando un
filtro de zeolitas naturales.
*Ambiente,
Comportamiento Y
Sociedad*, 7(2), 36–51.
[https://doi.org/10.51343/
racs.v7i2.1373](https://doi.org/10.51343/racs.v7i2.1373)

Recibido: 04 de abril de
2024

Aceptado: 14 de
abril de 2025



©Los autores. Este artículo es publicado por la revista Ambiente, Comportamiento Sociedad (RACS) de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

Resumen

Esta investigación se centró en el estudio de la capacidad de adsorción de los iones Al³⁺, Cu²⁺ y Pb²⁺ mediante el uso de zeolitas naturales, con el objetivo de evaluar su eficiencia de remoción en un filtro basado en este material. Para ello, se realizó la caracterización fisicoquímica del adsorbente, se analizó el efecto del pH a partir de los diagramas de precipitación de metales, se emplearon isotermas de adsorción para determinar la capacidad adsorbente y se evaluó la cinética de adsorción. Finalmente, se diseñó y construyó un filtro de zeolitas naturales a partir de los datos experimentales obtenidos. El análisis de difracción de rayos X (DRX) reveló que las zeolitas naturales están compuestas por montmorillonita, cristobalita, clinoptilolita, plagioclasa y cuarzo. Presentan un área superficial de 26.87 m²/g, un volumen de poro de 0.36 ml/g y una densidad aparente y real de 0.70 g/ml y 1.82 g/ml, respectivamente. En cuanto a su desempeño en la adsorción, mostraron mayor afinidad por los iones Pb²⁺ y Cu²⁺ a pH 4, y por Al³⁺ a pH 3.5. Las capacidades de adsorción obtenidas fueron de 1.54 mg Al³⁺/g, 3.19 mg Cu²⁺/g y 7.30 mg Pb²⁺/g, ajustándose al modelo de isoterma de Langmuir con coeficientes de determinación (R²) de 97.6% para Pb²⁺, 99.58% para Cu²⁺ y 98.39% para Al³⁺. La cinética de adsorción siguió el modelo de Pseudo-Segundo Orden, con una constante cinética de 0.090 g/mg·min. El filtro de zeolitas naturales fue diseñado en función de los resultados experimentales, logrando eficiencias de remoción superiores al 98%. Estos hallazgos confirman que las zeolitas naturales son un adsorbente eficaz para la eliminación de los iones Al³⁺, Cu²⁺ y Pb²⁺ en soluciones acuosas.

Palabras clave: Capacidad de adsorción, zeolitas naturales, remoción, filtro de zeolitas naturales.

Abstract

This research focused on studying the adsorption capacity of Al³⁺, Cu²⁺, and Pb²⁺ ions using natural zeolites to evaluate their removal efficiency in a zeolite-based filter. The adsorbent was physicochemically characterized, the effect of pH was analyzed based on metal precipitation diagrams, adsorption isotherms were used to

assess adsorption capacity, and adsorption kinetics were determined. Finally, a natural zeolite filter was designed and constructed based on the experimental data. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that the natural zeolites comprise montmorillonite, cristobalite, clinoptilolite, plagioclase, and quartz. They have a surface area of 26.87 m²/g, a pore volume of 0.36 ml/g, and an apparent and real density of 0.70 g/ml and 1.82 g/ml, respectively. The adsorption performance showed a higher affinity for Pb²⁺ and Cu²⁺ ions at pH 4 and for Al³⁺ at pH 3.5. The adsorption capacities were 1.54 mg Al³⁺/g, 3.19 mg Cu²⁺/g, and 7.30 mg Pb²⁺/g, fitting the Langmuir isotherm model with R² values of 97.6% for Pb²⁺, 99.58% for Cu²⁺, and 98.39% for Al³⁺. The adsorption kinetics followed the Pseudo-Second Order model, with a rate constant of 0.090 g/mg·min. The zeolite-based filter was designed according to experimental results, achieving removal efficiencies above 98%. These findings demonstrate that natural zeolites are an effective adsorbent for removing Al³⁺, Cu²⁺, and Pb²⁺ ions from aqueous solutions.

Key words: Adsorption capacity, natural zeolites, removal, natural zeolites filter.

Introducción

Los metales pesados son contaminantes persistentes que tienden a bioacumularse con facilidad, causando efectos perjudiciales, tales como la intoxicación en el ser humano y la degradación de los ecosistemas acuáticos, la minería es una de las principales actividades que causa la contaminación del agua por metales pesados, resultado de la extracción de los minerales, infiltrándose en el suelo y las aguas subterráneas, llegando a ríos y lagos. El informe elaborado por CooperAcción, Derechos Humanos sin Fronteras, Instituto de Defensa Legal y Broederlijk Delen sobre el caso Espinar señala que el suministro de agua potable, así como el manejo adecuado de estas fuentes no están adecuadamente garantizadas en función a su calidad y cantidad, lo que aumenta el riesgo de toxicidad aguda y crónica por la exposición continua a metales pesados.

Existen varios tratamientos para la descontaminación de aguas con metales pesados; la presente investigación hace énfasis en el proceso de adsorción, el cual involucra la atracción y adhesión de moléculas en fase líquida a una superficie sólida, empleando adsorbentes provenientes de fuentes naturales capaces de remover iones en aguas contaminadas con metales, tales como las zeolitas naturales, estos son ampliamente aplicados como adsorbentes debido a su estabilidad química y propiedades de intercambio iónico (Cejka y otros, 2007). Representando así una opción factible en comparación con otras técnicas de tratamiento debido a la simplicidad del diseño y un bajo costo de inversión, según lo indicado por Al-Saydeh et al., 2017.

En este contexto, la presente investigación estudia el comportamiento de las zeolitas naturales como medio adsorbente de metales pesados en un filtro diseñado y construido, y demostrar que su aplicación resulta ser una alternativa eficiente para la remoción de iones metálicos; así como también contribuir en lo posible brindando data base fundamental para el desarrollo de nuevos estudios donde el sistema de filtración con zeolitas naturales pueda ser dimensionado y aprovechado a gran escala; empleándolo así en nuestra realidad problemática.

Materiales y Métodos

A. Preparación y Caracterización del Adsorbente

Se emplearon zeolitas naturales como material adsorbente provenientes de la ciudad de Arequipa, ubicada en el sur del Perú. El material fue sometido a un proceso de molienda y tamizaje a mallas 10, 200 y 270 (2 mm, 0.075 mm y 0.053mm - ASTM). Finalmente, se determinaron las características físicas y químicas del material mediante las siguientes técnicas:

- a) Difracción de rayos X (DRX): Determinación de la composición química detallada y el tipo de Zeolita.
- b) Método BET: Determinación del área superficial del material, mediante la fisisorción con gas de nitrógeno llevada a cabo en el equipo Chemisorb 2720, bajo las siguientes condiciones:

Tabla 1

Condiciones iniciales de experimentación en el equipo BET.

Condiciones de experimentación	
Temperatura Desorción	350°C
Tiempo	20 min
Presión del Helio	50 psi
Presión de Aire	50 psi
Nitrógeno	55 psi

Nota: En la tabla se presentan las condiciones de experimentación para la determinación del área superficial de las zeolitas naturales.

- c) Método de la Probeta y Picnómetro: Determinación de la densidad aparente y real del adsorbente.
- d) Método de Imbibición: Determinación del volumen de poro de las Zeolitas Naturales.

B. Preparación de Soluciones Acuosas

Se prepararon soluciones acuosas de Al^{3+} , Cu^{2+} y Pb^{2+} , a partir de las sales de Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y

Acetato de plomo trihidratado ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$); cada una de las concentraciones preparadas fueron validadas mediante soluciones patrón, las cuales fueron determinadas mediante la técnica de espectroscopia por absorción atómica, utilizando el equipo THERMO SCIENTIFIC iCE3000 Series.

C. Determinación del Nivel de pH

La determinación del nivel de pH óptimo para el proceso de adsorción se realizó mediante pruebas de adsorción en lotes, en una serie de matraces Erlenmeyer, cada uno con 250 mL de solución contaminada con cada metal, a una temperatura de 23° C, una velocidad de agitación de 200 RPM, con 2.5 g de zeolita natural y a diferentes niveles de pH, los cuales fueron determinados mediante los diagramas de especiación de cada metal, con el fin de garantizar que no se produzca su precipitación. En la tabla N°2 se presenta la configuración de los niveles de pH evaluados.

Tabla 2

Condiciones de experimentación para la determinación del nivel de pH

Ensayo	Ion metálico	Co (mg/L)	pH	Tiempo (min)
1			2.5	
2	Al ³⁺		3	
3			3.5	
4			3	
5	Cu ²⁺	9	4	60
6			5	
7			3	
8	Pb ²⁺		4	
9			5	

Nota. En la tabla se presentan los niveles de pH utilizados para la determinación del pH óptimo para el proceso de adsorción con zeolitas naturales.

D. Capacidad de Adsorción

Se evaluó la capacidad de adsorción de las zeolitas naturales en contacto con las soluciones; se desarrollaron pruebas en lotes donde se establecieron diferentes concentraciones para cada metal, preparando un lote total de 30 muestras, considerándose 3 muestras patrón por cada metal. Se añadió a cada uno de los matraces 2.5 g de adsorbente, la mezcla se mantuvo en agitación durante 1 hora a una temperatura de 23°C y velocidad de agitación de 200 RPM. Los datos obtenidos fueron ajustados a los modelos matemáticos de las isothermas de Langmuir y Freundlich.

E. Cinética de Adsorción

La determinación de la cinética de adsorción se realizó mediante el seguimiento del perfil de remoción por muestreo a diferentes intervalos de tiempo de reacción, en lotes de matraces Erlenmeyer, con 2.5 g de zeolitas naturales, a 200 RPM, a una C_0 de 30 ppm. Seguidamente se analizaron las muestras mediante espectrometría por absorción atómica. Los datos obtenidos fueron ajustados a los modelos cinéticos de difusión intraparticular, de pseudo primer orden ($n = 1$) y de pseudo segundo orden ($n = 2$).

F. Diseño y Construcción del Filtro de Zeolitas Naturales

El diseño del filtro de zeolitas considera parámetros de partida en función a los ajustes experimentales de la capacidad de adsorción y los ajustes experimentales de la cinética de adsorción para la determinación del tiempo requerido para la operación del filtro, es preciso señalar que para el dimensionamiento se tomó en cuenta el ion metálico de mejor comportamiento en los modelos experimentales.

Para el diseño del filtro de zeolitas naturales se empleó la ecuación general del balance de materia, en conjunto con la ecuación de la isoterma de mejor ajuste; esto con el objetivo de determinar la masa de la zeolita natural necesaria para la remoción de cada tipo de metal, en función a una concentración inicial.

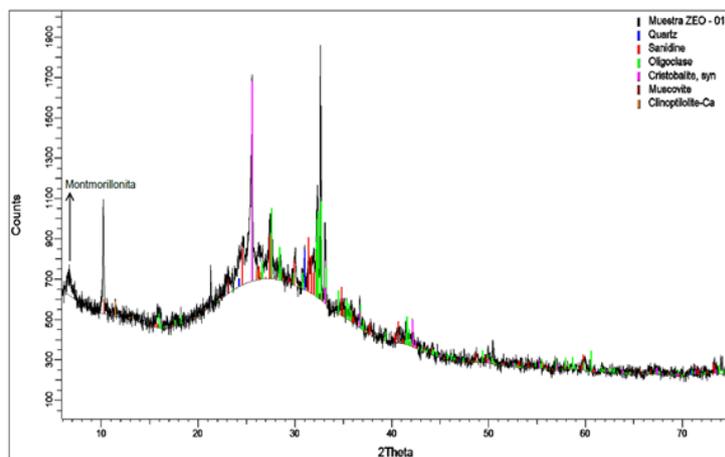
Resultados y Discusión

A. Caracterización Físicoquímica del Material Adsorbente

De los resultados obtenidos del análisis por Difracción de Rayos X (DRX) de las zeolitas naturales, se pudo determinar que el primer pico característico se presenta en el ángulo $2\theta = 0.65$, y otros tres picos, en los ángulos $2\theta = 25$, $2\theta = 32.5$ y $2\theta = 11.5$ los cuales son característicos de la *montmorillonita*, *cristobalita*, *oligoclasa* y *clinoptilolita* respectivamente, demostrando la potencialidad de la muestra analizada para su uso como medio adsorbente. (Figura 1)

Figura 1

Difractograma de las zeolitas naturales



Nota. En el difractograma presentado se evidencia la presencia de montmorillonita, cristobalita, oligoclasa y clinoptilolita en la muestra analizada.

Nota. En el difractograma presentado se evidencia la presencia de montmorillonita, cristobalita, oligoclasa y clinoptilolita en la muestra analizada.

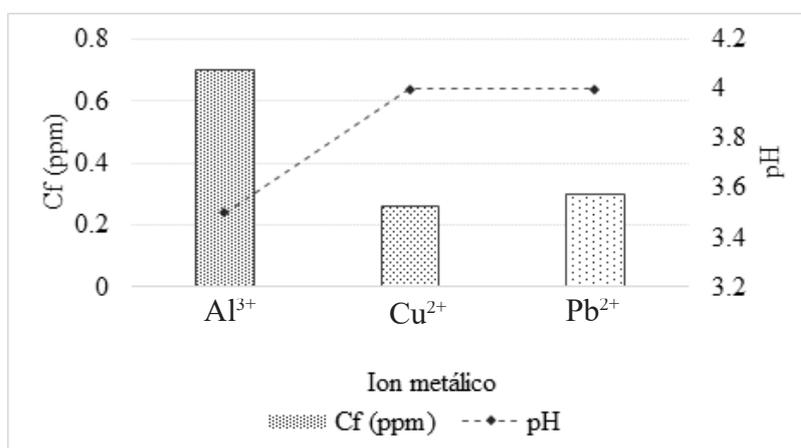
De las pruebas realizadas para la caracterización físico química de la muestra de zeolitas naturales, se obtuvo lo siguiente: Mediante el método BET se determinó que la zeolita natural tiene un área superficial de 26.87 m²/g, una densidad aparente y real de 0.7 g/ml y 2 g/ml respectivamente, y un volumen de poro de 0.36 ml/g.

B. Análisis del Efecto del pH en el Proceso de Adsorción

Los resultados experimentales, del estudio del efecto del pH en el proceso de adsorción se resume en la siguiente figura.

Figura 2

Efecto del pH para los iones de Al³⁺, Cu²⁺ y Pb²⁺



Nota. En la figura se muestra el efecto del nivel de pH de la solución sobre la capacidad de adsorción de las zeolitas naturales para cada ion metálico.

Mediante el análisis por absorción atómica de las muestras, se determinó que a un pH= 4 el ion Cu²⁺ y Pb²⁺ obtuvieron una baja concentración, y para el ion Al³⁺ a un pH de 3.5, indicando así que el proceso de adsorción fue favorable a esos niveles. Tal y como se puede observar en la figura, para el caso del ion Al³⁺, a condiciones muy ácidas (pH 2.5 y 3) se obtuvieron las menores capacidades de adsorción, debido a la competencia iónica entre los iones hidrogeniones, generados por el ácido sulfúrico, y los iones de aluminio.

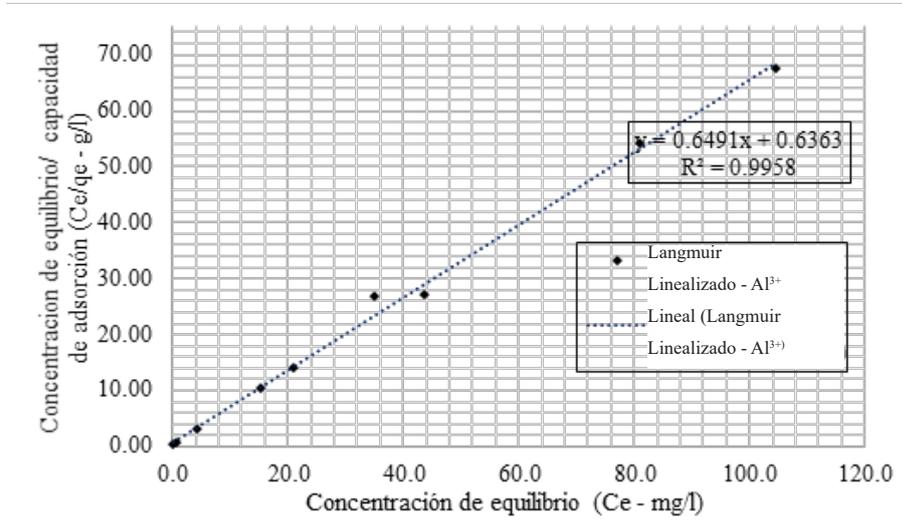
C. Evaluación de la Capacidad de Adsorción

Los resultados experimentales, del estudio de la capacidad de adsorción, demostraron que los datos experimentales se ajustan al modelo matemático de Langmuir, puesto que el valor alcanzado de su R² se asemeja al valor de 1, lo cual representa un ajuste lineal perfecto positivo y un modelo fiable, se reportaron valores de R² de 99.58%, 97.6 % y 98.39 % para el Al³⁺, Cu²⁺

y Pb^{2+} respectivamente, tal y como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 3

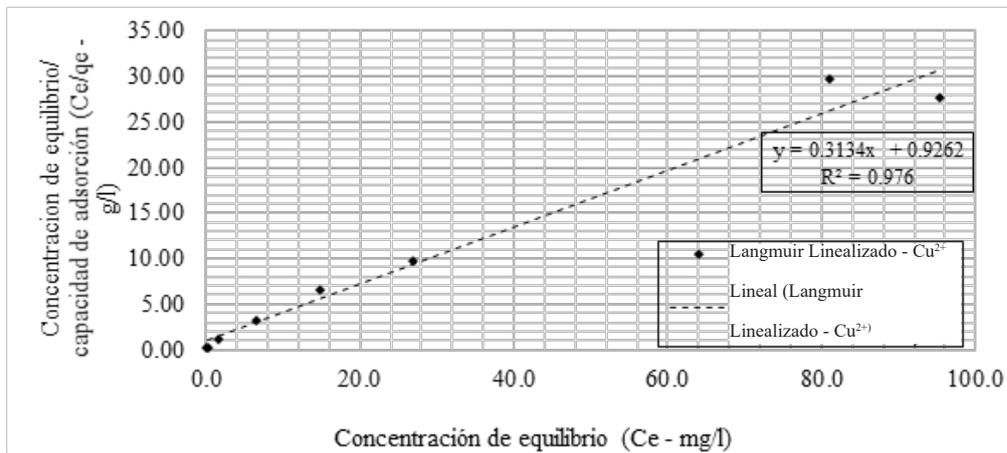
Capacidad de adsorción del Al^{3+} empleando la isoterma de Langmuir



Nota. El gráfico representa la capacidad de adsorción del Al^{3+} empleando la isoterma de Langmuir, demostrando un ajuste lineal perfecto positivo.

Figura 4

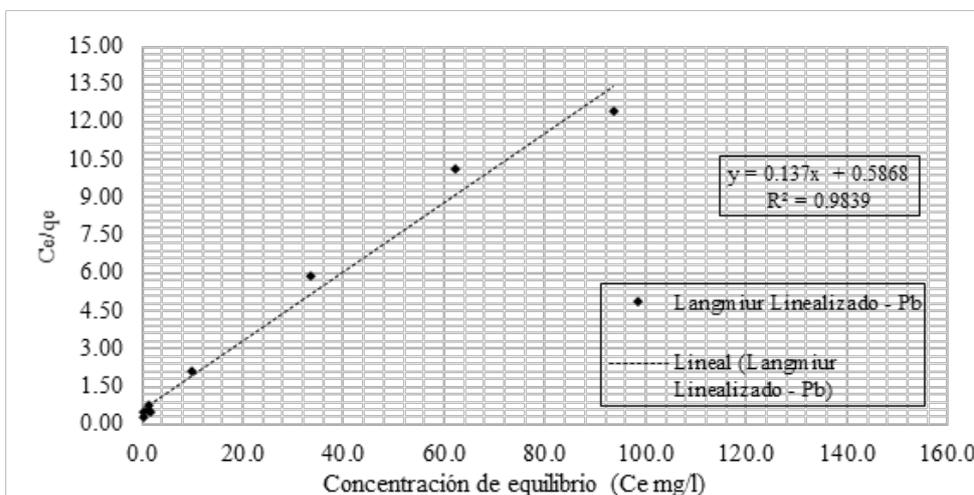
Capacidad de adsorción del Cu^{2+} empleando la Isoterma de Langmuir



Nota. El gráfico representa la capacidad de adsorción del Cu^{2+} empleando la isoterma de Langmuir, demostrando un ajuste lineal perfecto positivo.

Figura 5

Capacidad de adsorción del Pb²⁺ empleando la isoterma de Langmuir



Nota. El gráfico representa la capacidad de adsorción del Pb²⁺ empleando la isoterma de Langmuir, demostrando un ajuste lineal perfecto positivo.

En este contexto, para la isoterma del Al³⁺, de acuerdo con lo indicado por Giles et al. (1974), la isoterma obtenida es de Tipo L, esto quiere decir que se producirá una saturación progresiva de Al³ en la zeolita natural alcanzando un recubrimiento total de la superficie disponible para la adsorción, donde cada molécula ocupara un determinado sitio en la superficie, dando lugar a la formación de una monocapa, Samuel D. Faust (1987), establece que el modelo de la isoterma de Langmuir es utilizado para procesos de adsorción de tipo químico, o quimisorciones, que implican la formación de enlaces químicos entre las moléculas del adsorbato y la superficie del adsorbente.

Para el caso de los iones de Cu²⁺ y Pb²⁺, de acuerdo con Giles et al. (1974), se obtuvo una isoterma de Tipo H, demostrando una gran afinidad del adsorbato de la solución por el adsorbente. Esta isoterma se asocia con valores altos de capacidad máxima de adsorción del adsorbente. Los resultados indican que la isoterma de Langmuir es la más adecuada para explicar el proceso de adsorción en la superficie de las zeolitas naturales. Esta isoterma es altamente favorable y sugiere una adsorción de tipo monocapa, lo que implica que el proceso de adsorción es de naturaleza química, según Samuel D. Faust (1987).

Tabla 3.

Al ³⁺			Cu ²⁺			Pb ²⁺		
a	K _L	R ²	a	K _L	R ²	a	K _L	R ²
(qmax)	(L/mg)		(qmax)	(L/mg)		(qmax)	(L/mg)	
mg/g			mg/g			mg/g		
1.54	1.02	99.58	3.19	0.34	97.6	7.30	0.23	98.39

Nota. En la tabla se muestran las capacidades de adsorción de cada ion metálico, demostrando la afinidad del adsorbato por el adsorbente.

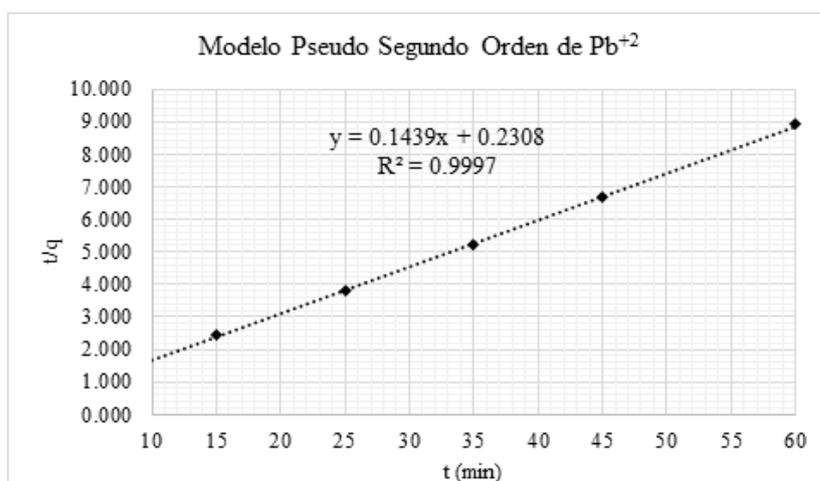
Los resultados indican que la zeolita tiene una mayor capacidad de adsorción del ion de Plomo, obteniéndose una capacidad de 7.30 mg Pb²⁺/gramo de zeolita. En comparación, se obtuvieron valores de capacidad de adsorción de 1.54 mg Al³⁺/gramo de zeolita y 3.19 mg Cu²⁺/gramo de zeolita. Se puede destacar que la capacidad de adsorción de la zeolita para el Aluminio es la más baja en comparación con el Cobre y el Plomo.

D. Diseño y Construcción del Filtro de Zeolitas

Determinación de la Cinética de Adsorción. Al aplicar el modelo cinético de pseudo segundo orden se logra un alto nivel de correlación, con un coeficiente de 0.9997. Además, se obtienen valores de capacidad de adsorción de 6.949 mg/g y una constante de velocidad de 0.090 g/mg*min.

Figura 6

Cinética de adsorción del ion Pb²⁺ empleando el modelo de Pseudo Segundo orden



Nota. En el gráfico se muestra la Cinética de adsorción del ion Pb²⁺ empleando el modelo de Pseudo Segundo orden, logrando un alto nivel de determinación.

Diseño del Filtro de Zeolitas Naturales. Para realizar el cálculo, se utiliza la ecuación de la isoterma de Langmuir, que se considera la isoterma con mejor comportamiento para los tres iones metálicos analizados. Por esta razón, al diseñar el filtro de zeolitas se comienza con un balance de masa en estado estable alrededor del lecho.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} - \text{Cantidad Adsorbida}$$

Para el dimensionamiento del filtro se establecen parámetros de cálculo, detallados en la Tabla 4.

Tabla 4*Condiciones de experimentación iniciales*

Parámetros	Valores
C_f	0.5 mg/L
TRH*	45 min
Q	0.011 L/min
D. Aparente	700 g/L

*Tiempo de retención hidráulica

Nota. La tabla indica los parámetro y valores de experimentación iniciales para el cálculo de las dimensiones del filtro de zeolitas.

Los cálculos fueron desarrollados para cada ion metálico, los cuales son detallados en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5*Parámetros de diseño para la construcción del filtro.*

Parámetros	Al ⁺³	Cu ⁺²	Pb ⁺²
a**	1.54	3.19	7.3
b***	1.02	0.34	0.23
R ²	0.9958	0.976	0.9839
Concentración inicial	60 ppm	125 ppm	300 ppm
Masa de las zeolitas naturales requerida	19.79 g	20.05 g	20.84 g
Volumen del lecho de zeolitas naturales	0.028 L	0.028 L	0.029 L
Área Transversal del lecho de zeolitas naturales	0.28 cm ²	0.28 cm ²	0.28 cm ²
Altura del lecho de zeolitas naturales	1 cm	1 cm	1 cm

**capacidad de adsorción para cada ión metálico

***constante

Nota. La tabla indica los parámetro y valores de cada ion metálico, dichos datos indican las especificaciones para la construcción de un filtro adecuado a la capacidad de adsorción de cada ion metálico.

Se determinó que, la cantidad de masa de adsorbente requerida es de 20 g con una altura de lecho de 1 cm, esto es corroborado construyendo el filtro de zeolita natural establecido en la Tabla 5.

Discusión de resultados

A. Diseño y Construcción del Filtro de Zeolitas

De los resultados obtenidos de la difracción de rayos X (DRX), nos muestra que las zeolitas naturales utilizadas tienen en su composición química: muscovita, montmorillonita, clinoptilolita y cuarzo; dicha composición se asemeja a lo determinado

por Rodríguez Valdivia, (2016), cuya investigación determino que las zeolitas naturales se componen por: clinoptilolita, biotita, mordenita y cuarzo, lo cual evidencia que existe similitud entre los adsorbentes utilizados en ambas investigaciones.

En cuanto a las características fisicoquímicas, tales como densidad aparente y real, se obtuvo que la muestra presenta una densidad aparente de 0.70 g/ml, y una densidad real de 1.8 g/ml, valores que resultan semejantes a los reportados en la investigación de Rodríguez Valdivia, (2016), de 0.94 g/ml y 2.31 g/ml para su densidad aparente y real, respectivamente. En el caso del análisis realizado por el método BET, el área superficial se estableció en un valor de 26.87 m²/g, el cual se aproxima al área superficial de 27.08 m²/ g que fue determinado por Moreno Balseca & Palacios Cabrera, (2017). Así mismo, en la determinación del volumen de poro de las zeolitas naturales, se obtuvo un valor de 0.36 ml/g, el cual se asemeja al valor de 0.35ml/g, reportado por Auerbach et al., (2003).

Tabla 6

Comparación de los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y los antecedentes

Adsorbente	Características Fisicoquímicas	Resultados del antecedente	Referencia	Resultados de la investigación
Zeolita Naturales Puno	Composición Química	Clinoptilolita	<i>Rodríguez Valdivia (2016)</i>	Muscovita
		Biotita		Montmorillonita
		Mordenita		Clinoptilolita
		Cuarzo		Cuarzo
Zeolitas Naturales Puno	Densidad Real	1.8 g/ml	<i>Rodríguez Valdivia (2016)</i>	2.31 g/ml
Zeolitas Naturales Puno	Densidad Aparente	0.70 g/ml	<i>Rodríguez Valdivia (2016)</i>	0,94 g/ml
Zeolitas Naturales Ecuador	Área Superficial (BET)	27.08 m ² /g	<i>Cabrera et al., (2017)</i>	26.87 m ² /g
Zeolitas Naturales	Volumen de Poro	0.35 ml/g	<i>Auerbach et al., (2003)</i>	0.26 ml/g

B. Análisis del efecto del pH en el proceso de adsorción

El estudio de Guevara Neyra y Mayanga Chuquillanque, (2017) muestra el comportamiento del pH a diferentes niveles, observando que el mayor porcentaje de remoción de Pb²⁺ de la zeolita natural prevaleció en un pH = 4, mientras que Barreto Pio, (2021) establece que el proceso de adsorción tiene una mejor remoción de Pb²⁺ un nivel de pH = 5; en la presente investigación también se evidencia el efecto del pH en el proceso de adsorción de Pb²⁺, dado que se obtuvo una mejor remoción a un nivel de

pH =4, demostrando que el pH tiene un efecto en el proceso de adsorción. Para el caso del Cu^{2+} , en la investigación de Ordoño Bellido y Mendoza Ancori, (2020) se demostró que se obtienen mejores resultados, a un nivel de pH = 5.5, el cual realizando una comparación se acerca al valor de pH = 4 que fue establecido en el proceso de adsorción de Cu^{2+} , para esta investigación.

En cuanto al caso especial del Al^{3+} no se cuenta con resultados precisos acerca del efecto del pH en el proceso de adsorción, sin embargo en la investigación presentada por Moreno Balseca y Palacios Cabrera, (2017) se menciona que para la remoción del Al^{3+} en columnas, se requiere de un rango de pH = 6-7, debido a que este ion requiere de este nivel para precipitarse; no obstante de acuerdo con lo analizado en la presente investigación, se determinó que el ion Al^{3+} requiere de un pH=3.5, puesto que a esa condición se asegura que el metal se encuentre en su forma iónica y evita su precipitación, lo cual es fundamental para un proceso de adsorción.

Tabla 7

Comparación del nivel de pH para el proceso de adsorción con los antecedentes

Metal	Resultados del antecedente (pH)	Referencia	Resultados de la investigación (pH)
Al^{3+}	6-7	Moreno Balseca y Palacios Cabrera, (2017)	3.5
Cu^{2+}	5.5	Ordoño Bellido y Mendoza Ancori, (2020)	4
Pb^{2+}	4	Guevara Neyra y Mayanga Chuquillanque, (2017)	4
	5	Barreto Pio, (2021)	

Para evaluar la capacidad de adsorción de las zeolitas naturales, se compararon los resultados obtenidos en esta investigación con los reportados en estudios previos presentados en la Tabla 8. Se evidenció que los valores son similares en algunos casos, mientras que en otros presentan diferencias atribuibles a las condiciones experimentales empleadas.

Adsorción de Pb^{2+} : Barreto Pio (2021) estudió el potencial de remoción de zeolitas naturales en el tratamiento de aguas contaminadas con Pb^{2+} y determinó una capacidad máxima de adsorción de 3.55 mg Pb^{2+}/g de zeolita, ajustándose al modelo de isoterma de Langmuir. En la presente investigación, se obtuvo una capacidad de adsorción de 7.30 mg Pb^{2+}/g , también con ajuste a la isoterma de Langmuir. A pesar de la diferencia en los valores reportados, ambos estudios confirman la afinidad de las zeolitas naturales por el Pb^{2+} .

Adsorción de Al^{3+} : En este caso, los valores muestran una mayor discrepancia. En la investigación de Abdullah (2014), la capacidad de adsorción alcanzó 11.74 mg Al^{3+} /g de zeolita natural, mientras que en el presente estudio se obtuvo un valor inferior. Esta diferencia puede atribuirse a la metodología empleada, ya que Abdullah (2014) utilizó una zeolita activada con HCl al 1M, mientras que en este estudio se trabajó con zeolita natural sin ningún proceso de activación.

Estos resultados resaltan la importancia de las condiciones experimentales y el tratamiento previo de la zeolita en su desempeño como adsorbente.

Tabla 8

Comparación del nivel de pH para el proceso de adsorción con los antecedentes

Metal	Sorbente	Ajuste de Isoterma	q _{max} (mg/g)	R ² (%)	Referencia	q _{max} (mg/g) de la investigación	R ² (%) de la investigación
Al^{3+}	Zeolita Natural Activada	Langmuir	11.76	99.6	Abdula (2014)	1.54	99.58
Cu^{2+}	Zeolita Natural Comercial	Langmuir	8.17	99.18	Alvarado N. (2020)		
	Zeolita Natural Puno	Langmuir	0.14	99.36	Ordoño Bellido José A. y Mendoza Ancкори Adelaida (2020)	3.19	97.6
Pb^{2+}	Zeolita Natural Puno	Langmuir	5.52	95.6	Rodriguez Valdivia (2016)		
	Zeolita Natural Arequipa	Langmuir	3.55	98.25	Barreto Pio (2021)		
	Zeolita Natural Comercial	Langmuir	7.8	98.09	Alvarado N. (2020)	7.3	98.39

Conclusiones

De la identificación de las características fisicoquímicas de las zeolitas naturales, se determinó que estas se encuentran compuestas por montmorillonita, cristobalita, clinoptilolita, plagioclasa y cuarzo en su composición química, un área superficial de 26.87 m²/g, una densidad aparente de 0.70 g/ml y un volumen de poro de 0.36 ml/g. Los niveles de pH determinados para el proceso de adsorción tuvieron un efecto

significativo sobre los valores de remoción, de los iones de Al^{3+} , Cu^{2+} y Pb^{2+} , los cuales fueron obtenidos después del tratamiento. Se pudo identificar que para el proceso de adsorción del ion de Al^{3+} a un de pH ácido, no se evidencia remoción del metal; mientras que en el caso del Cu^{2+} , a un nivel de pH de 4, se presenta una remoción significativa, al igual que para el caso del Pb^{2+} .

Mediante la construcción y desarrollo del modelo matemático de la isoterma de Langmuir, se determinó que las zeolitas naturales poseen una capacidad de adsorción de 1.54 mg de Al^{3+} / g de zeolita, para el Al^{3+} , 3.19 mg de Cu^{2+} / g de zeolita, para el Cu^{2+} y 7.30 mg de Pb^{2+} /g de zeolita para el Pb^{2+} . Presentando una mayor capacidad de adsorción para el ion de Pb^{2+} .

Los resultados obtenidos han demostrado que la aplicación del filtro de zeolitas naturales diseñado presenta una remoción eficiente y efectiva, logrando reducir en más del 90% la concentración inicial de los iones de Al^{3+} , Cu^{2+} y Pb^{2+} . Se obtuvo que el ion de Al^{3+} alcanzó una remoción de 99.32 %, mientras que el Cu^{2+} y Pb^{2+} alcanzaron una remoción de 98.04 % y 99.97 % respectivamente.

Agradecimiento

Al laboratorio BIZALAB por su valioso respaldo para la determinación por absorción atómica, al laboratorio de química de la facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Andina del Cusco, al departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco por el apoyo brindado en la realización de este proyecto de investigación.

Declaración de Conflicto de Intereses

Los autores declaran con respecto al documento, no tener conflicto de intereses financieros ni personales que puedan influir inapropiadamente en el desarrollo de este artículo.

Referencias

- Abdullah, A. (2014). Aluminum Pollution Removal from Water Using a Natural Zeolite. *Journal of Pollution Effects & Control*, 2, 1-4. <http://dx.doi.org/10.4172/2375-4397.1000120>
- Adilson W., Granda, J., Lima, H., & Sousa, W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Scielo Información Tecnológica*, 111-118. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>
- Al-Saydeh, S. A., El-Naas, M. H. y Zaidi, S. J. (2017). Copper removal from industrial wastewater: A comprehensive review. ELSEVIER. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 56, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026>
- Auerbach, S., Carrado, K., & Dutt, P. (2003). *Handbook of zeolites science and technology*. Marcel Dekker.
- Barreto pio, c. E. (2021). *Potencial de remoción de la zeolita natural peruana en el tratamiento de aguas contaminadas con plomo*. [Tesis de posgrado Universidad Nacional Federico Villarreal]. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/4732>
- Brezonik, P., & Arnold, W. (2011). *Water Chemistry: An Introduction to the Chemistry of Natural and Engineered Aquatic Systems*. Oxford University Press, Inc.
- CooperAcción, *Derechos Humanos sin Fronteras, Instituto de Defensa Legal y Broederlijk Delen*. (2016). *Metales Pesados Tóxicos y Salud Pública: El Caso Espinar*. Editorial Sonimágenes del Perú. <https://cooperaccion.org.pe/wp-content/uploads/2017/11/ESPINAR-Informe-sobre-salud-4-1.pdf>
- Cejka, J., Van Bekkum, H., Corma, A., & Schüth, F. (2007). *Introduction to zeolite science and practice*. Elsevier.
- Centro Nacional de Salud Ocupacional y Protección del Ambiente para la Salud (CENSOPAS). (2013). *Informe Final Integrado de Monitoreo Sanitario Ambiental Participativo de la Provincia de Espinar. Ministerio del Ambiente*. https://www.minam.gob.pe/espinar/wcontent/uploads/sites/14/2013/10/Informe_aprobado.pdf
- Faust, S. D., & Aly, O. M. (2013). *Adsorption for processes for water treatment*. Boston: Butterworth Publishers.
- Brezonik, P., & Arnold, W. (2011). *Water Chemistry: An Introduction to the Chemistry of Natural and Engineered Aquatic Systems*. Oxford University Press, Inc.
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Compañía Editorial Continental, S.A. De C.V. México, 3ra Edición.

- Giles, C., Smith, D., & Huitson, A. (1974). A General Treatment and Classification of the Solute Adsorption Isotherm. ELSEVIER. *Journal of Colloid and Interface Science*, 755-765. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(74\)90252-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(74)90252-5)
- Ho, Y., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. ELSEVIER. *Process Biochemistry*. 451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Rhodes Trussell, R., & Tchobanoglous, G. (2012). *Principios de tratamiento del agua. Cuauhtemoc: Impresos Vacha.*
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados en la Salud Humana y Animal. SCIELO. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 145-153. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612016000200017