

REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE SOLUCIONES ACUOSAS MEDIANTE LECHOS FILTRANTES

Gloria I. Barboza-Palomino ^a
Ybar G. Palomino-Malpartida ^a
Tarcila Alcarraz-Alfaro ^a
Edgar G. Aronés Medina ^a
David Choque-Quispe ^b
Adolfo La Rosa Toro Gómez ^c
, Betsy S. Ramos-Pacheco ^b

^a Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho 0500, Perú.

^b Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional José María Arguedas, Andahuaylas, 03701, Perú.

^c Laboratorio de Investigación de Electroquímica Aplicada, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 15333, Perú.

Correo: gloria.barboza@unsch.edu.pe

RESUMEN

Estudios de calidad de agua han reportado concentraciones de metales pesados en aguas de consumo de comunidades rurales, hecho que ha motivado a realizar la investigación que tuvo como objetivo remover metales pesados de soluciones acuosas, empleando lechos filtrantes conformados con diatomita, arcilla roja y cáscara de granos de quinua activados a 1000°C. Se conformaron tres tipos de lechos filtrantes, monolito en forma cilíndrica de diatomita, pellets esféricos de arcilla roja y partículas rojas de arcilla. Con la primera forma de lecho filtrante se logró remover en promedio 64,2% de Al, 43,34% de Cd, 37,78% de Ni y 61,70% de Pb. Con los pellets esféricos se removió 89,64% de Al, 98,47% de Cd, 86,31% de Ni y 96,41% de plomo utilizando 8,37 g del adsorbente para 300 mL de solución acuosa, con tiempo de contacto de 30 minutos; con las partículas finas obtenidas del monolito de arcilla roja se obtuvo porcentaje de remoción de 18,52 % de Al, 79,11% de Cd, 49,93% de Ni y 48,50 % de Pb. Se logró remover metales pesados Al, Cd, Ni y Pb desde una solución acuosa mediante lechos cerámicos, conformados por materiales no metálicos y materia orgánica, activados a 1000 °C.

Palabras claves: lecho filtrante, diatomita, arcilla, metales

I. INTRODUCCIÓN

Muchas comunidades rurales locales y a nivel nacional consumen agua entubada que presentan concentraciones de algunos metales pesados por encima de lo que recomienda la OMS y el reglamento de la calidad del agua para consumo humano D.S. N° 031-2010-SA, siendo necesario su control y remoción.

En el Boletín Tecnológico N° 3 del Instituto Nacional de Salud, publicado el 2019, se detalla, recuperación de agua contaminada con metales pesados en Lima, Perú, se abordan cuatro metales pesados específicos: plomo, cadmio, mercurio y arsénico. De acuerdo a estudios realizados son altamente tóxicos y pueden causar daños en los sistemas nervioso, cardiovascular, renal e inmunológico. Además, la exposición a estos metales puede aumentar el riesgo de enfermedades de cáncer y otros problemas de salud grave. Por lo tanto, es importante contar con tecnologías adecuadas para el tratamiento de agua

contaminada con metales pesados (INS, 2019).

En muchas comunidades del Perú, se consume agua con simple desinfección y en varias de ellas las fuentes de agua son manantiales, riachuelos, con contenido de metales pesados y no se cuenta con sistemas de tratamiento para su remoción (Vivanco et al., 2022).

La Dirección Regional de Salud de Ayacucho a determinado el contenido de metales pesados en laboratorios acreditados de 41 centros poblados, considerándose riesgo en la salud de las comunidades (DIRESA, 2023). La importancia de la investigación radica en utilizar recursos naturales de bajo costo para elaborar lechos filtrantes y contribuir en la calidad del agua de consumo poblacional.

Para el desarrollo del trabajo de investigación se preparó soluciones acuosas conteniendo metales como aluminio, cadmio, plomo y níquel, en concentraciones superiores a los límites máximos permisibles establecidos en normativas vigentes.

La investigación tuvo como objetivo remover metales pesados de soluciones acuosas, mediante lechos filtrantes con matriz de minerales no metálicos y materia orgánica, activados a térmicamente.

II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se realizó en los laboratorios, Centro Experimental de Cerámica de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, laboratorio de la Universidad Nacional José María Arguedas de Andahuaylas, durante el año 2023.

La arcilla roja y diatomita se sometieron a chancado, pulverizado y tamizado en mallas hasta un tamaño de partículas de 0,63 y 0,2 mm y las cáscaras de granos quinua a 1,2 mm de granulometría. Los materiales no metálicos en polvo se lavaron con agua potable y se secaron a temperatura ambiente durante 8 días. Se pesaron 1000 g de arcilla roja y 180 g de cáscaras de grano de quinua (materia orgánica), igualmente 1000 g de diatomita y 180 g de materia orgánica basado en uno de los niveles trabajados para arcilla roja y aserrín (Cristóbal & Laura, 2022); con ellos se elaboraron barbotinas homogéneas; se vertieron en cubetas de yeso cerámico, para retirar la humedad en 24 horas. La mezcla semiseca se alimentó a una amasadora extrusora con bomba al vacío para obtener una pasta plástica, a partir del cual se conformaron monolitos cilíndricos de 10 cm de diámetro y 2,5 cm de espesor y pellets esféricos de 1 cm de diámetro, los que se activaron a 1000 °C (Cristóbal & Laura, 2022), en un horno cerámico de ensayo por un tiempo de 3 horas y 8 minutos; se enfriaron y pesaron.

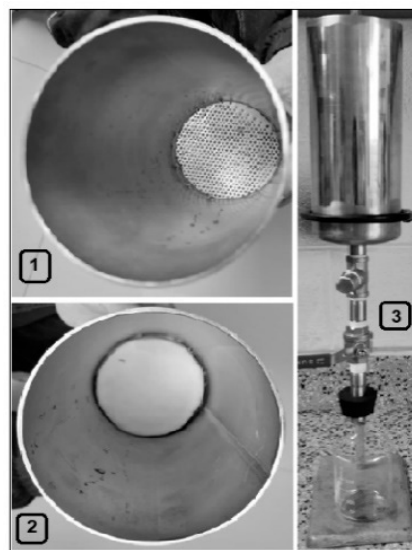
Se prepararon dos soluciones acuosas para los diferentes ensayos, la primera con las siguientes concentraciones de metales 1,937 mg/L de Al, 1,380 mg/L de Cd, 2,770 mg/L de Pb, 1,671 mg/L de Ni. La segunda con 1,890 mg/L de Al, 0,052 mg/L de Cd, 0,506 mg/L de Pb y 0,098 mg/L de Ni. Para la preparación se utilizaron $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ de marca Carlo Erba, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ al 99% de marca Merck, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ al 99,1 % Carlo Erba, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Riedel Haen.

Remoción de metales de la solución acuosa

a) Con monolito de diatomita de forma cilíndrica

Figura 1

Equipo empleado en la remoción de metales con monolito de diatomita



Nota: (1) Soporte cilíndrico de acero inoxidable con agujeros en la placa de acero ubicado en la base del soporte, (2) monolito de diatomita colocado en la base del soporte, (3) equipo para remoción de metales con el monolito de diatomita.

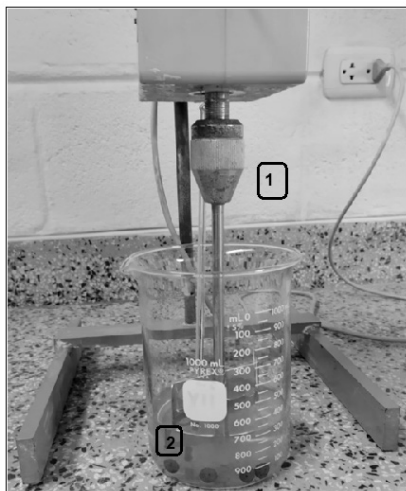
Se realizaron tres tratamientos para la remoción de metales de la solución acuosa, con monolito cilíndrico de diatomita, el cual se trató con 300 mL de solución acuosa cinco veces con la primera solución. El tiempo de contacto fue de 90 minutos cada vez, dejando fluir la solución con un caudal de 7,7 mL/min a un vaso de precipitado, se filtró y se tomó 100 mL para la determinación de la concentración de metales

b) Pellets de arcilla roja de forma esférica

Los pellets, fueron pesados y colocados en un vaso de precipitado de 1000 mL, al que se agregó 300 mL de la primera solución. El tiempo de contacto fue de 30 minutos a 50 rpm, se filtró y se tomó 100 mL para el análisis de concentración de metales.

Figura 2

Equipo empleado en la remoción de metales con pellets de arcilla roja



Nota: (1) Agitador tipo hélice, (2) pellets de arcilla roja

c) Con partículas finas obtenidas del monolito de arcilla

Las partículas finas fueron obtenidas por molienda a partir del monolito de arcilla, con una granulometría

de 1 mm, se pesaron dos muestras de 0,5 g y se colocaron en vasos de precipitado de 250 mL que contenían 100 mL de la segunda solución, agitándose a 200 rpm; los tiempos de contacto utilizados fueron de 15 y 30 minutos, se realizaron por triplicado. Se filtraron y se tomaron muestras de 100 mL para el análisis de concentración de metales.

Porcentaje de remoción de metales

El porcentaje de remoción de metales se determinaron con las concentraciones de metales pesados de la solución acuosa antes y después del filtrado de cada ensayo, con un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente, ICP-OES 9820 Shimadzu.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Proceso de secado de los monolitos cerámicos de diatomita y arcilla roja

Los monolitos de forma cilíndrica elaborados manualmente en el Centro Experimental de Cerámica de la UNSCH se colocaron en una cámara de secado por un periodo de veinte días, en el cual se hizo seguimiento de la pérdida de humedad.

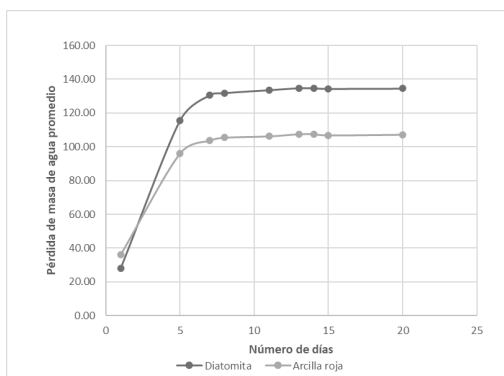
La tabla 1, reporta las pérdidas de masa de agua promedio al ambiente.

Tabla 1
Pérdida de masa de agua por días de secado de los monolitos

Pérdida de masa	Días de secado de los monolitos								
	1	5	7	8	11	13	14	15	20
Diatomita (g)	27,86	115,47	130,49	131,87	133,61	134,76	134,70	134,38	134,52
Arcilla roja (g)	36,09	96,01	103,70	105,48	106,27	107,51	107,56	106,83	107,24

Figura 1

Perfil de pérdida de masa de agua durante el secado de los monolitos cerámicos



La figura 1, muestra que entre los días 13 y 14 del secado, los monolitos cerámicos ya no presentan variación de pérdida de masa, llegando al equilibrio con la humedad atmosférica. Es recomendable activar térmicamente los monolitos cerámicos a partir del día 14 para evitar el cuarteamiento del producto en el horno.

Los monolitos de diatomita presentaron mayor pérdida de masa de agua durante el secado. La arcilla roja retiene humedad porque el agua realiza una encapsulación en las partículas en capas que presentan las arcillas (Mella Stappung, 2004 citado por Cristóbal & Laura, 2021).

Activación térmica de los monolitos de arcilla roja y diatomita

Los monolitos de forma cilíndrica se activaron en

un horno a 1000 °C por un tiempo de 3 horas y 8 minutos; los datos y resultados se detallan en la tabla 2.

Tabla 2
Porcentaje de pérdida en peso de los monolitos de arcilla roja y diatomita

Mf	Tp	MO	TP	m _i	m _f	% p/p	
	(mm)	(%)	(mm)	(g)	(g)		
Arcilla roja		15,25	1,25	164,63	132,72	19,38	19,34
				172,05	138,72	19,37	
				172,91	139,62	19,25	
Diatomita	0,63	15,25	1,25	115,46	90,13	21,94	21,88
				118,56	92,73	21,79	
				115,76	90,41	21,90	

Nota: Mf Monolito cerámico de un $\phi = 10$ cm; Tp tamaño de partícula de la arcilla roja y diatomita; MO materia orgánica (cáscara de los granos de la quinua); TP tamaño partícula materia orgánica; m_i masa inicial; m_f masa final; % p/p Porcentaje de pérdida en peso de los monolitos y media % p/p.

Activación térmica de los monolitos de arcilla roja de forma esférica

Los pellets esféricos preparados con material cerámico más cáscara de granos de quinua, con una masa promedio de 1,6 g y diámetro aproximado de 1 cm, se secaron al ambiente por 14 días y se sinterizaron a 1000 °C (Cristóbal & Laura, 2021), los datos y resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3
Porcentaje de pérdida en peso de pellets de arcilla roja

M _p	Tph	MO	TP	mi	mf	% p/p	
	(mm)	(%)	(mm)	(g)	(g)		
Arcilla roja	0,20	15,25	1,25	280,62	237,59	15,33	15,35
	0,63			127,51	107,93	15,36	

Nota: M_p muestra pellets; Tph tamaño de partícula de arcilla; MO materia orgánica (cáscara de los granos de quinua); TP tamaño de partícula de materia orgánica; m_i masa inicial; m_f masa final; % p/p Porcentaje de pérdida en peso de los pellets y media % p/p.

En la tabla 3 se observa que el porcentaje de pérdida en peso durante el proceso de sinterización del monolito en forma cilíndrica de la arcilla roja es de 19,34 %, que es menor a 21,88% que reporta el monolito elaborado con diatomita y materia orgánica. La pérdida en peso fue fundamentalmente debido a la liberación de la humedad restante, del agua liga-

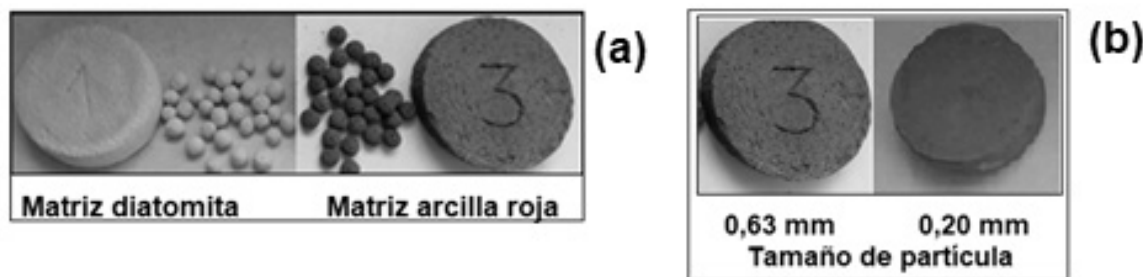
da químicamente y de dióxido de carbono generado por el contenido de materia orgánica.

Los monolitos cilíndricos y pellets esféricos luego de la activación térmica presentaron mayor consistencia, porosidad y con cierto nivel de vitrificación, que son favorables para la remoción de metales pesados del agua.

Monolitos y pellets de diatomita y arcilla roja

En la figura 2 se observa los monolitos cilíndricos y pellets de arcilla roja y diatomita elaborados con un tamaño de partícula 0,63 mm y 0,20 mm más partículas de cáscara de granos de quinua de 1,2 mm.

Figura 2
Monolitos y pellets cerámicos



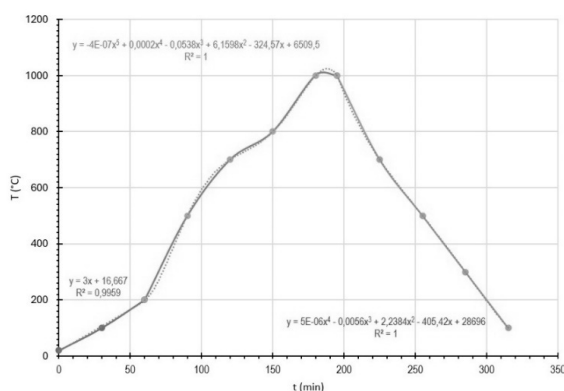
Nota: (a) Monolitos y pellets cerámicos de granulometría 0,63 mm, (b) Monolitos cerámicos de diferentes granulometrías 0,63mm y 0,20 mm, activados a 1000 °C

Los monolitos cerámicos elaborados con material de tamaño de partícula de 0,63 mm presentaron mayor porosidad que los elaborados con tamaño de partícula de 0,2 mm.

Durante la activación térmica se midieron la temperatura del horno cada intervalo de tiempo, obteniéndose el perfil de la temperatura de activación térmica.

Figura 3

Perfil de la temperatura de activación térmica de los monolitos de arcilla roja y diatomita



En la figura 3 se observa que a las 3 horas y 8 minutos se llegó a la temperatura de 1000 °C.

Se observó el comportamiento de la temperatura en función al tiempo del proceso de activación térmica. Adicionalmente se muestra la tendencia de la curva polinómica con lo cual se determinó el tiempo y temperatura adecuados de activación térmica.

Remoción de metales utilizando monolito de diatomita

El monolito de diatomita y materia orgánica, se colocó dentro de una estructura de filtro de acero inoxidable, con 300 mL de solución acuosa, se mantuvo en contacto por 90 minutos, luego se dejó discurrir con un caudal de 7,71 mL/min, recibiendo la solución filtrada en un vaso de precipitado, se determinó el pH de la solución filtrada y se trasvasó parte de la solución filtrada a un frasco de vidrio, color ámbar, de 100 mL, procediendo a su etiquetado y el análisis del contenido de metales mediante ICP.

Se realizó 4 veces el mismo procedimiento con el mismo monolito utilizando una nueva solución inicial. Al final de cada ensayo se midió el pH de la solución filtrada cuyo valor promedio fue de 4,9.

La tabla 4, muestra los resultados de la determinación de la concentración de metales por ICP de las soluciones filtradas.

Tabla 4

Concentración de metales antes y después del tratamiento con monolito de diatomita

Soluciones	[Al] (mg/L)		[Cd] (mg/L)		[Ni] (mg/L)		[Pb] (mg/L)	
	$\bar{x}$	$\pm s$	$\bar{x}$	$\pm s$	$\bar{x}$	$\pm s$	$\bar{x}$	$\pm s$
SA ₀	1,937	0,130	1,380	0,101	1,671	0,124	2,770	0,187
SD1	0,955	0,065	0,868	0,062	1,261	0,090	1,577	0,137
SD2	0,609	0,047	0,632	0,053	0,862	0,072	0,801	0,065
SD3	0,612	0,069	0,734	0,061	0,991	0,078	0,949	0,088
SD4	0,598	0,011	0,893	0,055	1,044	0,060	0,917	0,060
SD5	0,904	0,064	1,110	0,076	1,274	0,093	1,504	0,105

Nota: SA₀ solución acuosa; [Al] concentración de aluminio; [Cd] concentración de cadmio; [Ni] concentración de níquel; [Pb] concentración de plomo; SD1 a SD5 Soluciones filtradas luego del tratamiento de la solución acuosa con el monolito de diatomita.

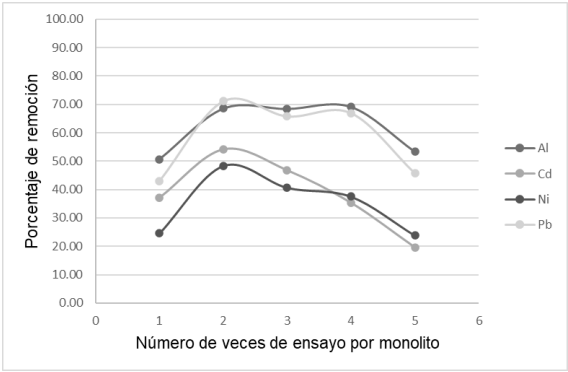
En todos los ensayos las concentraciones de los metales disminuyeron, debido a la adsorción en la superficie del monolito de diatomita. El tiempo de contacto fue de 90 minutos. El porcentaje de remoción de metales se determinó con los datos de la tabla 4.

Tabla 5
Porcentaje de remoción de metales con monolito de diatomita

Soluciones	Porcentaje de remoción			
	Al	Cd	Ni	Pb
SD1	50,70	37,11	24,54	43,07
SD2	68,56	54,18	48,41	71,08
SD3	68,42	46,78	40,66	65,75
SD4	69,11	35,30	37,51	66,88
SD5	53,31	19,57	23,74	45,72

Nota: SD1 a SD5 Soluciones filtradas luego del tratamiento de la solución acuosa con el monolito de diatomita.

Figura 4
Porcentaje de remoción de metales con monolito de diatomita



La remoción de cadmio decrece rápidamente luego del segundo ensayo, reportando 19,57% después de quinto ensayo. Los iones metálicos menos adsorbidos por el monolito de diatomita fueron cadmio y níquel; el aluminio reportó mayor porcentaje de

remoción comparado a los otros metales que se encuentran en la solución, seguido por el plomo.

La sinterización del monolito elaborado con diatomita más materia orgánica originó porosidad, incrementando el área interfacial del sólido con respecto a la solución acuosa, promoviendo la adsorción de los iones metálicos Pb, Al, Cd y Ni. En la figura 6 se observa que el tiempo de saturación del área superficial del monolito es mayor para el aluminio, plomo y níquel comparado al del cadmio que satura con mayor facilidad el área superficial del monolito.

Remoción de metales pesados utilizando pellets

Se utilizaron 4,19 g y 8,37g respectivamente de pellets de arcilla roja, los cuales se colocaron en vasos de precipitado de capacidad de 1000 mL, añadiéndose 300 mL de solución acuosa que contenía los cationes de los metales aluminio, cadmio, níquel y plomo, la mezcla se agitó con un agitador tipo hélice, a 50 rpm durante treinta minutos. Luego se filtró y se tomó una alícuota de 100 mL para su análisis de metales por ICP.

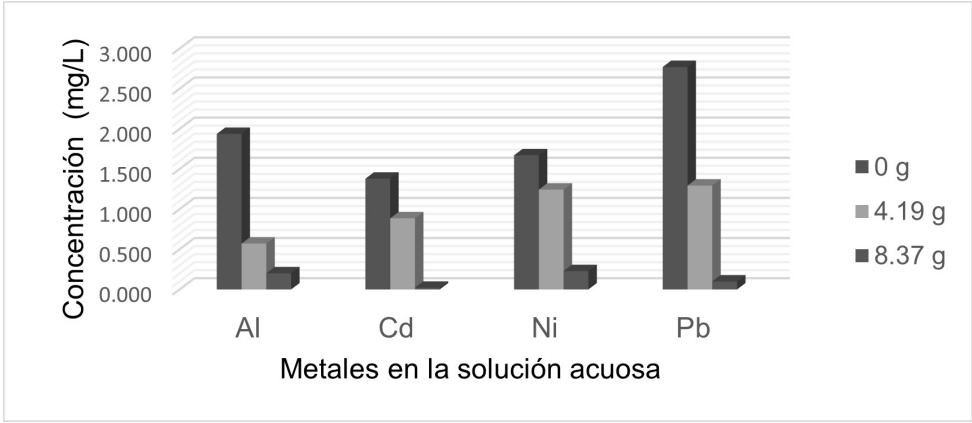
Tabla 6
Concentración de metales antes y después de tratamiento con pellets de arcilla

Soluciones	[Al] (mg/L)		[Cd] (mg/L)		[Ni] (mg/L)		[Pb] (mg/L)	
	$\bar{x}$	$\pm s$	$\bar{x}$	$\pm s$	$\bar{x}$	$\pm s$	$\bar{x}$	$\pm s$
SA ₀	1,937	0,130	1,380	0,101	1,671	0,124	2,770	0,187
SA1	0,571	0,043	0,886	0,069	1,244	0,101	1,294	0,106
SA2	0,201	0,019	0,021	0,001	0,229	0,010	0,099	0,012

Nota: SA₀ solución acuosa; [Al] concentración de aluminio; [Cd] concentración de cadmio; [Ni] concentración de níquel; [Pb] concentración de plomo.

SA1 Solución filtrada luego de tratamiento con 4,19 g de pellets; SA2 Solución filtrada tratada con 8,37 g de pellets de arcilla roja.

Figura 5
Respuesta al tratamiento de la solución acuosa con pellets de arcilla



Nota: La leyenda de la figura indica la masa de pellets en gramos utilizado para tratar 300 mL de solución acuosa de aluminio, cadmio, níquel y plomo. La figura 5 evidenció que ocurre mayor disminución de la concentración de metales al emplear mayor masa de pellets en el tratamiento de la solución acuosa.

En la tabla 6 se observa que la concentración de aluminio en la solución SA2 que utilizó relación masa de pellets por volumen 8,37 g/300 mL es muy

cercana al límite máximo permisible para Al (0,2 mg/L) establecido en el reglamento de la calidad del agua para consumo humano aprobado con D.S. 031-2010-SA, mientras que la concentración del cadmio, níquel y plomo son 7, 11,45 y 9,9 veces más alta.

Con los datos de la tabla 6 se determinó el porcentaje de remoción de los metales Al, Cd, Ni y Pb de la solución al ser tratadas con pellets de arcilla, que se detalla en la tabla 7.

Tabla 7
Porcentaje de remoción de metales con pellets de arcilla

Soluciones	Porcentaje de remoción			
	Al	Cd	Ni	Pb
SA1	70,50	35,76	25,54	53,30
SA2	89,64	98,47	86,31	96,41

Nota: SA1 Solución filtrada luego de tratamiento con 4,19 g de pellets;

SA2 Solución filtrada tratada con 8,37 g de pellets de arcilla roja.

En la tabla 7, se observa que mayor porcentaje de remoción de metales se obtiene con mayor cantidad de pellets de arcilla roja y el orden de remoción es más alto para cadmio seguido por plomo, luego aluminio y níquel.

Remoción de metales pesados con partícula finas obtenidas del monolito de arcilla

Se realizaron dos ensayos utilizando 0,5 gramos de partículas finas por 100 mL de solución acuosa de iones de Al, Cd, Ni y Pb para tiempos de contacto 30 minutos y 15 minutos respectivamente, mediante agitación magnética. Los datos obtenidos en los ensayos se muestran en la tabla 8.

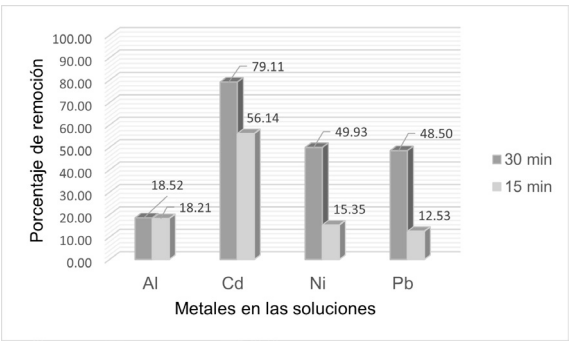
Tabla 8
Resultados de concentración y remoción de metales para dos tiempos de contacto

Nombre de la muestra	[Al] prom mg/L	% rem	[Cd] prom mg/L	% rem	[Ni] prom mg/L	% rem	[Pb] prom mg/L	% rem	Tiempo contac- to
SA ₀	1,890		0,052		0,098		0,506		
S002 -M1A0,5	1,545	18,254	0,015	72,249	0,058	40,259	0,311	38,576	
S003-M1A0,5	1,505	20,370	0,008	83,732	0,043	55,954	0,224	55,687	30 min
S004-M1A0,5	1,570	16,931	0,010	81,340	0,045	53,565	0,247	51,236	
S005-M1B0,5	1,615	14,550	0,023	56,938	0,081	16,718	0,446	11,869	
S006-M1B0,5	1,465	22,487	0,022	57,895	0,081	16,718	0,431	14,837	15 min
S007-M1B0,5	1,558	17,593	0,024	53,589	0,085	12,624	0,451	10,880	

Nota: SA₀ solución acuosa; [Al] concentración de aluminio; [Cd] concentración de cadmio; [Ni] concentración de níquel; [Pb] concentración de plomo; M1A solución filtrada con tiempo de contacto 30 minutos; M1B solución filtrada con tiempo de contacto 15 minutos; 0,5 cantidad del adsorbente.

Figura 6

Porcentaje de remoción promedio para diferentes tiempos de contacto



En la tabla 8 y figura 6 se observa mayor porcentaje de remoción de metales a mayor tiempo de contacto entre el adsorbente y la solución acuosa, excepto el aluminio, donde el porcentaje de remoción es similar para los dos tiempos de contacto. El cadmio se remueve mejor en ambos tiempos de contacto.

Las conclusiones de la investigación son:

Se logró remover metales pesados Al, Cd, Ni y Pb desde una solución acuosa mediante lechos cerámicos, conformados por materiales no metálicos y materia orgánica, activados a 1000 °C.

Se elaboró tres formas de lecho filtrante conformado por diatomita, arcilla roja y cáscara de grano de quinua en un 15,25 % en peso, en base seca,

activados a 1000 °C; el monolito de diatomita con granulometría de 0,63 mm, los pellets y partículas finas con granulometría 0,2 mm; en todos los casos la materia orgánica con tamaño de partícula 1,2 mm.

La relación de la masa del lecho filtrante con el volumen de la solución acuosa, que removió mayor cantidad de metales pesados fue de 27,9 g/L para soluciones acuosas con alto contenido de metales pesados, mientras que para concentraciones menores fue de 5g/L.

El tiempo de contacto con agitación a 200 rpm, entre la solución acuosa y el lecho filtrante constituido por partículas finas de arcilla roja con contenido de materia orgánica, que reportó mejor remoción de metales fue de 30 minutos.

El porcentaje de remoción de Al, Cd, Ni y Pb fue de 18,52%, 79,11 %, 49,93% y 48,50%, respectivamente.

IV. AGRADECIMIENTO

Esta investigación se desarrolló gracias al apoyo de las Universidades Nacionales de San Cristóbal de Huamanga y José María Arguedas de Andahuaylas.

V. REFERENCIAS

- Aranda, J., Mendoza, O., & Gutiérrez, C. (2023). Metales pesados en escamas caudales de *Crocodylus moreletii* en la porción sur de la selva Lacandona, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* (39), 85+94. <https://doi.org/10.20937/RICA.54454>.
- Ahrouch, M., Gatica, J. M., Draoui, K., Bellido-Milla, D., & Vidal, H. (2022b). Clay

- honeycomb monoliths for the simultaneous retention of lead and cadmium in water. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102765. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102765>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Carbotecnia. Metales pesados en el agua. (s/f). Recuperado el 13 de diciembre de 2022, de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/los-metales-pesados-en-el-agua/>
- Covarrubias, S., & Peña, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33 (Biotecnología e ingeniería ambientales), 7-21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Cristóbal, A. y Laura, E. (2021) efecto de la composición y la temperatura de cocción en la tasa de filtración de un filtro cerámico para el tratamiento de agua de consumo humano. Tesis Título Profesional de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional del Centro del Perú. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNCP_3f692c6d-6cef319bde97494c24a91f0e/Details
- DIRESA. (2023). Resultado metales pesados. pdf.
- Fernández, M. & Flores, D. (2019) Remoción de metales pesados de efluentes minero-metalúrgico mediante filtro bioadsorbente con fibras lignocelulósicas. Tesis Licenciatura en Ingeniería Ambiental. Universidad Peruana Unión. Perú. URI: <http://hdl.handle.net/20.500/12840/1884>
- Flores, C., Del Angel, E., Frías, D., & Gómez, A. (2017). Evaluación de parámetros físico-químicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(2), 39-57. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-02>
- Govea, M., & Delgado, D. (2019). Implementación de un filtro mixto para la reducción de metales pesados en aguas residuales utilizando material vegetal (vástago de banano, cascara de cacao) y litológico como medio filtrante. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/41589>
- iagua (2021). Los filtrantes de lecho en la aplicación de agua potable. [Página web]. <https://www.iagua.es/noticias/lama-sistemas-filtrado/filtros-lecho-aplicacion-agua-potable>
- Instituto Nacional de Salud - Boletín Tecnológico N° 3 - Año 2019. (s.f.). Tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico. Lima, Perú
- Lumba Idrogo, N., Orihuela Yapias, S., Porras Pizarro, L., & Cruz Huaranga, M. (2019). Disinfection of water for human consumption through the use of a clay and colloidal silver filter in urban sector of Lurigancho-Chosica. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 5(2), 65-77. <https://doi.org/10.20544/RITCD.V5I2.102>
- Mk Ingeniería (s/f). Lechos filtrantes. [Página web]. <https://mkingeneria.co/lechos-filtrantes/>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria-Villa R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Paredes, A. (2022) Elaboración de material absorbente a partir de residuos calcáreos reciclados con matriz de cerámica para la disminución de turbidez y metales pesados en aguas del río Moche- La Libertad. Tesis Título Profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/31980>
- Peña, J. (2019). Presencia, detección, y remoción de metales pesados en plantas de tratamiento de aguas residuales. Trabajo de Grado. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Disponible en: <https://>

repositorio.unicolmayor.edu.co/handle/
unicolmayor/4761.

- Romaní, P. C. T. F. (2019). Tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico. *Boletín Tecnológico* N° 3. Lima - Perú. <https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/ogitt/cati/3%20BOLET%C3%8DN%20T%C3%89C-NOLOGICAS%20N-3%202019.pdf>
- Salas-Ávila, D., Chaiña, F., Belizario, G., Quispe, E., Huanqui, R., Velarde, E., . . . Hermoza, M. (2021). Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociados con la calidad del agua en el río Suches, Puno, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(6), 145-195. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-04>.
- Soto, M., Rodriguez, L., Olivera, M., Arostequi, V., Colina, C., & Garate, J. (2020). Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06>.
- Vivanco Castillo, C., Soto Benavides, M., Mancilla Escobar, G., Cellone, C. E., Francisco; Córdoba, J., Bilbao, L., Quiroga Choque, E., Tamayo Andrade, S., Vidal Gómez, J., Amaya Domínguez, J., Rodríguez Martínez, G., Peña García, A., Escobar Neira, C., Leo Willems, B., Taboada Hermoza, R., Tomaylla Berrocal, N., Ñope Cueva, M., & Reyes Echavarría, Esther. (2022). Organizaciones comunitarias de servicios de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe. Documento técnico N° 46 UNESCO, 1, 1-14.