

Ingeniería de tratamiento para la filtración y remoción del arsénico en las aguas subterráneas mediante zeolitas naturales

Treatment engineering for the filtration and removal of arsenic in groundwater through natural zeolites

Recibido: mayo 26 de 2022 | Revisado: mayo 28 de 2022 | Aceptado: junio 07 de 2022

ISMAEL KINGLIU QUISPE DÍAZ¹
JOSÉ WALTER CCAMA VILCA¹
ROSMERY ELENA TURPO TURPO¹
JUAN EDUARDO VIGO RIVERA²
RUSSEL ALLIDREN LOZADA VILCA³
GEORGE ARGOTA PÉREZ⁴
SOLON PEDRO LUIS PRADA VEGA⁵

RESUMEN

La presencia de arsénico en las aguas subterráneas es una gran amenaza para la población. El objetivo del estudio fue evaluar un proceso de tratamiento para la filtración y remoción de arsénico de aguas subterráneas mediante zeolitas naturales. Se utilizó zeolitas naturales de la región Puno pertenecientes a la localidad de Atuncolla y Ocuvi, así como, una zeolita comercial. El tratamiento del material filtrante consistió en la limpieza de impurezas, secado natural, trituración, tamizado y caracterización por difracción de rayos X. Se diseñaron tres filtros cilíndricos de volumen de 0,55 m³, altura de 0,70 m de material PVC donde las aguas subterráneas en estudio con arsénico se oxidaron con peróxido de hidrógeno y radiación solar. Se realizó un diseño de bloques completos al azar por triplicado. Se analizó la remoción del arsénico a través de la relación soluto/adsorbente. De acuerdo a la composición química de la zeolita procedente de Atuncolla (83,22 % carbonato de calcio), Ocuvi (54,88 % de aluminosilicato de calcio y sodio) y la comercial (62,87 % silicato de sodio, magnesio y alúmina hidratada), los porcentajes de remoción fueron: 47,56; 23,38 y 5,47%. El modelo de Isoterma Langmuir de la zeolita de Atuncolla tuvo un ajuste de adsorción de arsénico con un R² = 0,92. Los resultados muestran que es factible la remoción de arsénico de aguas subterráneas con zeolitas naturales como medio filtrante que son asequibles y tienen bajo costo.

Palabras clave: adsorción, filtros empacados, isoterma, zeolita natural

ABSTRACT

The presence of arsenic in groundwater represents a major threat to people. The objective of the study was to evaluate a treatment engineering for the filtration and removal of arsenic in groundwater using natural zeolites. Natural zeolites from the Puno region belonging to the towns of Atuncolla and Ocuvi were used, as well as a commercial zeolite. The treatment of the filter material consisted

- 1 Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Peruana Unión (UpeU). Puno, Perú
- 2 Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Peruana Unión (UpeU). Puno, Perú
- 3 Facultad de Ciencias de la Ingeniería Nacional de Juliaca (UNAJ). Puno, Perú
- 4 Centro de Investigaciones Avanzadas y Formación Superior en Educación, Salud y Medio Ambiente "AMTAWI". Puno, Perú
- 5 Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de San Martín de Porres. Lima, Perú

Autor de correspondencia: ismael.qd@upeu.edu.pe

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: revistacampus@usmp.pe.

<https://doi.org/10.24265/campus.2022.v27n33.03>

of cleaned of impurities, dried naturally, crushed, sieved and characterized by X-ray diffraction, then three cylindrical filters were designed with a volume of 0.55 m³, height of 0.70 m of PVC material where the groundwater under study with the presence of arsenic was oxidized with hydrogen peroxide and solar radiation. A randomized complete block design was performed in triplicate. Arsenic removal was analyzed through the solute/adsorbent ratio. According to the chemical composition of the zeolite from Atuncolla (83.22% calcium carbonate), Ocuvi (54.88% calcium and sodium aluminosilicate) and the commercial one (62.87% sodium silicate, magnesium and alumina hydrated), the removal percentages were 47.56; 23.38 and 5.47%. The Langmuir Isotherm model of the Atuncolla zeolite had an arsenic adsorption fit with an $R^2 = 0.92$. The results show that the removal of arsenic from groundwater is feasible, with natural zeolites as filter media that are affordable and have low cost.

Key words: adsorption, isotherm, natural zeolite, packed filters

Introducción

La contaminación de las aguas subterráneas por arsénico (As) puede ser de origen natural o antropogénica (Yadav *et al.*, 2021), y más 2500 millones de personas se encuentran expuestas a concentraciones elevadas de As, a través de la ingesta desde las aguas subterráneas (Shaji *et al.*, 2021). En la región de América del Sur y Asia, alrededor de cuatro millones de personas consumen agua contaminada con arsénico ($>50 \mu\text{g As/L}$) (Bundschuh *et al.*, 2008; Selinus *et al.*, 2013). El As presenta dos formas químicas cuando diluido en agua: estado trivalente (As^{+3}), y estado pentavalente (As^{+5}) (Xu *et al.*, 2002; Velazquez *et al.*, 2019). Diversos estudios de adsorción señalan que el As^{+3} es más tóxico en comparación al As^{+5} (Xu *et al.*, 2002; Zaw, 2002). Pueden causar daños a la salud, enfermedades crónicas de la piel, neurológicas, y varios tipos de cáncer y recientemente se ha establecido que también están relacionados con enfermedades no transmisibles como la diabetes, mellitus y enfermedades cardiovasculares (Rahaman *et al.*, 2021).

En el Perú, se realizó un estudio de aguas superficiales y subterráneas donde se halló que el 86% de las muestras excede el límite máximo permisible que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS) y que es 10 $\mu\text{g/L}$ de As para consumo humano. En la región de Puno, el 96% de las aguas subterráneas para los distritos de Juliaca y Caracoto, las concentraciones del As, exceden el valor recomendado por la OMS para el consumo humano (George *et al.*, 2014; Mamani, 2019). En ese sentido, ante el crecimiento demográfico sin previos estudios de ordenamiento territorial en la ciudad de Juliaca (Puno), existe la necesidad del servicio de agua potable donde se muestra que se consume agua subterránea sin ningún tipo de tratamiento, lo cual trae consigo serios problemas a la salud humana.

Existen distintas tecnologías para la remoción del As^{+3} y As^{+5} donde se incluye la precipitación-coagulación (Bilici & Pala, 2011; Bora *et al.*, 2016), intercambio iónico (Chen *et al.*, 2020), adsorción (Rusmana *et al.*, 2019; Lingamdinne *et al.*, 2020) y la fitorremediación (De Souza *et al.*, 2019).

Uno de los minerales estudiados para la remoción del As es la zeolita, pues muestra capacidad de hidratación e intercambio catiónico, adsorción y síntesis (Huanca *et al.*, 2018; Szerement *et al.*, 2021). Sin embargo, el uso de la zeolita como medio filtrante para la eliminación del As en aguas subterráneas sigue siendo limitado (Li *et al.*, 2011b).

Las zeolitas son aluminosilicatos que están compuestos por una red tridimensional de silicio o aluminio enlazado por un oxígeno $M_2/nO_n \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ donde esta estructura presenta porosidad con propiedades de adsorción y es por ello, que las zeolitas se utilizan en la mitigación de los impactos al medio ambiente (Costafreda, 2015; López & Feijoo, 2019). Así mismo, para la eficiencia de eliminación del As se necesita un pretratamiento con sustancias oxidantes como es el dióxido de manganeso, óxido de hierro y el peróxido de hidrógeno (Dinh *et al.*, 2022). Entre los procesos de oxidación avanzada (POAs), la oxidación catalítica de peróxido de hidrógeno (CWPO) se aplica a la oxidación del arsénico con excelentes resultados (García *et al.*, 2021).

Por lo expuesto, el objetivo del estudio fue evaluar una ingeniería de tratamiento para la filtración y remoción de arsénico en las aguas subterráneas mediante zeolitas naturales.

Método

El estudio se realizó en la urbanización Santa Adriana, ciudad de Juliaca, provincia de San Román (Región de Puno). Se identificaron tres puntos críticos (1- E: 375460, N: 8288423; 2- E: 375493, N: 8288592 y 3- E: 375426,

N: 8288453) de aguas subterráneas con una concentración media de 0,202 mg/L de arsénico (Apaza, 2020).

Se extrajo, dos tipos de zeolitas naturales. Una del Centro Poblado de Llungo (distrito de Atuncolla, provincia de Puno) y la otra de Ocuvi (distrito Ocuvi, provincia de Lampa). Asimismo, se utilizó la zeolita comercial de la empresa ACQUATECNOLOGIA S.A.C. En el caso de las zeolitas naturales las impurezas se separaron mediante secado a temperatura ambiente hasta alcanzar un peso constante. Luego, las zeolitas se trituraron y tamizaron en una fracción de tamaño de partícula de 8-14 mallas (1,4 y 2,4 mm) de acuerdo con Li *et al.*, (2011).

Los análisis de difracción de rayos X (DRX) se realizaron en el laboratorio LABICER de la Facultad de Ciencias en la Universidad Nacional de Ingeniería (Lima). Para determinar la densidad real, aparente y el porcentaje de porosidad se utilizó la metodología propuesta por Huanca *et al.*, (2018).

La densidad real se determinó de acuerdo a la Ecuación 1:

$$\rho_r = \left[\frac{W_3 - W_1}{(W_2 - W_1) - (W_4 - W_3)} \right] * \rho_{agua}$$

Donde, ρ_r = densidad del real, ρ_{Agua} = densidad del agua, y W_1 , W_2 , W_3 , W_4 = peso de matraz limpio y seco, cargados de partículas con agua destilada. La determinación de la densidad aparente se realizó en un recipiente con volumen conocido, a través de una probeta graduada de 100 cc. Previamente, se procedió, a pesar la cantidad de muestra mediante una probeta graduada. Se

utilizó el método de desplazamiento de aire, a través de pequeños golpes hasta que la muestra quede compactada. Finalmente, el volumen final se registró para la determinación de la densidad aparente mediante la Ecuación 2:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V}$$

m = masa de la muestra, y V = volumen resultante de la muestra después del desplazamiento de aire. El porcentaje de porosidad se calculó con los valores

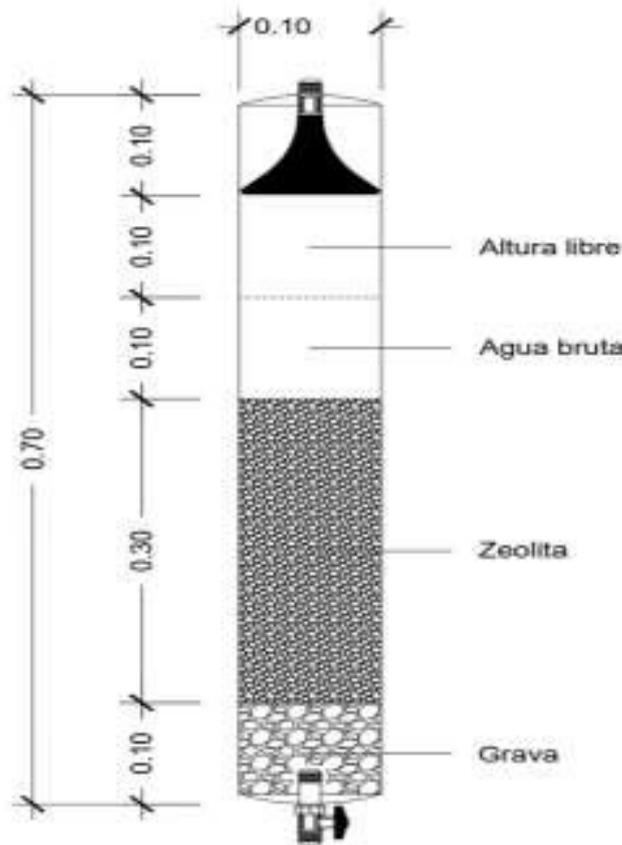
obtenidos de la densidad aparente ρ_{ap} y densidad real ρ_r mediante la Ecuación 3:

$$\%P = [1 - (\rho_{ap} / \rho_r)] * 100$$

P = porcentaje de porosidad, ρ_{ap} = densidad aparente, ρ_r densidad real.

Se construyeron tres filtros de acuerdo a Yogafanny *et al.*, (2018) con dimensiones modificadas en los estratos de columna del filtro, según la Figura 1.

Figura 1
 Configuración de la columna filtrante



La oxidación del arsénico As^{+3} y As^{+5} se realizó mediante la inyección de 5,5 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en 22,0 L de agua subterránea y exposición continua a la luz solar durante ocho horas. La oxidación asistida por radiación

solar UV indicó el potencial del proceso de oxidación-eliminación de As al tratarse las fuentes de aguas subterráneas contaminadas (O' Farrell *et al.*, 2016). Se empaquetaron 1000 g de la zeolita de Atuncolla, Ocuviri y la comercial en cada

filtro de acuerdo un tamaño de malla de 8-14, una altura de 30 cm y se trató con 20 L de agua por filtro, caudal de 33 mL/min, a temperatura de 14°C y pH = 6,5. La toma de muestra se realizó una vez que se filtró el total de agua durante ocho horas.

Los experimentos se realizaron por triplicado, los análisis de las concentraciones de arsénico se realizaron mediante el método de generación con la técnica espectrofotometría de absorción atómica (BHIOS Laboratorio). La capacidad de remoción de las zeolitas se determinó de acuerdo (Leyva *et al.*, 2001), Ecuación 4:

$$(\%) = \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} * 100$$

Donde R = porcentaje de remoción (%), Co = concentración inicial (mg As/L), y f= concentración final (mg As/L). Se utilizó el diseño en bloques completos al azar (DBCA) de tres tratamientos con zeolitas distintas a tres corridas y con tres réplicas. Los datos se transformaron a raíz cuadrada por aquellas frecuencias que no cumplieron los supuestos de la normalidad y homogeneidad de varianza.

El programa estadístico profesional que se utilizó fue el SPSS v.25. Los resultados se consideraron significativos cuando $p < 0,05$. De acuerdo a los resultados obtenidos se evaluó la zeolita con mayor rendimiento de adsorción a diferentes cantidades 100, 200, 300, 400 y 500 g de zeolita malla 8-14, con 10L de agua por prueba. La determinación del proceso de equilibrio para la adsorción de arsénico por la zeolita, los resultados fueron ajustados a los modelos Langmuir y Freundlich. La elección del modelo se realizó en base a los criterios de coeficiente de correlación, linealización

y ajuste con los datos experimentales. La isoterma Langmuir sigmoidea, presenta la convección cerca al origen y punto de inflexión, generando la curva en forma sigmoidea. Esta condición favorece la adsorción de las moléculas en la superficie debido al fuerte enlace con las moléculas. Siendo así, se utilizó el modelo Langmuir dado por la Ecuación (5) y (6) para describir la isoterma obtenida y linealizada (Englert & Rubio, 2005):

$$q = \frac{q_{max} K C}{1 + K C}$$

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{K \cdot q_{max}} + \frac{1}{q_{max}} * C$$

Aquí q = capacidad de adsorción en equilibrio (cantidad de adsorbato/adsorbente), qmax = capacidad de adsorción en monocapa (cantidad de adsorbato/adsorbente), C=concentración del adsorbato en equilibrio, y K = constante de equilibrio de adsorción.

Resultados

Las zeolitas de Atuncolla, Ocuvi y Comercial presentaron los valores siguientes: densidad aparente = 0,94; 1,71 y 1,24 g/cc, densidad real = 2,60; 3,62 y 1,83 g/cc, y porosidad = 0,64; 0,53 y 0,32 %. La composición mineralógica donde el adsorbente de Atuncolla presentó un pico intenso de carbonato de calcio (CaCO₃) o calcita (83,22%) (Tabla 1). En el adsorbente de Ocuvi y comercial se observó picos característicos de aluminosilicatos (54,88 y 62,87) %. Asimismo, el segundo componente con mayor predominio son los silicatos e hidróxidos de silicatos con un contenido de (21,07 y 18,77%). En los tres adsorbentes el óxido de silicio ocupó el 9,01; 10,71 y 15,54%.

Tabla 1

Análisis de composición química (%) de las fases cristalinas /método analítico por difracción de rayos X

Composición Química	Fórmula	Zeolita de Atuncolla	Zeolita de Acuviri	Zeolita comercial
Carbonato de calcio	CaCO ₃	83,22	--	--
Óxido de silicio	SiO ₂	9,01	10,71	15,54
Hidruro de magnesio	MgH ₂	1,58	--	--
Sulfato de ácido	K ₃ H(SO ₄) ₂	2,18	--	--
Aluminosilicatos de potasio y sodio	K _{0.86} Na _{0.14} AlSi ₃ O ₃	4,01	--	--
Aluminosilicatos de calcio y sodio	(Ca _{2.133} Na _{1.867})(Si _{10.003} Al _{5.987})O ₃₂	--	54,88	--
Hidróxido de silicatos de Aluminio	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	--	21,07	--
Aluminosilicatos de potasio	K(Si ₃ Al)O ₈	--	13,34	--
Silicato de sodio, magnesio y alumina hidratada	Na _{2.6} Mg _{0.36} Al _{3.32} Si _{14.68} O ₃₆ (H ₂ O) _{10.32}	--	--	62,87
Silicato de potasio y aluminio	KAlSi ₃ O ₈	--	--	18,77
Silicato de sodio hidratado	Na _{18.85} Si ₇₂ O ₁₄₄ (H ₂ O) _{50.6}	--	--	2,81

Como se aprecia, el porcentaje de remoción del As fue mayor en las zeolitas naturales en comparación con la zeolita natural (Atuncolla: 0,038; Ocuvi: 0,070 y comercial: 0,007 mg/L). La concentración media de arsénico total en el agua fue de 0,1533 mg/L y la tasa de

eliminación del As fue de 5; 23 y 48%. El porcentaje de remoción más alto correspondió al adsorbente proveniente de Atuncolla lo cual indicó que la adsorción de As en la superficie de la calcita fue dominante (Tabla 2).

Tabla 2

Porcentaje de remoción y rendimiento de los absorbentes de zeolitas (%)

Tratamientos (Tipos de Zeolita)	Muestras H ₂ O	As	As	As	As	Media As	Remoción de As	Remoción As Total	
		(inicial)	(final) R1	(final) R2	(final) R3				
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(%)	(%)
Atuncolla	P1	0,126	0,060	0,071	0,065	0,065	0,061	48,15	
	P2	0,198	0,123	0,120	0,122	0,122	0,077	38,64	47,56
	P3	0,136	0,062	0,058	0,060	0,060	0,076	55,88	
Ocuvi	P1	0,126	0,119	0,092	0,111	0,107	0,019	14,82	
	P2	0,198	0,170	0,138	0,105	0,138	0,061	30,56	23,38
	P3	0,136	0,094	0,130	0,083	0,102	0,034	24,75	
Comercial	P1	0,126	0,117	0,114	0,118	0,116	0,010	7,67	
	P2	0,198	0,196	0,195	0,197	0,196	0,002	1,01	5,47
	P3	0,136	0,129	0,122	0,126	0,126	0,011	7,72	

Existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la remoción del As (Tabla 3) entre los tratamientos con

las zeolitas: 0,385; 0,348 y 0,309 (Tabla 4).

Tabla 3

Análisis de la varianza / tratamiento con zeolitas / remoción del As

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	Gl	Media cuadrática	Razón-F	Valor-p
Bloque	0,050	2	0,025	15,194	0,000
Tratamiento	0,026	2	0,013	7,858	0,003
Error	0,036	22	0,002		

Tabla 4

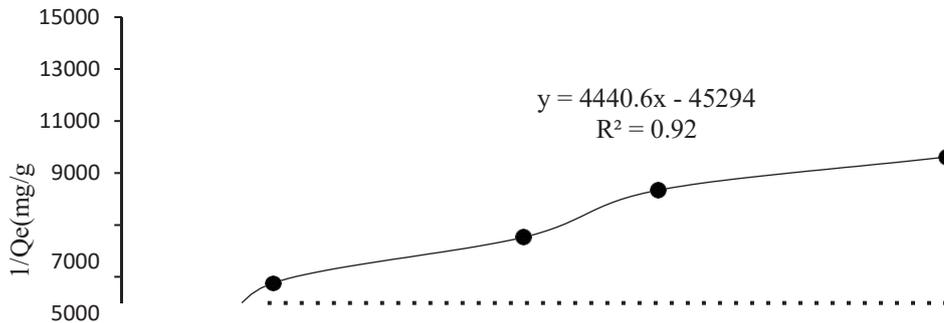
Prueba de contraste múltiple de Tukey y Duncan / remoción del As

	Tratamiento (Zeolitas)	N	Subconjunto	
			1	2
DHS de Tukey (a,b)	Perhua perhuayani - Atuncolla	9	0,309 b	
	Ocuviri	9	0,348 b	0,348 a
	Comercial	9		0,385 a
	Significación		0,132	0,149
	Perhua perhuayani - Atuncolla	9	0,309 b	
Duncan (a,b)	Ocuviri	9	0,348 b	0,348 a
	Comercial	9		0,385 a
	Significación		0,056	0,064

La isoterma de adsorción relacionada con el equilibrio del proceso de remoción del As sobre superficie de la zeolita se ajustó a los modelos Langmuir y Freundlich donde se encontró correlación con la isoterma Langmuir $R^2 = 0,92$. Se muestra la capacidad de adsorción

en la monocapa 0,022 mg/g As para la zeolita de Atuncolla que significó ser la más efectiva, además de la constante de equilibrio 10,20 mg/L. Asimismo, se atribuye al modelo Langmuir sigmoidal por la inflexión de los resultados en la gráfica (Figura 2).

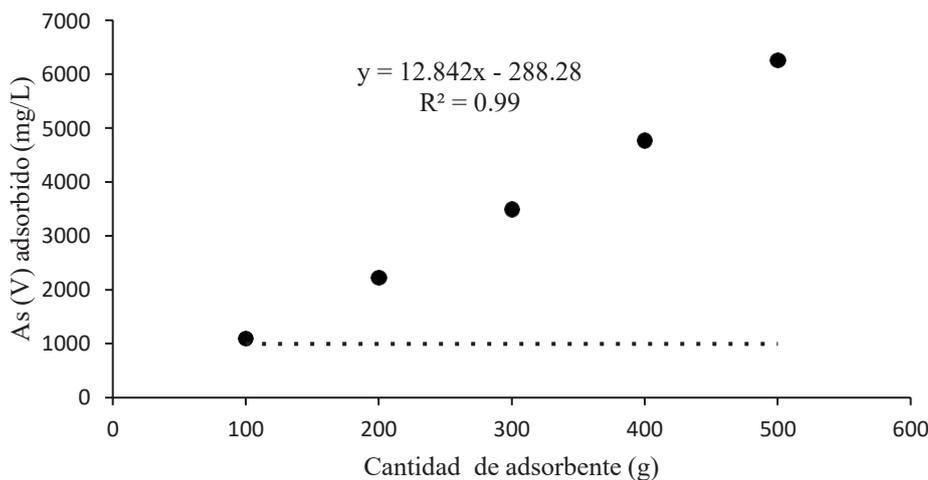
Figura 1
Isotherma de adsorción de la zeolita de Atuncolla



Se muestra el coeficiente de correlación = 0,99 en la cinética de adsorción del As y que se ajustó al modelo de pseudo

segundo orden con un valor de la constante cinética de 12,842 (Figura 3).

Figura 2
Cinética de adsorción de la zeolita de Atuncolla



Discusión

Las zeolitas se utilizan en el tratamiento de impurezas de medios acuosos bajo su condición de ser natural o modificada con otros elementos químicos y con ello, se mejora la adsorción de iones (Gutiérrez *et al.*, 2006; Montiel *et al.*, 2013; Rubio *et al.*, 2021). Asimismo, Yuna (2016), señala que el rendimiento de adsorción depende de la estructura, relación Si/Al y el tamaño de partículas de la zeolita.

De acuerdo a los resultados en este estudio, el alto contenido de calcita indicó ser el factor determinante en la movilidad del As tal como lo indica Sørensen *et al.*, 2008, pues se evidenció que el arsenito no se adsorbe de manera significativa en la calcita (CaCO₃) y la movilidad del arsénico en un acuífero subterráneo, tampoco se afecta. Sin embargo, en condiciones de oxidación, el As presente como arseniato, se adsorben en la calcita.

Por otro lado Winkel *et al.*, (2013), analizaron dos tipos diferentes de travertinos (rocas sedimentarias formadas por depósitos de carbonato de calcio) y señalaron que el arsénico en el estado de oxidación pentavalente está asociado a la matriz de la calcita, lo que sugiere que este componente actúa como un inmovilizador sustancial del arsénico presente en aguas subterráneas.

Respecto a los componentes de los adsorbentes zeolíticos de Ocuvi y comercial, muestran un alto contenido de aluminosilicatos dentro de los cuales se encontraron cationes como sodio, potasio y el calcio y en conjunto con la sílice (SiO₂) son ampliamente utilizados para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico. Sin embargo, la principal desventaja bajo una aplicación del adsorbente crudo o sin modificación, es la baja capacidad de eliminación de arsénico (Camacho *et al.*, 2011), y se evidenció en este estudio.

Abdolahneja *et al.*, (2017), evaluaron tres filtros y entre ellos existió un tratamiento con zeolita modificada donde la capacidad de remoción del As varió de acuerdo a la concentración inicial 0,073 mg/L y 0,33 mg/L donde la tasa de remoción fue de 93,1% y 15%. Otro estudio que se realizó con filtros empacados con zeolita natural donde se evaluó cuatro tratamientos basados en diferentes tamaños: 1:70, 2:30, 3:500 mm y 4 combinados (colocando las partículas de mayor tamaño en la parte inferior). Los tratamientos 3 y 4 indicaron que la remoción fue del 48 y 42% de una concentración inicial 0,189 de As (Rubio *et al.*, 2021). Ambos estudios refieren que la concentración inicial y el tamaño de partícula son determinantes en la remoción del arsénico.

En ese contexto, se observó, previamente una cinética rápida para adsorción de As donde Alexandratos *et al.*, (2007) comunica que desde el 70 al 80% de la adsorción del As tiene lugar en la primera hora de interacción, seguida de una tasa de captación decreciente y la captación lenta continua durante un proceso prolongado. Sørensen *et al.*, (2008), refieren que una adsorción muy rápida del As en la calcita, se alcanza a los 20 min y su porcentaje es del 76%. Sin embargo, en contraste con Alexandratos *et al.*, (2007), se señala que el equilibrio se mantuvo durante todo el tiempo del experimento (>25h) y lo más probable es que la adsorción y equilibrio del As sobre el material adsorbente se produjo en menos de 24 h. Para asegurar que el equilibrio de adsorción, en este estudio el tiempo de adsorción para todos los experimentos fue de ocho horas.

La Figura 3 muestra el pico más alto correspondiente a una cantidad de 500 g, y con 0,052 mg/L de As adsorbido lo que representó el 39 % del As inicial. Prabhu *et al.*, (2003) evidenciaron que la zeolita clinoptilolita solo pudo alcanzar una eliminación del 40-60%. Por otro lado, Onyango *et al.*, (2003), indicaron que la zeolita clinoptilolita removió más del 75% del As a una concentración inicial de 0,2mg/L y una relación líquido-sólido de 5. Además Sørensen *et al.*, (2008), investigaron el comportamiento del arseniato en función de la relación sólido- solución donde se añadió distintas cantidades de calcita a una concentración inicial fija de As.

En este estudio, la concentración de As disminuyó a medida que aumentó el área superficial de la calcita, lo cual indicó que la adsorción de As se relaciona con un proceso superficial. De acuerdo

a los resultados obtenidos, y a la gráfica tendencia, el porcentaje de adsorción aumentaría de forma progresiva, según se añade una mayor cantidad de adsorbente. Sin embargo, debido a la limitación de experimentos, no se logró estimar el punto más alto de adsorción para la concentración inicial de As en el medio acuoso. La isoterma que se obtuvo mediante el modelo Langmuir mostró un coeficiente de correlación de los datos experimentales ($R^2 = 0,92$). Asimismo, Ordoño & Mendoza (2020), indican que la isoterma Langmuir se ajusta para la adsorción de As^{+5} con un $R^2 = 0,96$.

Esta investigación se realizó con el mismo tipo de zeolita donde el modelo de equilibrio arrojó, similar resultado a diferencia del tratamiento con la zeolita natural y el sistema continuo de filtro. Al existir en la superficie de las zeolitas poros, cavidades y canales que se conocen como centros activos, éstos tienen campos de fuerza que atraen a los átomos o moléculas que se encuentran en el soluto mediante electrones entre el adsorbato y la superficie del adsorbente y es donde se forma la monocapa (Günay *et al.*, 2007).

Conclusiones

La remoción de arsénico del agua subterránea mediante las zeolitas naturales como filtrantes fueron: 47,56 (Atuncolla); 23,38 (Ocuvi) y 5,47% (comercial). El porcentaje de remoción está en función a la cantidad de adsorbente que se añadió y en este estudio la tasa cinética mayor fue del 39% y correspondió a la zeolita de Atuncolla.

El modelo de Langmuir presentó un coeficiente de correlación $R^2 = 0,92$. Ambos resultados evidenciaron que las concentraciones iniciales de As y la relación sólido/líquido son determinantes en la remoción de arsénico.

El análisis de difracción de rayos X mostró que los componentes de las zeolitas presentaron contenido elevado de aluminosilicatos y carbonato de calcio donde este último componente químico ofreció, un mayor porcentaje de remoción de As para todos los tratamientos con la zeolita de Atuncolla.

Referencias

- Abdolahneja, A., Jafari, N., Ebrahimi, A., Mohammadi, A. & Farrokhzadeh, H. (2017). Removal of Arsenic and Coliform Bacteria by Modified Sand Filter With Slag and Zeolite from Drinking Water. *Health Scope, In Press* 6(3), e15170. <https://doi.org/10.5812/jhealthscope.15170>
- Alexandratos, V.G., Elzinga, E.J. & Reeder, R.J. (2007). Arsenate uptake by calcite: Macroscopic and spectroscopic characterization of adsorption and incorporation mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*; 71(17), 4172–4187. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.06.055>
- Apaza, Q.T.L. (2020). Evaluación de arsénico, dureza, coliformes termotolerantes y E. coli en aguas subterráneas, de las urbanizaciones de Santa Adriana y Niño San Salvador, del distrito de Juliaca, Puno 2019 [Tesis de

- pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio de la Universidad Peruana Unión. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3526>
- Bilici, B.M. & Pala, A. (2011). Removal of arsenic from drinking water using modified natural zeolite. *Desalination*; 281(1), 396–403. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.015>
- Bora, A.J., Gogoi, S., Baruah, G. & Dutta, R.K. (2016). Utilization of co-existing iron in arsenic removal from groundwater by oxidation-coagulation at optimized pH. *Journal of Environmental Chemical Engineering*; 4(3), 2683–2691. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.05.012>
- Bundschuh, J., Armienta, M., Birkle, P., Bhattacharya, P. & Mukherjee, A. (2008). *Natural Arsenic in Groundwater of Latin America - Occurrence, health impact and remediation*. https://www.researchgate.net/publication/294215948_Arsenic_removal_Ridding_drinking_water_of_contamination
- Chen, A.S.C., Wang, L., Sorg, T.J. & Lytle, D.A. (2020). Removing arsenic and co-occurring contaminants from drinking water by full-scale ion exchange and point-of-use/point-of-entry reverse osmosis systems. *Water Research*; 172, 115455. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115455>
- Costafreda, J.L. (2015). Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. *Tecnología Química*; 35(1), 110–124. https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852015000100010&lng=es&tlng=es
- De Souza, T.D., Borges, A.C., Braga, A.F., Veloso, R. W. & Teixeira de Matos, A. (2019). Phytoremediation of arsenic-contaminated water by Lemna Valdiviana: An optimization study. *Chemosphere*, 234, 402–408. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.004>
- Dinh, V.C., Po, C.W., Liou, Y.H.S. & Hung hou, C. (2022). An integrated active biochar filter and capacitive deionization system for high-performance removal of arsenic from groundwater. *Journal of Hazardous Materials*; 423, 127084. <https://doi.org/10.1016/j.JHAZMAT.2021.127084>
- Englert, A.H. & Rubio, J. (2005). Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*; 75(1–2), 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.01.003>
- Garcia, A.L., Sarabia, A., Zazo, J.A. & Casas, J.A. (2021). UV-assisted Catalytic Wet Peroxide Oxidation and adsorption as efficient process for arsenic removal in groundwater. *Catalysis Today*, 361, 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.03.054>
- George, C.M., Sima, L., Jahuir, A.M.H., Mihalic, J., Cabrera,

- L.Z., Danz, D., Checkley, W. & Gilman, R.H. (2014). Exposition à l'arsenic dans l'eau potable: Une menace méconnue pour la santé au Pérou. *Bulletin of the World Health Organization*; 92(8), 565–572. <https://doi.org/10.2471/BLT.13.128496>
- Günay, A., Arslankaya, E. & Tosun, I. (2007). Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*; 146(1–2), 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.034>
- Gutiérrez, O., Scull, I. & Oramas, A. (2006). Zeolita natural para la reducción de la dureza del agua. Nota técnica. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*; 40(2), 191–192. <https://doi.org/www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017714008>
- Huanca, P.K., Paredes, B., Rodríguez, M. & Gonzales, D.P. (2018). Caracterización y aplicación de una zeolita natural de Ocuvi (Perú) para la remoción de Pb (II) en solución a nivel laboratorio. *Avances en Ciencias e Ingeniería*; 9(3), 1–12. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6597220>
- Leyva, R.R., Sánchez, C.M.A., Hernández, S.M.V. & Guerrero, C.R.M. (2001). Remoción de metales pesados de solución acuosa por medio de clinoptilolitas naturales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*; 17(3), 129–136). <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/25522>
- Li, Z., Jiang, W.T., Jean, J. S., Hong, H., Liao, L. & Lv, G. (2011a). Combination of hydrous iron oxide precipitation with zeolite filtration to remove arsenic from contaminated water. *Desalination*; 280(1–3), 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.009>
- Lingamdinne, L.P., Choi, J.S., Choi, Y.L., Chang, Y.Y., Yang, J.K., Karri, R.R. & Koduru, J.
- R. (2020). Process modeling and optimization of an iron oxide immobilized graphene oxide gadolinium nanocomposite for arsenic adsorption. *Journal of Molecular Liquids*, 299, 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112261>
- López, F., & Feijoo, C. (2019). Caracterización físico-química y mineralógica de zeolitas naturales comerciales del Ecuador. *GEO Latitud*; 2(2), 22–28. <https://geolatitud.geoinvestigacion.gob.ec/ojs/ojs/index.php/GeoLatitud/article/view/30/73>
- Mamani, W. (2019). Contaminación de las aguas subterráneas por arsénico (As) el Distrito de Juliaca - Perú. *Ñawparisun*, 1(4), 31-36. <https://repositorio.unaj.edu.pe:8080/handle/UNAJ/59>
- Montiel, A., Balcázar, M., Fernández, M. V., Morales, J. C. & Varela, J. (2013). Eliminación de flúor en agua potable utilizando zeolita natural (clinoptilolita). *Biotecnia*;

- 15(2), 10– 14. <https://doi.org/10.18633/bt.v15i2.143>
- O'Farrell, C., Mahon, J. Mac & Gill, L.W. (2016). Development of a continuous flow solar oxidation process for the removal of arsenic for sustainable rural water supply. *Journal of Environmental Chemical Engineering*; 4(1), 1181–1190. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.01.027>
- Onyango, M.S., Matsuda, H. & Ogada, T. (2003). Sorption kinetics of arsenic onto iron- conditioned zeolite. *Journal of Chemical Engineering of Japan*; 36(4), 477–485. <https://doi.org/10.1252/jcej.36.477>
- Ordoño, J. & Mendoza, A. (2020). *Remoción de cobre Cu (II) y arsénico As (V) de aguas residuales de mina, por adsorción con zeolita natural en proceso batch*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Química]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional del Altiplano. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/14311>
- Prabhu, V., Udupa, P. & Chakraborty, M. (2003). Arsenic removal: Ridding drinking water of contamination. *Chemical Engineering World*, 38(4), 53–57.
- Rahaman, M.S., Rahman, M.M., Mise, N., Sikder, M.T., Ichihara, G., Uddin, M.K., Kurasaki, M. & Ichihara, S. (2021). Environmental arsenic exposure and its contribution to human diseases, toxicity mechanism and management. *Environmental Pollution*; 289, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117940>
- Rubio, H., Ochoa, J., De Lourdes, M., Barrientos, E., De La Mora, C. & Rocha, B. (2021). Eliminating heavy metals from water with filters packed with natural zeolite of varying sizes. *Tecnología y Ciencias del Agua*; 12(6), 282–327. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-07>
- Rusmana, Y.F., Notodarmojo, S. & Helmy, Q. (2019). Arsenic removal in groundwater by integrated ozonation and adsorption by activated carbon and zeolite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 536(1), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012073>
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R., Lindh, U. & Smedley, P. (2013). *Essentials of Medical Geology*. (Revised Edition). Olle Selinus. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5>
- Shaji, E., Santosh, M., Sarath, K.V., Prakash, P., Deepchand, V. & Divya, B.V. (2021). Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula. *Geoscience Frontiers*; 12(3), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.015>
- Sø, H.U., Postma, D., Jakobsen, R. & Larsen, F. (2008). Sorption and desorption of arsenate and arsenite on calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*; 72(24), 5871–

5884. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.09.023>
- Szerement, J., Szatanik, K.A., Jarosz, R., Bajda, T. & Mierzwa, H.M. (2021). Contemporary applications of natural and synthetic zeolites from fly ash in agriculture and environmental protection. *Journal of Cleaner Production*; 311, 1–19. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127461>
- Velazquez, P.G.C., Solache, R.M., Olguin, M. T. & Fall, C. (2019). As(V) sorption by different natural zeolite frameworks modified with Fe, Zr and FeZr. *Microporous and Mesoporous Materials*; 273, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.07.003>
- Winkel, L.H.E., Casentini, B., Bardelli, F., Voegelin, A., Nikolaidis, N.P. & Charlet, L. (2013). Speciation of arsenic in Greek travertines: Coprecipitation of arsenate with calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*; 106, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.049>
- Xu, W., Wang, Z., Jia, Z., Huang, Y., Yuan, L. & Wang, J. (2002). Use of several plant materials and chemicals to inhibit soil urease activity and increase nitrogen recovery rate of urea by plant. *Pedosphere*, 12(3), 275–282. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00020-1)
- Yadav, M.K., Saidulu, D., Gupta, A.K., Ghosal, P.S. & Mukherjee, A. (2021). Status and management of arsenic pollution in groundwater: A comprehensive appraisal of recent global scenario, human health impacts, sustainable field-scale treatment technologies. In *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105203>
- Yogafanny, E., Yohan, K.O. & Sungkowo, A. (2018). Treatment of brackish groundwater by zeolite filtration in Sumur Tua Wonocolo, Kedewan, Bojonegoro, East Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 212(1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/212/1/012014>
- Yuna, Z. (2016). Review of the natural, modified, and synthetic zeolites for heavy metals removal from wastewater. *Environmental Engineering Science*, 33(7), 443–454. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0166>
- Zaw M.T. & Emett, M. (2002). Arsenic removal from water using advanced oxidation processes. *Toxicology Letters*; 133(1), 113–118. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(02\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(02)00081-4)