

Diseño de Filtro con Zeolita Acondicionada para Remoción de Arsénico en Aguas Subterráneas de la Región de los Altos de Jalisco

C. S. Magaña-Martínez^{#1}, R. González Pérez^{#2}, C. De La Mora Orozco^{*3}, N. Santiago Olivares^{#4},
E. López García^{#5}

[#]Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez
Unidad Académica Arandas, Departamento de Ingeniería Ambiental, Jalisco, México.

^{*}Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Tepatitlán, México

¹cesar.magana@arandas.tecmm.edu.mx, ¹rafael.perez@arandas.tecmm.edu.mx,

²delamora.celia@inifap.gob.mx, ³norberto.santiago@arandas.tecmm.edu.mx,

³esmeloga_030@hotmail.com

Resumen— Se llevó a cabo el diseño y construcción de un filtro utilizando zeolita acondicionada. Después de realizar varias pruebas con muestras de agua provenientes de la región, ha demostrado ser una solución efectiva para la remoción de arsénico en aguas subterráneas en la región de los Altos de Jalisco. La zeolita, un material con estructura microporosa y alta capacidad de intercambio iónico, fue sometida a tratamientos térmicos y químicos que optimizaron su capacidad adsorbente para captar arseniato y arsenito. Este filtro logró reducir significativamente los niveles iniciales de arsénico en el agua, alcanzando concentraciones que se pudieran seguir escalando para llevar por debajo de los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (10 µg/L).

Palabras clave—contaminante, agua, recurso, filtración.

Abstract— The design and construction of a filter using conditioned zeolite was carried out. After several tests with water samples from the region, it has proven to be an effective solution for arsenic removal from groundwater in the Jalisco Highlands region. Zeolite, a material with a microporous structure and high ion-exchange capacity, underwent thermal and chemical treatments to optimize its adsorption capacity for capturing arsenate and arsenite. This filter significantly reduced the initial arsenic levels in the water, achieving concentrations that could be further reduced to below the World Health Organization's recommended limit (10 µg/L).

Keywords— pollutant, water, resources, filtration.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos fundamentales para la vida del planeta, siendo uno de los recursos más importantes que son el sustento de toda forma de vida en el planeta. Los seres humanos dependemos de su disponibilidad no solo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales [1].

La contaminación del agua subterránea por arsénico es un problema ambiental y de salud pública significativo en

muchas partes del mundo. El arsénico, un metaloide tóxico, puede encontrarse en concentraciones elevadas en el agua subterránea debido a procesos naturales, como la disolución de minerales que contienen arsénico, o por actividades antropogénicas, como la minería y el uso de pesticidas [2]. La exposición prolongada al arsénico a través del agua potable puede causar graves problemas de salud, incluyendo cáncer de piel, vejiga y pulmón, así como enfermedades cardiovasculares y diabetes [3].

Una solución prometedora para la remoción de arsénico del agua subterránea es el uso de filtros basados en zeolita, un material poroso con una alta capacidad de adsorción. Las zeolitas naturales pueden ser acondicionadas para mejorar su afinidad hacia el arsénico, aumentando así su eficiencia en procesos de filtración. Diversos estudios han demostrado que las zeolitas modificadas con agentes químicos, como sales de hierro o manganeso, presentan una capacidad significativamente mayor para la adsorción de arsénico, lo que las convierte en una opción viable y económica para el tratamiento de agua [4].

El agua disponible para consumo humano en la gran mayoría de los países se encuentra contaminada, de los contaminantes una de la mayor preocupación ha sido el Arsénico, metal pesado el cual se ha demostrado que tiene efectos nocivos para la salud, tales como, tumores en los pulmones, la piel y otros órganos [5] por esta razón la Organización Mundial de la Salud ha sugerido que 10 µg/L de arsénico como límite máximo permisible [6]. Investigaciones realizadas para analizar contenido de Arsénico en aguas de municipios de los Altos de Jalisco, muestran que los niveles de concentración se sitúan en niveles de 14.7-101.9 (µg/L), lo que demuestra claramente como supera al límite máximo permisible [7].

El tener una opción de filtros con zeolita acondicionada, puede tener el potencial de reducir las concentraciones de arsénico a niveles seguros para el consumo humano, además también se busca tener una solución sostenible y de bajo costo para comunidades cuyas fuentes de agua se vean

afectadas por este contaminante. Es por esto que con el objetivo de aportar una opción viable para eliminar o disminuir los niveles de este elemento tóxico, se llevó a cabo el diseño y prueba de una alternativa de filtración con zeolita acondicionada para remover el Arsénico contenido en agua.

II. MÉTODOS

A. Construcción del filtro.

El filtro esta manufacturado con tubería de acrílico de 1 pulgada. Para construir la columna se comenzó pegando la T en forma vertical justo en medio de una de las placas de 28cm x 28cm, se rellenó con algodón desde la base del acrílico hasta el comienzo del orificio paralelo a la base, en el orificio que quedo en la parte superior se colocó el tubo de acrílico sellándolo con silicón y en el otro orificio que quedo perpendicular al tubo, se le coloco el niple y la llave de ½ pulgada que para evitar fugas se utilizó teflón. Además, se le incluyeron 3 placas alrededor del tubo de acrílico como sostén para evitar que se balanceara y así tuviera más resistencia.

Para simular el filtro, la columna se empaco con un lecho de 40 cm de zeolita recubierta de óxidos de hierro, colocado sobre una capa de soporte de gravilla de sílice para la distribución uniforme de flujo (figura 1 A).

B. Acondicionamiento de la zeolita natural

Como punto inicial, la grava de Zeolita se molió con ayuda de molino rustico para obtener partículas de 0.65mm a 1 mm, una vez tamizada se realizaron lavados para eliminar impurezas y material soluble con agua desionizada, se escurrió el exceso de agua y se dejó secar a temperatura ambiente sobre papel absorbente en una superficie extendida durante 24 horas (figura 1 B).

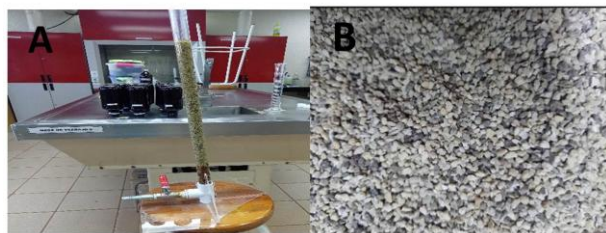


Figura 1. A. Filtro armado. B. Zeolita molida y lavada.

Posterior al secado, la zeolita se sometió a tratamiento con el fin de impregnar la parte externa de la zeolita con óxido de hierro, para ello se preparó una solución de hierro (1 mg Fe)/mL) con sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); se diluyo 150 gr de sulfato ferroso en 150 ml de agua desionizada, mezclándolo con ayuda del agitador magnético a temperatura ambiente, se colocaron 200 gramos de zeolita previamente lavada en un cristalizador de 500ml para después verter la solución de hierro y dejarla remojar

durante 2 horas. Pasadas las 2 horas se enjuago la zeolita con agua desionizada y se sumergió durante 1 hora en una solución de hipoclorito de sodio (10ml de hipoclorito en 150 ml de agua desionizada).

C. Muestras de agua

El agua que se utilizó en la presente investigación fue recolectada de 3 pozos subterráneos de la región de los Altos Sur de Jalisco, uno de Arandas ubicado en una empresa tequilera, el segundo de Capilla de Guadalupe y el tercero de Tepatitlán, se eligieron estos lugares dado a la cercanía de estos. Posterior a la recolección de las muestras, se aforaron 3 frascos GL45 con muestras de agua, se etiquetaron con la inicial del lugar procedente y un 0, a cada frasco se le añadieron 3 gotas de cloro para oxidar el As que se encuentre en su forma trivalente, después se analizaron con el ARSENIC TEST KIT de HACH Company, esta prueba es por colorimetría, detectando una escala de 0 a 500 ppb de As.

Los tratamientos a evaluar fueron las muestras de agua de los tres lugares; Arandas, Tepatitlán y Capilla de Guadalupe como efluente de la columna que se adaptó con la finalidad de filtro y cuatro tiempos de contacto; 5, 10, 15 y 20 minutos. Los tratamientos se evaluaron por triplicado, con un diseño factorial de 3 X 4, dándonos un total de 13 muestras de agua por cada lugar, 12 con tratamiento y 1 sin tratamiento. Los sitios de muestreo evaluados fueron el agua sin tratamiento y después de salir de la columna (variable de respuesta) esto para evaluar la eficiencia del sistema en la remoción del As. Se evaluó la remoción de arsénico de la zeolita acondicionada, además el pH y conductividad de las muestras de agua.

D. Método para la cuantificación de arsénico

Se llevó a cabo la determinación de arsénico con el kit de ARSENIC TEST marca HACH para medir de 0 a 500 ppb de arsénico presente en agua, cat. No. 2800000, Lot A7173. El equipo cuenta con instructivo y utiliza 5 reactivos en polvo, cuatro en sobrecitos y uno en bote, el cual se suministra por cucharadas.

El método funciona de la siguiente manera: el sulfuro de hidrogeno se oxida para formar sulfato, con el fin de evitar interferencia. Luego se neutraliza el medio oxidante. El ácido sulfámico y el zinc en polvo reaccionan para crear fuertes condiciones reductoras, bajo las cuales el arsénico inorgánico se reduce para formar gas de arsina (AsH_3). El gas de arsina reacciona con el bromuro mercuríco en la tira de ensayo para formar halogenuros mixtos de arsénico/mercurio que decoloran la tinta de ensayo. El color varía entre amarillo y marrón, según la concentración.

III. RESULTADOS

Del total de muestras, la evaluación de la capacidad de remoción de arsénico de la zeolita acondicionada con sales de hierro se llevó a cabo con agua inoculada proveniente de Arandas, Capilla de Guadalupe y Tepatitlán y la

concentración se determinó con el Kit ARSENIC TEST, el agua se decidió inocular a razón de que las muestras de los pozos no contenían una cantidad representante de As. Los valores obtenidos en cada tira reactiva se compararon con la muestra de colores del mismo kit y cuando algún color no correspondía a alguno de los colores muestra, ya que era o más amarillo o menos amarillo, o con un poco de tono naranja pero no tenía el color tan naranja como el de la muestra ni tampoco amarillo como el valor anterior, en estos casos se optó por poner el valor intermedio entre los dos colores, por ejemplo: 5, 15 y 20, 40, 60, 80 y 100. Para el análisis e interpretación de datos se graficaron los promedios de las réplicas por pozo y se realizó una línea de tendencia obteniendo una función polinómica de grado 2.

La capacidad de remoción de arsénico alcanza un máximo de 88%, además se observa que los valores obtenidos se encuentran por debajo del límite máximo que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, el límite máximo permisible es de 0.025 mg/L y el valor máximo de concentración de As después de los tratamientos fue de 13.3 ppb lo que corresponde a 0.013 mg/L y el valor máximo de remoción fue de 0.0083 mg/L.

Los niveles de la remoción de arsénico se muestran en la figura 2, en ella podemos observar los promedios de las réplicas de los tres pozos, mostrando 5 puntos para cada uno, del cual uno es el arsénico inicial y cuatro con tratamiento a diferentes tiempos de retención, 5, 10, 15 y 20 minutos. La línea de tendencia que muestran los resultados obtenidos fue polinómica de grado 2, con valores de R^2 de 0.89, 0.96 y 0.97, para pozo de Arandas, Capilla de Guadalupe y Tepatlán, respectivamente.

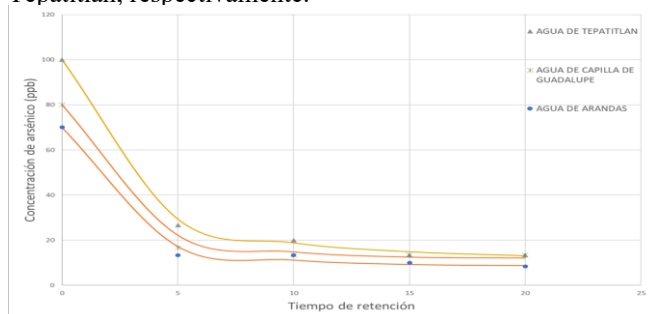


Fig. 2. Promedio de la concentración de As de las réplicas por tiempo de retención con respecto a los 3 pozos.

Los tres tratamientos tienen un comportamiento de remoción de arsénico similar, en el cual la mayor remoción de arsénico se presenta en los primeros 5 minutos de contacto, llegando a su fase de equilibrio entre los 15 y 20 minutos, obteniendo como máximo 88% de remoción, según el promedio de las tres réplicas con 5 minutos de retención en el agua inoculada de Arandas, con valor de 70 ppb (0.07 mg/L) de inicio, y un valor final de 8.33 ppb (0.0083 mg/L) el cual está muy por debajo de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 e incluso del valor que establece la OMS correspondiente a 0.01 mg/L.

IV. DISCUSIÓN

El diseño e implementación de un filtro basado en zeolita acondicionada para la remoción de arsénico en aguas subterráneas de la región de los Altos de Jalisco ha demostrado ser una estrategia eficaz para mitigar la contaminación por este metaloide tóxico. Los resultados obtenidos indican una reducción significativa de los niveles de arsénico, cumpliendo con los estándares de calidad establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) que recomienda un límite máximo de 10 $\mu\text{g/L}$ en el agua potable [8].

La zeolita, debido a su estructura microporosa y alta capacidad de intercambio iónico, se posiciona como un material ideal para la adsorción de arsenato y arseniato presentes en las aguas subterráneas [9]. En este estudio, la zeolita fue acondicionada mediante tratamientos térmicos y químicos que optimizaron sus propiedades adsorbentes, incrementando su afinidad por el arsénico. Este acondicionamiento permitió una mayor eficiencia en la captura del arsénico, resultando en concentraciones por debajo de los límites permisibles en la mayoría de las muestras analizadas post-tratamiento.

Comparado con otros métodos de remoción de arsénico, como la ósmosis inversa o la precipitación química, el uso de zeolita acondicionada presenta ventajas significativas en términos de costos operativos y sostenibilidad ambiental [10]. Además, la zeolita es un material abundante y renovable, lo que facilita su implementación a gran escala en comunidades rurales de Los Altos de Jalisco, donde el acceso a tecnologías avanzadas puede ser limitado.

No obstante, es importante considerar algunas limitaciones del estudio. La capacidad de adsorción de la zeolita puede disminuir con el tiempo debido a la saturación de sitios activos, lo que requiere un mantenimiento periódico y la regeneración del material adsorbente [11]. Además, la presencia de otros iones en el agua puede competir con el arsénico por los sitios de adsorción, afectando la eficiencia del filtro. Futuras investigaciones podrían enfocarse en la optimización de los procesos de regeneración y en el desarrollo de zeolitas modificadas que presenten una selectividad mayor hacia el arsénico.

V. CONCLUSIONES

En conclusión, estas primeras pruebas utilizando un filtro de zeolita acondicionada han demostrado tener un buen potencial que puede ser una solución viable y efectiva para la disminución y remoción de arsénico en las aguas subterráneas de los Altos de Jalisco, sobre todo a niveles seguros para la salud. Este enfoque no solo contribuye a mejorar la calidad del agua potable, sino que también promueve la salud pública y el bienestar de las comunidades locales. La implementación de esta tecnología, acompañada de programas de monitoreo continuo, puede servir como

modelo para otras regiones afectadas por la contaminación por arsénico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Mario Molina Pasquel y Enríquez, Unidad Académica Arandas, el apoyo otorgado mediante las instalaciones del laboratorio y horas de investigación para la realización de este proyecto, el cual es producto de la tesis de grado de Ingeniería ambiental de una de las autoras.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Villena Chavez, "Calidad del agua y desarrollo sostenible," *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, vol. 35, no. 2, pp. 304-308, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>.
- [2] P. Bhattacharya, A. H. Welch, K. G. Stollenwerk, M. J. McLaughlin, J. Bundschuh, and G. Panaullah, "Arsenic in the environment: Biology and Chemistry," *Science of the Total Environment*, vol. 379, no. 2-3, pp. 109-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.037>.
- [3] A. H. Smith, E. O. Lingas, and M. Rahman, "Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: A public health emergency," *Bulletin of the World Health Organization*. Vol. 78, no. 9, pp. 1093-1103, 2000. [En línea] Disponible en: <https://www.scielosp.org/pdf/bwho/v78n9/v78n9a05.pdf>
- [4] P. Misaelides, "Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review," *Microporous and Mesoporous Materials*. Vol. 144, no. 1-3, pp. 15-18, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.03.024>.
- [5] O. Mendoza Cano, R. A. Sánchez Piña, J. Barrón Quintana, H. B. Cuevas Arellano, P. Escalante Minakata, and R. Solano Barajas. "Potential health risks from consumption of water with arsenic in Colima, Mexico," *Salud Publica de México*, vol. 59, no. 1, pp. 34-40, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21149/8413>.
- [6] A. Toledo, "El agua en México y el mundo", *Gaceta ecológica*, no. 64, pp. 9-18, 2002.
- [7] R. Hurtado Jiménez, J. L. Gardea Torresdey, "Arsenic in drinking water in the Los Altos de Jalisco region of Mexico," *Rev Panam Salud Publica*, vol. 20, no. 4, pp. 236-247, 2006.
- [8] Organización Mundial de la Salud (OMS). Guías para la calidad del agua de consumo humano, OMS, Ginebra, 2017.
- [9] P. A. Camerotto Andreani, M. A. Trinelli, P. R. Leal, A. I. Rodriguez, A. V. Rodriguez, J. Llano, and M. dos Santos Afonso, "Adsorptive removal of arsenic from waters using natural and modified Argentinean zeolites," 2014.
- [10] S. Sharma, S. Singh, S. J. Sarma, K. Misra, S. K. Brar. *Arsenic removal technologies: field applications and sustainability*, Handbook of Water Purity and Quality, 2nd Edition, Academic Press, 2021, Pages 271-292. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821057-4.00002-1>.
- [11] E. Kuldeyev, M. Seitzhanova, S. Tanirbergenova, K. Tazhu, E. Doszhanov, Z. Mansurov, S. Azat, R. Nurlybaev, and R. Berndtsson, "Modifying Natural Zeolites to Improve Heavy Metal Adsorption," *Water*, vol. 15, no. 12, pp. 2215, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15122215>.