

Artículo original

**Matriz cerámica basada en arcilla roja
funcionalizada con Fe_2O_3 para la adsorción
de arsénico**

**Ceramic Matrix Based on Red Clay Functionalized with
 Fe_2O_3 for Arsenic Adsorption**

ABRAHÁN FERNANDO TREJO ESPINOZA¹

 <https://orcid.org/0000-0002-2314-7350>

PERCY FERMÍN VELÁSQUEZ CCOSI²

 <https://orcid.org/0000-0001-7006-7583>

JUAN CARLOS PONCE RAMÍREZ³

 <https://orcid.org/0000-0002-3723-0550>

Recibido: 19/09/2025

Aceptado: 14/10/2025

Publicado: 31/10/2025

¹Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

²Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

³Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga,
Ayacucho, Perú

E-mail: ¹abraham.trejo@unsch.edu.pe, ²percy.velasquez@unsch.edu.pe,
³juan.ponce@unsch.edu.pe



Esta obra está bajo licencia internacional
Creative Commons Reconocimiento 4.0



Facultad de Ingeniería
Publicación Oficial

Resumen

La contaminación del agua por arsénico representa un grave problema de salud pública a nivel mundial, especialmente en regiones donde las fuentes naturales o antropogénicas contribuyen a concentraciones superiores al límite máximo permisible de 0,01 mg/L establecido por la Organización Mundial de la Salud. En este estudio se evaluó la eficacia de una matriz cerámica elaborado a base de arcilla roja impregnada con óxido férrico (Fe_2O_3) para la remoción de arsénico y la mejora de la calidad del agua. Las muestras se recolectaron del río Apacheta y fueron tratadas mediante un sistema de flujo continuo utilizando matrices calcinados a 800 °C. Se determinaron las concentraciones de arsénico mediante espectrofotometría y se evaluaron parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento. Los resultados mostraron una reducción de la concentración inicial de 0,17 mg/L a 0,0053 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 94,5 %, además de mejoras en turbidez, conductividad eléctrica y sólidos disueltos. El análisis estadístico evidenció diferencias significativas ($p < 0,05$) en todos los parámetros evaluados. En conclusión, la matriz cerámica propuesto constituye una alternativa tecnológica viable y sostenible para la purificación de aguas naturales contaminadas con arsénico, aplicable en diversas regiones afectadas por este contaminante.

Palabras clave: adsorción; calidad del agua; remoción de arsénico.

Abstract

Arsenic contamination in water represents a serious public health issue worldwide, particularly in regions where natural or anthropogenic sources contribute to concentrations exceeding the maximum permissible limit of 0.01 mg/L established by the World Health Organization. This study evaluated the efficiency of a ceramic matrix made from red clay impregnated with ferric oxide (Fe_2O_3) for arsenic removal and water quality improvement. Water samples were collected from the Apacheta River and treated using a continuous-flow system with supports calcined at 800 °C. Arsenic concentrations were determined by spectrophotometry, and physicochemical parameters were analyzed before and after treatment. The results showed a reduction in arsenic concentration from 0.17 mg/L to 0.0053 mg/L, achieving a removal efficiency of 94.5 %, along with improvements in turbidity, electrical conductivity, and dissolved solids. Statistical analysis revealed significant differences ($p < 0.05$) in all evaluated parameters. In conclusion, the proposed ceramic matrix represents a viable and sustainable technological alternative for the purification of natural waters contaminated with arsenic, applicable in various regions affected by this pollutant.

Keywords: adsorption; water quality; arsenic removal.



1. Introducción

El arsénico (As) es un metaloide tóxico de alta persistencia ambiental que se encuentra de forma natural en rocas, suelos y aguas subterráneas, así como por aportes antropogénicos derivados de la minería, el uso de pesticidas y la combustión de combustibles fósiles. En el ambiente acuático, el arsénico se presenta principalmente en dos estados de oxidación: arsenito [As(III)] y arseniato [As(V)], cuya distribución y comportamiento dependen estrechamente del pH, el potencial de óxido-reducción, la presencia de minerales metálicos y las condiciones geoquímicas del medio. El arseniato (As^{5+}) predomina en ambientes oxidados, donde forma especies aniónicas como H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} , mientras que el arsenito (As^{3+}) es estable en condiciones reductoras, principalmente como H_3AsO_3 , una especie neutra con mayor movilidad y toxicidad (López-Muñoz et al., 2017; Roghani et al., 2016). Su presencia en el agua destinada al consumo humano constituye un grave problema de salud pública a escala global, debido a su capacidad para bioacumularse en los tejidos humanos y desencadenar una amplia gama de efectos tóxicos tanto agudos como crónicos. La exposición prolongada al arsénico, incluso a concentraciones relativamente bajas, se ha asociado con la aparición de distintos tipos de cáncer, particularmente de piel, pulmón, hígado, vejiga y riñón, lo que llevó a la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) a clasificarlo como un carcinógeno humano del Grupo 1 (Li et al., 2016). Además de sus efectos cancerígenos, la exposición crónica al arsénico genera trastornos cardiovasculares, neurológicos, metabólicos y reproductivos (Aremu et al., 2019; El-Moselhy et al., 2017; Hong et al., 2014; Lamm y Kruse, 2005; Muhammad et al., 2010).

La presencia de arsénico en formas tóxicas se distribuye ampliamente en distintas regiones del mundo, afectando con mayor intensidad a países del sur de Asia y del África occidental. Los niveles muy altos y de moderado a alto se registran principalmente en India, Bangladés, Pakistán, China, Ghana, Guinea, Liberia y Sierra Leona. En Asia, además de los países mencionados, se han reportado concentraciones relevantes en Taiwán, Vietnam, Japón y Myanmar. En América, los países Estados Unidos, Guatemala, México, Argentina, Chile y Canadá presentan niveles moderados o ligeramente afectados. En Europa, aunque las afectaciones son menores, se registran casos en Portugal, España, Italia, Austria, Ucrania, Hungría y Polonia. En el continente africano, además de las regiones más críticas del oeste, se identifican zonas moderadamente afectadas en Angola, Botsuana y Namibia, mientras que en Oceanía, países como Nueva Zelanda también presentan registros de contaminación, lo que refleja la persistencia del problema en diversas cuencas hidrogeológicas (Aktar et al., 2023; Muhammad et al., 2010).

En el caso de Perú, Chávez (2018) señala que la calidad del agua potable está estrechamente relacionada con la pureza de las fuentes, muchas de las cuales están en contacto con metales de origen natural y antropogénico, lo que resalta la necesidad de una supervisión constante orientada al desarrollo sostenible. Asimismo, Chávez (2016) reporta que los monitoreos realizados por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) evidencian la presencia de arsénico en concentraciones superiores a los valores máximos permitidos en regiones del sur como Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna, donde se han registrado valores mayores a 200 $\mu\text{g/L}$, superando ampliamente el límite establecido de 10 $\mu\text{g/L}$. En concordancia, Apaza (2014) destaca que la problemática del arsénico en la zona sur del Perú es

particularmente crítica, afectando la salud de las poblaciones rurales que dependen directamente de ríos y manantiales locales.

Ante la creciente preocupación por la presencia de arsénico en el agua, se han implementado diversos métodos de tratamiento clasificados en procesos físico-químicos, biológicos y adsorptivos, cuya eficacia depende de la composición del agua. Entre los métodos convencionales, la coagulación-floculación y la filtración son los más utilizados, ya que permiten la coprecipitación y adsorción del As(V) mediante sales metálicas de hierro o aluminio. No obstante, su eficiencia disminuye frente al As(III), lo que requiere una etapa previa de oxidación con agentes como cloro o permanganato, además de generar lodos con alto contenido tóxico. Tecnologías como la ósmosis inversa y la nanofiltración alcanzan eficiencias mayores al 95 %, pero implican altos costos operativos, mientras que el intercambio iónico es selectivo para As(V) aunque sensible a iones competidores (Hao et al., 2018; Nicomel et al., 2015).

Frente a estas limitaciones, la adsorción se presenta como una alternativa sostenible por su bajo costo, simplicidad operativa y eficiencia en la remoción de arsénico. Los óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso son los adsorbentes más eficaces, especialmente cuando se inmovilizan sobre matrices naturales como arcillas o biochar, lo que mejora su estabilidad y capacidad de regeneración (Rehman et al., 2022). En particular, las arcillas rojas modificadas con Fe_2O_3 han demostrado eficiencias superiores al 80 %, posicionándose como una opción viable para el tratamiento de aguas contaminadas en zonas rurales del sur del Perú (Palomino-Malpartida et al., 2024). En este contexto, el objetivo del estudio fue evaluar la eficacia de una matriz cerámica elaborado a base de arcilla roja impregnada con óxido férrico (Fe_2O_3), para la remoción de arsénico y la mejora de la calidad fisicoquímica del agua.

2. Metodología

2.1. Caracterización y acondicionamiento de las muestras de agua

Las muestras de agua utilizadas en esta investigación se recolectaron del río Apacheta, ubicado en el distrito de Vinchos, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho (Perú), específicamente en el punto identificado como RAPC-05 (Ccenhuacucho), a una altitud de 3452 m.s.n.m., conforme a la localización georreferenciada. Este sector ha sido identificado como una zona crítica de contaminación natural por arsénico, debido a la presencia de formaciones geológicas con alto contenido de sulfuros metálicos.

El levantamiento de las muestras se realizó durante la temporada seca entre cinco fechas diferentes (meses de abril y agosto), siguiendo los lineamientos del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional de Agua (ANA, 2016). Esta estrategia permitió evaluar la variabilidad temporal del contenido de arsénico y garantizar la representatividad de las muestras en distintas condiciones hidrológicas, con el fin de minimizar la influencia de escorrentías y asegurar la representatividad de los niveles de contaminación. Además, se tomaron alícuotas de diferentes profundidades. En cada jornada, se tomaron aproximadamente 10 L de agua en recipientes de polietileno de alta densidad (PEAD) previamente lavados y enjuagados, minimizando el riesgo de contaminación externa. Las muestras fueron obtenidas en condiciones de flujo medio del río y se mantuvieron a una temperatura de 4 ± 2 °C durante su transporte al laboratorio, dentro de contenedores térmicos con refrigerante.



2.2. Preparación y caracterización de la matriz cerámica

La matriz cerámica empleada para la remoción de arsénico se elaboró a partir de arcilla roja natural proveniente de la localidad de Patasucro, distrito de Santillana, provincia de Huanta, departamento de Ayacucho (Perú), región caracterizada por la presencia de depósitos arcillosos de composición mixta y alta plasticidad. Este material fue seleccionado por su abundancia regional, facilidad de obtención y propiedades favorables para la fabricación de matrices adsorbentes. La arcilla fue secada al ambiente durante 72 h, posteriormente triturada manualmente y tamizada hasta alcanzar una granulometría correspondiente a malla 70 (210 μm), asegurando una distribución uniforme del tamaño de partícula. Luego, el material se lavó con agua limpia, se decantó para eliminar impurezas y materia orgánica superficial, y finalmente se secó nuevamente a temperatura ambiente hasta lograr un contenido de humedad adecuado para el mezclado.

La matriz cerámica se formuló siguiendo las proporciones óptimas determinadas previamente en la etapa de optimización del proceso, identificado como el más eficiente por Trejo (2025). La composición final estuvo conformada por 82 g de arcilla roja y 18 g de óxido férrico (Fe_2O_3), con adición mínima de agua para alcanzar una consistencia plástica uniforme. Posteriormente, se moldearon piezas cilíndricas, las cuales fueron secadas a temperatura ambiente durante 48 h y luego precalentadas en horno a 110 °C por 24 h para eliminar humedad residual. Una vez completado este proceso, las matrices fueron calcinados a 800 °C durante 12 h en un horno mufla, bajo atmósfera oxidante y con incremento gradual de temperatura, con el fin de consolidar la estructura cerámica y fijar el Fe_2O_3 en la matriz de arcilla. Tras la calcinación, las piezas se enfriaron lentamente dentro del horno hasta alcanzar la temperatura ambiente, evitando fracturas por choque térmico. Las piezas cerámicas resultantes se trituraron parcialmente hasta obtener fragmentos de 1 a 3 mm de diámetro, adecuados para su empleo como medio adsorbente en sistemas de flujo continuo. Finalmente, se lavaron con agua destilada para eliminar residuos sueltos de polvo fino y se secaron al aire antes de ser utilizadas en las pruebas experimentales.

2.3. Determinación del arsénico total

La cuantificación del arsénico total se efectuó en dos etapas complementarias. En primera instancia, se realizó la evaluación y calibración del método analítico mediante el método espectrofotométrico del azul de molibdeno, utilizando un espectrofotómetro visible Jenway 6305 del Laboratorio de Análisis Instrumental de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Este procedimiento permitió establecer la curva de calibración y verificar la linealidad del método, utilizando soluciones patrón de arsenito de sodio (As^{3+}) en el rango de 0,00 a 1,50 ppm. Las lecturas de absorbancia se realizaron a 880 nm, longitud de onda correspondiente al máximo de absorción del complejo arseno–molibdato, según Dhar et al. (2004) y Tsang et al. (2007). En la segunda fase, correspondiente a la validación del tratamiento optimizado, las determinaciones analíticas del arsénico en las muestras de agua natural del río Apacheta, tanto antes como después del tratamiento, se realizaron en laboratorios acreditados por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL): Laboratorio Pacific Control, para los ensayos de cinética de remoción, y Laboratorio Actlabs Skyline Perú S.A.C. (Lima), para la validación final de la remoción de arsénico.

2.4. Determinación de parámetros fisicoquímicos

La evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua se realizó con el propósito de determinar la calidad del recurso antes y después del tratamiento con la matriz cerámica optimizado. Las mediciones se efectuaron tanto in situ como en laboratorio, siguiendo las especificaciones técnicas del Ministerio de Salud del Perú (MINSA, 2011) para la evaluación de agua destinada a consumo humano. Durante la toma de muestras en el punto de muestreo RAPC-05, se utilizó un equipo multiparámetro portátil (Hanna Instruments HI 9829) debidamente calibrado, con el cual se registraron de manera inmediata los valores de pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), oxígeno disuelto (OD) y temperatura. Estas mediciones in situ permitieron evitar la alteración de las propiedades del agua por transporte o almacenamiento prolongado.

Posteriormente, en laboratorio, se analizaron otros parámetros complementarios, tales como turbidez, alcalinidad, acidez y dureza total, mediante métodos volumétricos y espectrofotométricos normalizados. La turbidez se determinó utilizando un turbidímetro HACH 2100N, expresando los resultados en unidades nefelométricas de turbidez (UNT). La acidez y alcalinidad se evaluaron por titulación con NaOH y H_2SO_4 normalizados, respectivamente, y la dureza total se cuantificó mediante el método del EDTA. Los equipos empleados fueron calibrados antes de cada jornada de muestreo utilizando soluciones patrón certificadas. Los valores obtenidos fueron comparados con los límites establecidos por el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, del Decreto Supremo N.º 031-2010-SA y Los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) del Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM, para el uso poblacional y recreativo, a fin de determinar el grado de cumplimiento de la calidad del agua tras el tratamiento con la matriz cerámica.

2.5. Análisis estadístico

El procesamiento de datos se realizó utilizando el software Minitab® v.21. Se aplicaron pruebas de normalidad (Anderson–Darling) y de comparación de medias (t de Student, $\alpha = 0,05$) para determinar la significancia de las diferencias entre las concentraciones iniciales y finales de arsénico, así como entre los parámetros fisicoquímicos del agua antes y después del tratamiento. Además, se calcularon coeficientes de correlación de Pearson (r) para evaluar la relación entre la reducción de arsénico y la mejora de los parámetros de calidad del agua.

3. Resultados y discusión

3.1. Validación del proceso

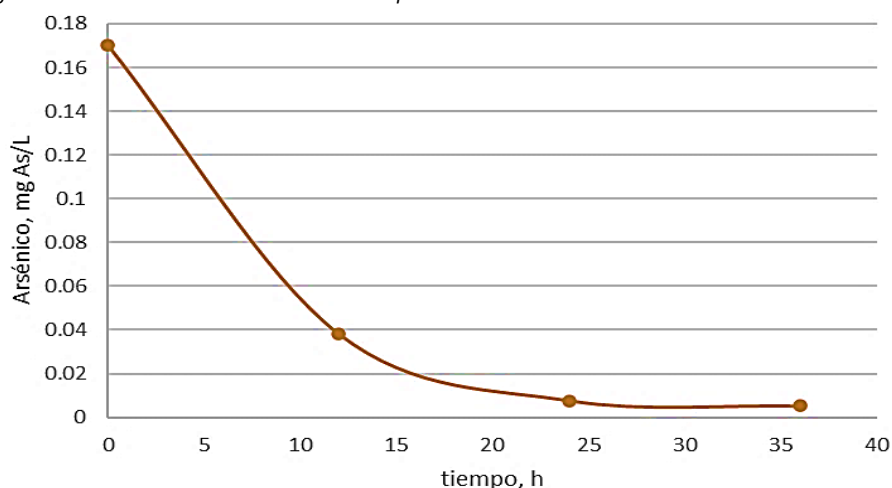
La concentración inicial promedio de arsénico en las muestras fue de $0,170 \pm 0,004$ mg/L, valor superior al límite máximo permisible de 0,01 mg/L establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) para agua destinada al consumo humano. Las pruebas se realizaron con la matriz cerámica optimizada, compuesto por 82 g de arcilla roja impregnada con 18 g de Fe_2O_3 , calcinado a 800 °C. Durante la validación, las muestras se trataron mediante una columna de adsorción de flujo continuo, observándose en la Figura 1, una disminución progresiva de la concentración de arsénico en función del tiempo. Luego de 12 h de tratamiento, la concentración de arsénico se redujo a 0,038 mg/L; tras 24 h, a 0,0077 mg/L; y finalmente, después de 36 h, alcanzó 0,0053 mg/L, lo que representa una eficiencia de



remoción del 94,5 %. Estos resultados evidencian que la matriz cerámica fue capaz de disminuir la concentración de arsénico hasta valores inferiores al límite establecido para agua potable, confirmando su efectividad como material adsorbente. Además, son consistentes con estudios que usan materiales con óxidos de hierro, los cuales reportan eficiencias superiores al 90 %. Por ejemplo, Kim et al. (2022) en Vietnam, obtuvieron remociones del 94-99 % utilizando arenas recubiertas con FeOOH bajo caudales lento.

Figura 1

Efecto de la matriz con mezcla optimizada en la concentración de arsénico



Los ensayos de repetición presentados en la Tabla 1 ($n = 5$) demostraron alta reproducibilidad, con una media de $82,74 \pm 0,49$ % de remoción y variación mínima entre réplicas ($\pm 0,6$ %). La prueba de normalidad de Anderson–Darling ($p = 0,247$) indicó que los datos siguen una distribución normal, mientras que la prueba t de Student ($p = 0,000$) evidenció diferencias estadísticamente significativas respecto al valor de referencia ($\approx 70,56$ %) obtenido con filtros de arcilla natural. Esto es similar a lo encontrado en estudios con carbón activo modificado con óxidos de hierro, donde se observa que la capacidad de adsorción y la velocidad de remoción mejoran mucho con la presencia de Fe (III) y estructuras con grupos $-OH$ disponibles (Zhang et al., 2007).

Tabla 1

Ronda de determinaciones de As en el proceso de remoción

Repeticiones	Concentración de mg As/L			Porcentaje de remoción (%)
	Mes de muestreo	Antes	Después	
1	Abril	0,1477	0,0082	83,20
2	Mayo	0,1701	0,0095	82,30
3	Junio	0,1680	0,0091	82,90
4	Julio	0,1694	0,0090	83,15
5	Agosto	0,1694	0,0093	82,15

Estos resultados demuestran que la impregnación con Fe_2O_3 y la calcinación controlada a 800 °C incrementaron la densidad de sitios activos en la superficie de la matriz, potenciando

la adsorción de arsénico. El mecanismo sugerido es de naturaleza química (quimiosorción), apoyado en la formación de enlaces Fe-O-As y la sustitución de grupos hidroxilos por arsenatos (AsO_4^{3-}), liberando protones y estableciendo enlaces estables Fe-O-As-O-Fe . Esto es apoyado por trabajos como de Tahmasebpour et al. (2022), donde la modificación con óxido férrico mejora mucho la afinidad sobre un amplio rango de pH, entre 2-9. Además, la estructura cristalina del Fe_2O_3 calcinado a altas temperaturas favorece que haya fases más estables (hematita, maghemita) con mayor densidad de sitios activos, según estudios que examinan cambios estructurales de óxidos de hierro con temperatura (Bora et al., 2012).

Desde el punto de vista cinético, los resultados se ajustan al modelo de pseudo-segundo orden, que describe procesos controlados por interacciones químicas entre adsorbente y adsorbato, en lugar de difusión física (Xu et al., 2022). Su aplicabilidad sugiere que el proceso es principalmente de quimiosorción, dominado por enlaces químicos entre los grupos Fe-OH y las especies de arsénico (Aremu et al., 2019). El carácter endotérmico del proceso de adsorción, reportado para sistemas Fe_2O_3 similares, sugiere que la adsorción de arsénico se favorece con el aumento de temperatura, lo que puede interpretarse como una reacción espontánea ($\Delta G^\circ < 0$) y con absorción de calor ($\Delta H^\circ > 0$). Estos hallazgos, junto con la estabilidad térmica de la matriz cerámica, evidencian que el material no solo es eficiente sino también termodinámicamente viable y regenerable. (Bullen et al., 2021).

3.2. Evaluación de los parámetros de calidad del agua

En lo que respecta a los parámetros de calidad del agua, se observaron mejoras notables en varias métricas tras el tratamiento, lo que confirma que el adsorbente no solo remueve arsénico, sino que tiene un efecto en la potabilización. Los resultados de los análisis antes y después del tratamiento se presentan en la Tabla 2 y Figura 2, donde el influente se representa por (P) y el efluente por (T), asimismo, se visualiza la correlación Pearson de valores absolutos entre 0 y 1; muy cerca de 1 mayor ser la correlación según lo establecido por Dagnino (2014).

El pH del agua disminuyó ligeramente de 7,51 a 7,08, manteniéndose dentro del rango recomendado por la OMS (6,5–8,5). Esta leve reducción se atribuye al intercambio iónico entre los grupos hidroxilo del Fe_2O_3 y los aniones presentes en el agua, fenómeno que genera una liberación controlada de protones y estabiliza el microambiente químico del sistema. Esto concuerda con lo encontrado en Devi et al. (2014) donde se observa mejor remoción a pH ligeramente alcalino, pero también se menciona que a pH más neutro-ligeramente ácido la eficiencia permanece bastante buena.

En cuanto a la conductividad eléctrica, se registró una disminución de 1024,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 880 $\mu\text{S}/\text{cm}$, equivalente a una reducción del 14,1 %, lo que evidencia la disminución de iones disueltos en el agua. De manera congruente, los sólidos totales disueltos (STD) pasaron de 524,15 mg/L a 434,46 mg/L, lo que representa una reducción del 17,11 %. Estas variaciones sugieren una significativa retención de especies iónicas (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-}) por parte de la matriz cerámica, ya sea por adsorción superficial o intercambio iónico. Esto se asemeja a lo reportado en estudios con matrices recubiertos de FeOOH o compuestos $\text{Fe}/\text{óxido}$, donde la eliminación iónica general mejora la calidad eléctrica del agua (menos salinidad, menor carga electroquímica) (Kim et al., 2022).

La turbidez, uno de los parámetros más sensibles a la presencia de partículas suspendidas y coloides, se redujo drásticamente de 43,5 UNT a 4,54 UNT, alcanzando valores



dentro del límite máximo permisible (≤ 5 UNT). Esta mejora es atribuible a la capacidad de la matriz cerámica para retener material particulado fino, así como a la acción coagulante del Fe_2O_3 , que favorece la aglomeración y sedimentación de las partículas presentes en el agua cruda. Este resultado demuestra que el material posee no solo propiedades adsorbentes, sino también un efecto clarificante relevante para el tratamiento de aguas naturales. En esa línea, Bulta y Micheal (2019) evaluaron filtros cerámicos con mezclas de arcilla y aserrín para disminuir turbidez y agentes microbiológicos, donde obtuvieron ~ 60 % de reducción de turbidez en algunas configuraciones.

Tabla 2

Parámetros evaluados de calidad del agua respecto a las normativas

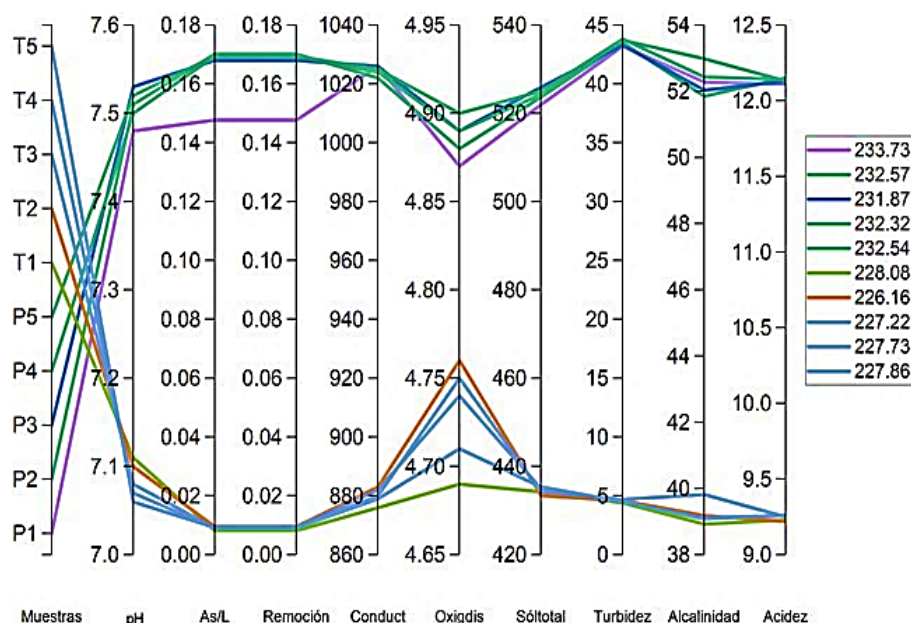
Parámetro	Unidad de medida	Mediciones (promedio)		Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA.	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM Categoría 1 – A		
		Antes	Después		A1	A2	A3
Arsénico	mg As/L	0,1649	0,0090	0,010	0,01	0,01	0,15
pH	Valor de pH	7,51	7,08	6,5 a 8,5	6,5 – 8,5	5,5 – 9,0	5,5 – 9,0
Conductividad 25 °C	$\mu\text{mho/cm}$ ($\mu\text{S/cm}$)	1024,6	880	1500	1500	1600	**
Oxígeno disuelto	mg/L	4,87	4,69	...	≥ 6	≥ 5	≥ 4
Sólidos totales disueltos	mg/L	524,15	434,46	1000	1000	1000	1500
Turbiedad	UNT	43,5	4,54	5	5	100	**
Alcalinidad	mg/L	52,31	39,226	...	...	...	...
Acidez	mg/L	43,5	9,24	...	...	...	...
Dureza total	mg CaCO_3 /L	232,6	227,41	500	500	**	**

En relación con el oxígeno disuelto (OD), se observó una leve reducción de 4,89 a 4,73 mg/L, lo que sugiere un consumo parcial de oxígeno debido a reacciones de oxidación superficial del hierro durante la adsorción de arsénico. Aun así, los valores finales permanecen dentro de los rangos recomendados para agua de consumo, sin impacto negativo en la calidad del recurso tratado. Por su parte, los parámetros de alcalinidad y acidez mostraron reducciones significativas, pasando de 52,31 a 39,23 mg CaCO_3 /L y de 12,13 a 9,24 mg CaCO_3 /L, respectivamente.

Estos resultados indican una mayor estabilidad química del agua tratada, atribuida a la neutralización parcial de iones bicarbonato y carbonato. En concordancia, la dureza total se redujo de 232,6 a 227,4 mg CaCO_3 /L, reflejando una ligera disminución asociada a la retención de cationes divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+}) en los poros de la matriz cerámica. Estos comportamientos se reportan también en filtros modificados con hierro, donde los hidróxidos del hierro contribuyen a precipitación o retención iónica adicional, mejorando la estabilidad química del agua (Kim et al., 2022).

Figura 2

Variación de los parámetros de calidad del agua en el proceso remoción



Por último, el análisis estadístico global confirmó diferencias significativas ($p < 0,05$) en todos los parámetros evaluados, mientras que las pruebas de normalidad ($p > 0,05$) verificaron la homogeneidad de los datos. Además, los coeficientes de correlación de Pearson ($r \approx -0,98$) entre la concentración de arsénico y los indicadores de calidad del agua revelaron una fuerte relación inversa, es decir, a medida que disminuye el arsénico, mejora la calidad general del agua.

3.3. Termodinámica tentativa e implicaciones prácticas

El análisis termodinámico cualitativo permite interpretar el comportamiento de la adsorción de arsénico en las matrices cerámicas de arcilla roja impregnados con Fe_2O_3 . Estudios han descrito este proceso como espontáneo (ΔG° negativo) y endotérmico (ΔH° positivo), lo que indica que la adsorción se favorece al aumentar la temperatura (Ohale et al., 2023; Akhlaghian et al., 2017). Mediante la ecuación de Van 't Hoff, es posible estimar ΔH° y ΔS° a partir de la pendiente e intercepto de $\ln K$ vs. $1/T$, y calcular $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$. Aunque en este estudio no se evaluaron diferentes temperaturas, un análisis hipotético basado en isotermas permitiría confirmar la espontaneidad del proceso y su carácter endotérmico. En cuanto al ajuste de isotermas, los modelos de Langmuir y Freundlich son los más utilizados para describir la adsorción de arsénico. La isoterma de Langmuir asume una adsorción monomolecular en sitios homogéneos y suele mostrar mejor ajuste en materiales con óxidos de hierro, mientras que la de Freundlich describe superficies heterogéneas (Chakraborty et al., 2021). Comparar ambos modelos a partir de los datos experimentales de equilibrio permitiría identificar el mecanismo predominante y estimar la capacidad máxima de adsorción del material, información esencial para optimizar su aplicación en la remoción de arsénico.



4. Conclusiones

La matriz cerámica demostró una alta capacidad adsorbente, alcanzando una eficiencia promedio de 94,5 %. Este desempeño permitió reducir la concentración inicial de 0,17 mg/L a 0,0053 mg/L, situándose por debajo del límite máximo permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud (0,01 mg/L). La impregnación con Fe_2O_3 y la calcinación controlada a 800 °C incrementaron significativamente la densidad de sitios activos en la superficie del material, favoreciendo la formación de enlaces Fe–O–As estables y la retención eficiente de especies arsenicales.

La aplicación de la matriz cerámica también mejoró notablemente la calidad fisicoquímica del agua, evidenciada por la reducción de turbidez (de 43,5 a 4,54 UNT), conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos, además de una estabilización del pH dentro de los rangos aceptables para consumo humano. Estos cambios reflejan una acción sinérgica de adsorción y clarificación, donde el Fe_2O_3 no solo actúa como agente adsorbente, sino también como coagulante y retenedor de iones disueltos. La evaluación estadística confirmó diferencias significativas ($p < 0,05$) en todos los parámetros, así como una fuerte correlación inversa entre la disminución de arsénico y la mejora global de la calidad del agua.

En términos prácticos, el material propuesto representa una alternativa tecnológica viable y sostenible para el tratamiento de aguas naturales con contenido moderado o alto de arsénico, especialmente en comunidades rurales de la sierra sur del Perú. Futuros estudios podrían centrarse en la regeneración del material y la evaluación de su comportamiento en escalas piloto o continuas, a fin de consolidar su aplicación a nivel comunitario e industrial.

Contribución de los autores

A. F. Trejo: Conceptualización, curación de datos, adquisición de fondos, administración del proyecto, recursos, redacción-revisión y edición. **P. F. Velásquez:** Investigación, software, validación y visualización. **J. C. Ponce:** Análisis formal, metodología, supervisión y redacción del borrador original.

Conflictos de interés

Los autores manifiestan que no tienen conflictos de interés con respecto a esta publicación.

5. Referencias Bibliográficas

- Akhlaghian, F., Sourì, B., y Mohamadi, Z. (2017). Nanostructured $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ Adsorbent for removal of As (V) from water. *Advances in Environmental Technology*, 3(2), 67-75. <https://doi.org/10.22104/aet.2017.2003.1099>
- Aktar, S., Mia, S., Makino, T., Rahman, M. M., y Rajapaksha, A. U. (2023). Arsenic removal from aqueous solution: A comprehensive synthesis with meta-data. *The Science of the Total Environment*, 862(160821), 160821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160821>
- Apaza, R. (2014). Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de carancas y huata, puno. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 16(01), 51-58. <https://doi.org/10.18271/ria.2014.35>

- Aremu, J. O., Lay, M., y Glasgow, G. (2019). Kinetic and isotherm studies on adsorption of arsenic using silica based catalytic media. *Journal of Water Process Engineering*, 32(100939), 100939. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100939>
- Autoridad Nacional de Agua [ANA]. (2016). *Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. <https://goo.su/9xuG7L>
- Bora, D. K., Braun, A., Erat, S., Safonova, O., Graule, T., y Constable, E. C. (2012). Evolution of structural properties of iron oxide nano particles during temperature treatment from 250 °C–900 °C: X-ray diffraction and Fe K-shell pre-edge X-ray absorption study. *Current Applied Physics: The Official Journal of the Korean Physical Society*, 12(3), 817–825. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2011.11.013>
- Bullen, J. C., Saleesongsom, S., Gallagher, K., y Weiss, D. J. (2021). A revised pseudo-second-order kinetic model for adsorption, sensitive to changes in adsorbate and adsorbent concentrations. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 37(10), 3189–3201. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00142>
- Bulta, A. L., y Micheal, G. A. W. (2019). Evaluation of the efficiency of ceramic filters for water treatment in Kambata Tabaro zone, southern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0129-6>
- Chakraborty, S., Mukherjee, A., Das, S., Raju Maddela, N., Iram, S., y Das, P. (2020). Study on isotherm, kinetics, and thermodynamics of adsorption of crystal violet dye by calcium oxide modified fly ash. *Environmental Engineering Research*, 26(1). <https://doi.org/10.4491/eer.2019.372>
- Chávez, J. A. V. (2018). Water quality and sustainable development. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 35(2), 304–308. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>
- Chávez, M. (2016, 8 de agosto). *Cáscara de coco elimina arsénico del agua de los ríos, revela el INS*. Andina Agencia Peruana de Noticias. <https://goo.su/AHQKo>
- Dagnino, S. J. (2014). Correlación. *Revista chilena de anestesia*, 43(2), 150-153. <https://doi.org/10.25237/revchilanestv43n02.15>
- Devi, R. R., Umlong, I. M., Das, B., Borah, K., Thakur, A. J., Raul, P. K., Banerjee, S., y Singh, L. (2014). Removal of iron and arsenic (III) from drinking water using iron oxide-coated sand and limestone. *Applied Water Science*, 4(2), 175–182. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0139-5>
- Dhar, R. K., Zheng, Y., Rubenstone, J., y van Geen, A. (2004). A rapid colorimetric method for measuring arsenic concentrations in groundwater. *Analytica Chimica Acta*, 526(2), 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.09.045>
- El-Moselhy, M. M., Ates, A., y Çelebi, A. (2017). Synthesis and characterization of hybrid iron oxide silicates for selective removal of arsenic oxyanions from contaminated water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 488, 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.003>



- Hao, L., Liu, M., Wang, N., y Li, G. (2018). A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents. *RSC Advances*, 8(69), 39545–39560. <https://doi.org/10.1039/c8ra08512a>
- Hong, Y.-S., Song, K.-H., y Chung, J.-Y. (2014). Health effects of chronic arsenic exposure. *Yebang Uihakhoe Chi [Journal of Preventive Medicine and Public Health]*, 47(5), 245–252. <https://doi.org/10.3961/jpmph.14.035>
- Kim, L., Thanh, N. T., Van Toan, P., Minh, H. V. T., y Kumar, P. (2022). Removal of arsenic in groundwater using Fe (III) oxyhydroxide coated sand: A case study in Mekong Delta, Vietnam. *Hydrology*, 9(1), 15. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010015>
- Lamm, S. H., y Kruse, M. B. (2005). Arsenic ingestion and bladder cancer mortality—what do the dose-response relationships suggest about mechanism? *Human and Ecological Risk Assessment: HERA*, 11(2), 433–450. <https://doi.org/10.1080/10807030590925678>
- Li, Y., Ye, F., Wang, A., Wang, D., Yang, B., Zheng, Q., Sun, G., y Gao, X. (2016). Chronic arsenic poisoning probably caused by arsenic-based pesticides: Findings from an investigation study of a household. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1), 133. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010133>
- López-Muñoz, M. J., Arencibia, A., Segura, Y., y Raez, J. M. (2017). Removal of As (III) from aqueous solutions through simultaneous photocatalytic oxidation and adsorption by TiO₂ and zero-valent iron. *Catalysis today*, 280, 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.05.043>
- Ministerio de Ambiente [MINAM] (2015). *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación del Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM*. <https://goo.su/LhPqOq>
- Ministerio de Salud del Perú [MINSA]. (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, del Decreto Supremo N° 031-2010-SA*. <https://goo.su/sEsipi>
- Muhammad, S., Tahir Shah, M., y Khan, S. (2010). Arsenic health risk assessment in drinking water and source apportionment using multivariate statistical techniques in Kohistan region, northern Pakistan. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 48(10), 2855–2864. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.07.018>
- Nicomel, N. R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P., y Du Laing, G. (2015). Technologies for arsenic removal from water: Current status and future perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1), ijerph13010062. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010062>
- Ohale, P. E., Chukwudi, K., Ndivi, J. N., Michael, M. E., Abonyi, M. N., Chukwu, M. M., Obi, C. C., Onu, C. E., Igwegbe, C. A., y Azie, C. O. (2023). Optimization of Fe₂O₃@BC-KC composite preparation for adsorption of Alizarin red S dye: Characterization, kinetics, equilibrium, and thermodynamic studies. *Results in Surfaces and Interfaces*, 13(100157), 100157. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100157>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: World Health Organization. <https://goo.su/gikt>

- Palomino-Malpartida, Y. G., Barboza-Palomino, G. I., Choque-Quispe, D., Alcarraz-Alfaro, T., Tomaylla-Berrocal, N. J., Huamaní, N. B., Ligarda-Samanez, C. A., y Choque-Quispe, Y. (2024). Sintered clays: Application in the removal of arsenic from water by filter beds. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(10), e09500. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-318>
- Rehman, A., Rukh, S., Ayoubi, S. A., Khattak, S. A., Mehmood, A., Ali, L., Khan, A., Malik, K. M., Qayyum, A., y Salam, H. (2022). Natural clay minerals as potential arsenic sorbents from contaminated groundwater: Equilibrium and kinetic studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16292. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316292>
- Roghani, M., Nakhli, S. A. A., Aghajani, M., Rostami, M. H., y Borghei, S. M. (2016). Adsorption and oxidation study on arsenite removal from aqueous solutions by polyaniline/polyvinyl alcohol composite. *Journal of Water Process Engineering*, 14, 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.10.012>
- Tahmasebpour, M., Hosseini Nami, S., Khatamian, M., y Sanaei, L. (2022). Arsenate removal from contaminated water using Fe_2O_3 -clinoptilolite powder and granule. *Environmental Technology*, 43(1), 116–130. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1779821>
- Trejo, A. F., Velásquez, P. F., y Ponce, J. C. (2025). Tratamiento de agua contaminada con arsénico utilizando arcilla roja natural como adsorbente ecológico. *Ingeniería Investiga*, 7, e1289. <https://doi.org/10.47796/ing.v7i00.1289>
- Tsang, S., Phu, F., Baum, M. M., y Poskrebyshev, G. A. (2007). Determination of phosphate/arsenate by a modified molybdenum blue method and reduction of arsenate by $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$. *Talanta*, 71(4), 1560–1568. <https://goo.su/TwHq>
- Xu, Y., Yin, Y., Guo, M., Xu, G., Li, L., y Liu, C. (2022). Enhanced removal of arsenic from aqueous solution by novel red mud porous beads: batch and column experiments. *Water Science & Technology: Water Supply*, 22(4), 3980–3992. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.028>
- Zhang, Q. L., Gao, N.-Y., Lin, Y. C., Xu, B., y Le, L.-S. (2007). Removal of arsenic(V) from aqueous solutions using iron-oxide-coated modified activated carbon. *Water Environment Research: A Research Publication of the Water Environment Federation*, 79(8), 931–936. <https://doi.org/10.2175/106143007x156727>