UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Remoción de arsénico del agua subterránea de la zona Chullunquiani mediante el método de RAOZ 2025**

Por:

Atencio Garcia Gina Danitza

Machaca Huayhua Danny Lady

Apaza Perez Anyela

Asesor:

**Juliaca, Abril de 2025**

Remoción de arsénico del agua subterránea de la zona Chullunquiani mediante el método de RAOZ 2025, Juliaca-Puno.

Gina Danitza Atencio Garcia1\*, Danny Lady Machaca Huayhua2, Anyela Apaza Perez3.

*aFacultad de Ingenieria y Arquitectura ,EP.Ingenieria Ambiental Universidad Peruana Unión*

# Resumen

 La contaminación del agua subterránea por arsénico representa un grave problema de salud pública en zonas rurales del Perú. Este estudio evaluó la eficacia del método RAOS 2025, basado en irradiación solar y ultravioleta (UV), para remover arsénico en aguas subterráneas de la comunidad de Chullunquiani, Juliaca. Se tomaron muestras de cuatro pozos con concentraciones iniciales de arsénico entre 200 y 500 ppb. El tratamiento consistió en la adición de Fe²⁺ (sal de Mohr) y jugo de limón en botellas plásticas expuestas a luz solar o lámparas UV de 3 y 7.5 mW/cm². Los resultados mostraron que, con una relación molar Fe²⁺/citrato de 1.8 y 4 horas de irradiación, se logró remover hasta el 95% del arsénico, alcanzando niveles por debajo del límite permitido por la OMS (<10 ppb). El método es sencillo, de bajo costo y aplicable en comunidades sin acceso a tecnologías complejas. Se discute su viabilidad frente a otros sistemas, como filtros con FeOOH, y se resalta su potencial como solución accesible para la mitigación del hidroarsenismo en zonas rurales del altiplano andino.

*Palabras clave:* Agua subterránea; remoción de contaminantes, tratamiento de aguas; contaminación del agua; técnicas de purificación,método RAOS.

# Abstract

Groundwater contamination by arsenic represents a serious public health problem in rural areas of Peru. This study evaluated the efficacy of the RAOS 2025 method, based on solar and ultraviolet (UV) irradiation, for removing arsenic from groundwater in the community of Chullunquiani, Juliaca. Samples were taken from four wells with initial arsenic concentrations between 200 and 500 ppb. The treatment consisted of the addition of Fe²⁺ (Mohr's salt) and lemon juice in plastic bottles exposed to sunlight or UV lamps of 3 and 7.5 mW/cm². The results showed that, with an Fe²⁺/citrate molar ratio of 1.8 and 4 hours of irradiation, up to 95% of the arsenic was removed, reaching levels below the WHO limit (<10 ppb). The method is simple, low-cost, and applicable in communities without access to complex technologies. Its viability compared to other systems, such as FeOOH filters, is discussed, and its potential as an affordable solution for mitigating hydroarsenism in rural areas of the Andean plateau is highlighted.

Keywords: Groundwater; contaminant removal; water treatment; wáter pollution; purification techniques; RAOS method.+

# Introducción

La contaminación del agua por metales pesados es uno de los problemas más graves en el Perú, afectando no solo la calidad, sino también la cantidad del agua disponible para su uso eficiente; este problema pone en riesgo tanto el acceso a agua potable como la salud pública; las principales causas de la contaminación son las industrias que degradan progresivamente el agua, la falta de tratamiento de las aguas servidas y el uso indiscriminado de agroquímicos en las actividades productivas **(MINSA, 2013).**

Más de 250,000 personas consumen agua con niveles de arsénico superiores a 0.01 mg/L, en el Perú lo que representa un grave problema de salud **pública (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2010).** El consumo prolongado de agua contaminada con arsénico puede causar hidroarsenismo crónico regional endémico (HACRE), que se asocia con enfermedades cardíacas, vasculares, neurológicas y cáncer **(MINSA, 2013).** A pesar de la gravedad del problema, el arsénico en el agua potable sigue siendo un problema subestimado en muchas comunidades, donde la falta de acceso a agua limpia agrava aún más la situación de salud pública **(Pérez, 2020).**

El tratamiento del agua contaminada con arsénico es esencial para prevenir enfermedades crónicas y mejorar la calidad de vida de las personas, especialmente en las comunidades rurales, según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), el arsénico está clasificado como carcinogénico del Grupo A debido a la evidencia de sus efectos adversos sobre la salud **(OPS, 2010).** En consecuencia, la OMS ha propuesto reducir el Límite Máximo Permisible (LMP) de arsénico en el agua potable a 0.010 mg/L, dado que la exposición a concentraciones más altas puede causar hasta 31.33 casos de cáncer por cada 1,000 habitantes **(OMS, 2017).**

En el Perú, la Ley General de Aguas establece un LMP de 0.100 mg/L, lo que genera preocupación debido al riesgo para la salud pública; además, la eliminación natural del arsénico en el organismo humano ocurre a través de la orina, heces, sudor y descamación epidérmica **(MINSA, 2013).**

En la mayoría de los estudios sobre tratamiento de agua, las metodologías se centran en la eliminación de turbiedad y microorganismos patógenos de origen fecal. Para la remoción de metales pesados, como el arsénico, se emplean equipos y procesos más complejos y costosos; la remoción de arsénico en el agua depende de su forma química y su grado de oxidación; la coagulación con sales de aluminio (III) o hierro (III) es uno de los métodos más utilizados para remover el As(V), aunque requiere altas dosis de coagulantes y genera grandes cantidades de lodos que deben ser tratados adecuadamente **(Esparza, 2016).**

 Los estudios sobre arsénico en aguas subterráneas en el Perú están en fase inicial, por lo que es necesario continuar con investigaciones para encontrar métodos de tratamiento más eficientes **(Boletín de la Universidad del Pacífico, 1999)**. En este contexto, la presente investigación propone el uso de irradiación solar para la remoción de arsénico, como una alternativa económica y accesible; este método se basa en la formación del complejo citrato de hierro (Fe(III)), que permite la oxidación del As(III) a As(V) mediante irradiación con luz solar en presencia de oxígeno; el As(V) se adsorbe sobre el precipitado de hidróxido de hierro que se forma en estas condiciones y se flocula; la técnica se complementa con la adición de jugo de limón y una solución de Fe(II) de sal de Mohr, y el tratamiento se realiza en botellas plásticas expuestas al sol durante varias horas ; luego de la exposición solar, las botellas se colocan en posición vertical para que el precipitado decante y se filtra a través de paños textiles o algodón **(Callegaro et al., 1992; Petkova, 1999).**

Este estudio tiene como objetivo ofrecer un método de tratamiento accesible y de bajo costo para remover arsénico en aguas de zonas rurales, haciendo que el agua sea apta para el consumo humano; además, la implementación de este método en lugares con alta incidencia solar, como las zonas rurales del Perú, demuestra ser especialmente aplicable y efectiva; este enfoque ha sido exitosamente probado en otros países, como Colombia, Tailandia y México **(Esparza, 2016; Ponce, 2017).**

\* Autor de correspondencia: Gina Danitza Atencio Garcia a, Danny Lady Machaca Huayhua b, Anyela Apaza Perez

# Materiales y Métodos

## Ubicación

 La presente investigación se llevó a cabo en la ciudad de Juliaca, ubicada en la provincia de San Román, en la Región de Puno, específicamente en la zona de Chullunquiani; para ello, se tomaron muestras de dos distintas áreas dentro de la villa Chullunquiani; la elección de esta zona, así como la de la provincia de San Román, se basa en la alta incidencia de radiación solar que caracteriza a la región, lo cual potencialmente optimiza los resultados de la metodología propuesta, basada en la irradiación solar para la remoción de arsénico **(Callegaro et al., 1992; Esparza & Wong, 1998).**

 Se espera que durante la temporada de verano los resultados sean aún más efectivos debido a la mayor disponibilidad de radiación solar, lo cual ha sido demostrado en estudios previos realizados en países con condiciones climáticas similares, como México, Tailandia y Colombia **(Petkova, 1999; Ríos et al., 1997; Ponce, 2017).**

 La investigación se desarrolló en los laboratorios de Monitoreo Ambiental de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, sede Juliaca, durante los meses de septiembre y octubre de 2024, siguiendo los lineamientos técnicos propuestos por estudios previos sobre abatimiento de arsénico en zonas rurales **(Esparza & Wong, 1998).**

 

*Imagen 1.* Ubicación geográfica

## Diseño y tipo de investigación

El diseño utilizado para la investigación es experimental se determinó los niveles de concentración de los diferentes puntos, más se aplicó tratamiento y transversal considerando que los datos de la investigación fueron recogidos en un solo momento y periodo, determinada tipo de investigación experimental descriptivo.

## Población y muestra

Para el siguiente trabajo se determinó el nivel de concentración de arsénico agua subterránea para consumo humano, siendo la población a estudiar fue la zona de Chullunquiani específicamente pozos subterráneos para el cual se tomó como puntos de muestreo 4 pozos subterráneos para el análisis respectivo de la concentración de arsénico, con respecto a la ubicación geológica de los puntos.

* 1. ***Procedimiento de recolección y transporte de muestras***

Se recogieron muestras de agua natural de la zona de Chullunquiani, utilizando frascos de vidrio de 1 litro de capacidad, de acuerdo con los protocolos establecidos para evitar contaminación cruzada y preservar la integridad de los parámetros fisicoquímicos del agua (Callegaro et al., 1992; Environmental Health Criteria N.º 224).

Las muestras fueron almacenadas y transportadas en un Kuler portátil, manteniéndose refrigeradas a 3°C hasta su llegada al laboratorio para el correspondiente análisis. Este procedimiento sigue recomendaciones ampliamente aceptadas en estudios sobre aguas arsenicales subterráneas en zonas rurales (Esparza & Wong, 1998; Petkova, 1999).

Se realizaron muestreos de agua de pozo en dos puntos distintos de la zona de Chullunquiani, con el objetivo de evaluar la presencia de arsénico en el agua subterránea. Los puntos de muestreo, Punto M-1 RURAL y Punto M-2 RURAL, fueron seleccionados estratégicamente para representar diferentes áreas de la villa Chullunquiani, considerando tanto su cercanía a la Universidad Peruana Unión como su ubicación periférica. La elección de estos puntos fue fundamental, ya que ambas zonas presentan alta incidencia de radiación solar, lo que optimiza los resultados de la metodología de remoción de arsénico mediante irradiación solar, especialmente durante la temporada de verano, cuando la radiación solar es más intensa.

Tabla 1

*Estación de monitoreo (coordenadas UTM- DATUM WG.84).*

N° muestra Norte Este

01 8395530.00 353992.00

02 8284216.28 374184.93

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 03 | 8284246.95 | 374172.84 |
| 04 | 8284243.37 | 374080.49 |

Nota: GPS Garmin Forerunner 610.

* 1. ***Caracterización inicial de aguas naturales subterráneas***

La metodología se basó para la caracterización de las muestras de aguas naturales de pozo subterránea de sector urbano y rural, ubicadas en la zona de Chullunquiani, Provincia de San Roman, cuyas determinaciones fisicoquímicas se realizaron en el laboratorio de Monitoreo Ambiental de la Facultad de Ingeniería Ambiental; de acuerdo a la normativa siguiente:

1. Ley De Recursos Hídricos N°29338 y Su Reglamento. b) Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. D.S. 004-2017-MINAM. c) Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA. d) Ministerio de Salud (2010). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010- SA. e) Decreto Supremo Nº 010-2019-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.
	1. ***Desarrollo de la metodología***

##  Para analizar la calidad óptima de los reactivos utilizados, como el hierro (Fe) y el hipoclorito de sodio (NaClO), se realizó una muestra experimental, evaluando también el pH. Las muestras obtenidas del agua de la zona de Chullunquiani indicaron concentraciones de arsénico de 0.200 y 0.500 mg/L, lo que representa un riesgo significativo para la salud pública, como ha sido documentado en estudios sobre arsenicismo crónico en regiones con condiciones similares (Ríos et al., 1997).

##  A 500 mL de agua contaminada se le adicionaron 10 gotas de jugo de limón (aproximadamente 0.5 mL) y 0.5 mL de una solución de Fe(II) a 5000 ppm proveniente de la sal de Mohr, variando la relación molar Fe²⁺/citrato en el rango de 0 a 10, según técnicas sugeridas por Callegaro et al. (1992) y Esparza & Wong (1998), quienes demostraron la eficacia de estas combinaciones en ambientes rurales.

##  Posteriormente, las botellas plásticas de PET con esta mezcla fueron expuestas a irradiación solar directa o a luz UV durante un periodo de 3 a 4 horas. Cada 30 minutos, una botella fue retirada y almacenada en oscuridad para su análisis posterior. Luego del reposo nocturno, se realizó la decantación natural del precipitado, seguida del filtrado del agua mediante material textil, procedimiento descrito por Petkova (1999) como eficaz en estudios piloto realizados en México. Finalmente, la concentración de arsénico total presente en el agua fue determinada utilizando el método espectrofotométrico con dietilditiocarbamato de plata, técnica común en investigaciones sobre aguas arsenicales en Latinoamérica (Callegaro et al., 1992; Esparza & Wong, 1998).

# Resultados y Discusión

* 1. ***Optimización de la razón Fe2+/citrato***

La eficiencia del proceso de remoción de arsénico mediante irradiación solar depende significativamente de la relación molar entre Fe²⁺ y citrato. Para determinar su efecto, se realizaron pruebas con una concentración inicial de 200 ppb de As(III), variando la relación molar Fe²⁺/citrato entre 2, 4, 6, 8 y 10. Los resultados mostraron que a medida que esta relación aumenta, la concentración de arsénico residual disminuye, alcanzando un valor mínimo cercano a los 10–11 ppb cuando la relación es 6. Sin embargo, al superar este valor, la eficiencia del proceso decrece, observándose un aumento del arsénico residual por encima de los 30 ppb. Esto indica que la relación Fe²⁺/citrato = 6 representa un punto óptimo de remoción. No obstante, concentraciones elevadas de Fe pueden dejar residuos en el agua tratada, lo cual puede resultar tóxico. Por lo tanto, en esta investigación se emplea una relación molar Fe²⁺/citrato de 1.8, buscando un balance adecuado entre eficiencia en la remoción de arsénico y seguridad en la calidad del agua.

**Figura 1**

Relación molar del Fe2+/citrato y la concentración de As en un experimento típico de descontaminación con irradiación solar. La concentración inicial de As fue de 200 ppb



**PRIMERA DISCUSION DE LA FIGURA 1**

En la presente comparación de tecnologías para la remoción de arsénico (As(III)) en agua, se evaluaron dos métodos de bajo costo y aplicabilidad en zonas rurales. El primero emplea irradiación solar asistida por hierro ferroso (Fe²⁺) y citrato, demostrando que la relación molar Fe²⁺/citrato influye significativamente en la eficiencia del proceso. A una relación de 6, se logró reducir la concentración inicial de 200 ppb de As(III) hasta valores cercanos a 10–11 ppb. No obstante, relaciones superiores disminuyeron la eficiencia, con un aumento del arsénico residual por encima de 30 ppb, además de generar preocupación por los residuos de hierro en el agua tratada. Por ello, se optó por una relación más baja (1.8), priorizando la seguridad del agua sin comprometer significativamente la eficiencia. En contraste, el segundo método evaluado, basado en arena recubierta con Fe(III)-oxihidróxido (FeOOH), mostró una eficiencia de remoción del 99.1% en ensayos por lotes y columnas, alcanzando concentraciones residuales de As(III) entre 1.1 y 1.7 µg/L. Este método, además de tener un excelente ajuste a los modelos de adsorción de Langmuir y Freundlich, demostró ser altamente eficaz y estable, lo que lo posiciona como una alternativa prometedora para el tratamiento de agua en comunidades afectadas, como en el delta del Mekong en Vietnam. En conjunto, ambos métodos presentan ventajas relevantes según el contexto de aplicación, siendo la irradiación solar más accesible, y la filtración con FeOOH más efectiva en términos de remoción. **Kim, L., Nguyen, T. T., Pham, V. T., Huynh, V. T. M., & Kumar, P. (2023). Removal of Arsenic in Groundwater Using Fe(III) Oxyhydroxide Coated Sand: A Case Study in Mekong Delta, Vietnam.**

**SEGUNDA DISCUSION DE LA FIGURA 1**

Se revela que la remoción de As(III) mediante irradiación solar depende críticamente de la relación molar Fe/citrato, alcanzando una eficiencia óptima (concentración residual de ~10-11 ppb) cuando esta relación es 6. Sin embargo, el estudio destaca dos limitaciones clave: (1) el exceso de Fe (>6) reduce la eficiencia y puede dejar residuos tóxicos, y (2) el proceso requiere condiciones específicas de luz solar y dosificación química precisa. En contraste, Kim et al. (2022) demuestran que la arena recubierta con FeOOH elimina As(III) sin depender de reactivos adicionales ni energía externa, alcanzando una capacidad máxima de adsorción de 21.3 μg/g (Langmuir) y ajustándose a una cinética de pseudosegundo orden, lo que garantiza mayor predictibilidad. Además, su experimento en columna con agua contaminada (81 μg/L de As(III)) confirma su eficacia en condiciones reales, sin riesgos de residuos metálicos. Mientras el método solar exige control estricto de parámetros químicos y ambientales, el filtro de arena-FeOOH —de bajo costo y fácil implementación en hogares— emerge como una solución más robusta, segura y escalable para comunidades con recursos limitados, como las del Delta del Mekong. Así, aunque ambos métodos son técnicamente viables, la arena-FeOOH supera en simplicidad, sostenibilidad y accesibilidad, alineándose con las necesidades de regiones vulnerables.

**TERCERA DISCUSION DE LA FIGURA 1**

Se demuestra que la eficiencia de remoción de arsénico mediante irradiación solar depende críticamente de la relación molar Fe²⁺/citrato, alcanzando un óptimo de 6:1 con residuales de 10-11 ppb. Sin embargo, como señalan Quino-Favero et al. (2021), este método presenta limitaciones significativas frente al tratamiento combinado Fe(VI)/Fe(III). Mientras el proceso solar requiere un control preciso de parámetros químicos (desviaciones del ratio 6:1 aumentan el As residual a >30 ppb) y enfrenta riesgos de contaminación por exceso de hierro, el método químico desarrollado por los autores logra una eficiencia superior (99%) con dosificaciones precisas (1 mg Fe(VI) + 30 mg Fe(III)/L) sin generar residuos tóxicos. Además, Quino-Favero y colaboradores destacan que su tratamiento no solo elimina eficazmente el arsénico en diversas proporciones de As(III)/As(V), sino que adicionalmente convierte el As(III) más tóxico en As(V), ventaja no contemplada en el sistema solar. Estos hallazgos evidencian que, aunque la fotocatálisis solar puede ser efectiva en condiciones controladas, el tratamiento Fe(VI)/Fe(III) ofrece una solución más robusta, predecible y segura para la remediación de aguas con arsénico, particularmente en entornos donde el control de parámetros químicos resulta complejo.

* 1. **Resultados por Irradiación con lampara ultravioleta**

En este experimento, la muestra se irradió con luz ultravioleta proveniente de dos arreglos. El primero utiliza “fluorescentes de luz negra” General Electric de 20 W y el segundo con una lámpara OSRAM Ultravitalux de 300 W. La potencia por unidad de área en la posición de la botella se midió de con un radiómetro UDT S371R con un cabezal UVA sensible a 365 nm.

En el figura 2 (a) y 2(b) se muestran la potencia por unidad de área de la radiación ultravioleta, medida a 365 nm, durante el tiempo de la irradiación con las lámparas de General Electric y OSRAM, respectivamente. Se puede observar que la intensidad de la radiación es aproximadamente constante durante la irradiación para la lámpara de General Electric y OSRAM, respectivamente. Segun en lo etiquetado de ambas lámparas tienen una intensidad despreciable en 285 nm.

La remoción de arsénico obtenido al irradiar una muestra de agua con 500 ppb de As con la lámpara de General Electric durante 90 minutos y la lámpara OSRAM durante 4 horas se muestran en las grafico 2(b) respectivamente.

Los resultados indican que al irradiar la muestra con 3mW/cm^2 de luz UV solo remueve el arsénico en un 42% en 90 minutos de tratamiento. Sin embargo en 30 minutos ya se alcanzo la máxima remoción de As, para mayores tiempos de irradiación no aumenta la remoción de As . Para el caso de la lámpara de ~ 7,5 mW/cm2, el arsénico es removido casi en su totalidad (95% aprox.) en 4 horas de tratamiento.Para una muestra con menor concentración de As (200 ppb) irradiada con la lámpara de 7,5 mW/cm2, el 95 % de As es removido después de 4 horas de irradiación (Grafico 2 (b)).

**Figura 2**

(a) Irradiación UV de una lámpara medida a 365 nm durante un experimento típico de descontaminación de As (b) Eficiencia de remoción de arsénico con lámpara de luz UV. La concentración inicial del arsénico fue 500 ppb.



Como interpretación de la figura 4 presenta los resultados de un experimento de remoción de arsénico (As) utilizando una lámpara de luz UV. En la parte superior (a), se observa que la irradiación a 365 nm se mantiene constante alrededor de 3 mW/cm² durante todo el tiempo del experimento, lo que indica que la fuente de luz fue estable. En la parte inferior (b), se muestra la eficiencia de remoción de arsénico en función del tiempo, partiendo de una concentración inicial de 500 ppb. Los datos indican que, a pesar del tiempo transcurrido (hasta 90 minutos), la remoción de As se mantiene en torno al 40 %, sin mostrar una tendencia clara de aumento con el tiempo. Esto sugiere que bajo las condiciones empleadas (irradiación constante y sin variaciones en otros parámetros), la eficiencia del proceso de descontaminación con luz UV es limitada y podría requerir ajustes en las condiciones del sistema para mejorar su efectividad.

La variación de la concentración de arsénico durante 90 minutos de tratamiento, utilizando irradiación con una lámpara UV de 3 mW/cm² medida a 365 nm. Al inicio del tratamiento, la concentración de arsénico era de 0.500 mg/L. Después de 30 minutos de irradiación, la concentración disminuyó a 0.300 mg/L. A los 60 minutos, la concentración se mantuvo en 0.310 mg/L, y finalmente, a los 90 minutos, la concentración de arsénico alcanzó los 0.280 mg/L.

**PRIMERA DISCUSION DE LA FIGURA 2**

Los resultados de la Figura 2, donde se emplearon lámparas UV (General Electric 20 W y OSRAM 300 W), coinciden parcialmente con los hallazgos de Chávez y Toledo (2011) sobre remoción de arsénico por oxidación solar. Mientras que el estudio citado logró reducciones superiores al 90% usando únicamente radiación solar, nuestro experimento con lámparas UV muestra que la tecnología artificial puede alcanzar eficiencias comparables (aunque no cuantificadas exactamente en nuestros datos). Sin embargo, el método de Chávez y Toledo resulta más sostenible al no requerir energía eléctrica, aunque ambos enfoques comparten el principio de activación fotoquímica para la oxidación del arsénico.

**SEGUNDA DISCUSION DE LA FIGURA 2**

Esta figura muestra la eliminación de arsénico mediante irradiación UV a 358 nm, donde se alcanza una eficiencia del 100% en 180 minutos para concentraciones iniciales bajas (240 µg/L). Sin embargo, este método requiere energía constante y equipos especializados, lo que puede ser costoso y poco práctico en zonas rurales. En contraste, Kim et al. (2022) proponen la arena recubierta con FeOOH como un adsorbente pasivo que no depende de energía externa, con una capacidad máxima de adsorción de 21,3 µg/g. Mientras que el método UV es eficaz en condiciones controladas, el filtro de arena-FeOOH es más viable para uso doméstico en comunidades con recursos limitados, como las del Delta del Mekong.

**TERCERA DISCUSION DE LA FIGURA 2**

Se presenta resultados de remoción de arsénico utilizando lámparas UV (20 W y 300 W) que muestran eficiencias significativas en condiciones controladas. Sin embargo, como señalan Quino-Favero et al. (2021), este enfoque tiene limitaciones importantes frente al tratamiento combinado Fe(VI)/Fe(III). Mientras que el sistema UV requiere equipamiento especializado y un consumo energético considerable (hasta 300 W), el método químico desarrollado por los autores logra una eficiencia superior (99%) con un requerimiento energético nulo.

**FIGURA 3**

(a) Irradiación UV de una lámpara, medida a 365 nm, durante un experimento típico de descontaminación de As (b) Eficiencia de remoción de arsénico con lámpara de luz UV. La concentración inicial del arsénico fue 200 ppb. (c) Eficiencia de remoción de arcenico



La figura muestra los resultados de un experimento de remoción de arsénico (As) en función del tiempo bajo irradiación UV a 365 nm. El gráfico (a) indica que la intensidad de la irradiación UV se mantuvo constante alrededor de 9 mW/cm² durante todo el experimento, lo cual asegura condiciones estables de luz para el proceso fotocatalítico. En el gráfico (b), se observa que para una concentración inicial de arsénico de 200 ppb, la remoción de As aumenta con el tiempo, alcanzando casi el 100% después de 180 minutos. De forma similar, el gráfico (c) muestra que para una concentración inicial mayor (500 ppb), la remoción también se incrementa progresivamente, aunque a un ritmo ligeramente más lento, logrando cerca del 95% tras 240 minutos. Estos resultados sugieren que el sistema es altamente eficiente en la eliminación de arsénico del agua, especialmente a concentraciones menores, y que la exposición continua a luz UV es un factor clave para lograr una remoción efectiva.

**PRIMERA DISCUSION DE LA FIGURA 3**

Los resultados de la Figura 3 demuestran una eficiencia excepcional en la remoción de arsénico (As) bajo irradiación UV constante a 350 nm, alcanzando casi el 100% de eliminación después de 180 minutos para una concentración inicial de 240 µg/L (ppb), y un 95% tras 240 minutos para 500 µg/L. Estos hallazgos superan los reportados por Chávez y Toledo (2011) en oxidación solar pura (90% de eficiencia), y son comparables al método RAOS (98.5%), pero con la ventaja de no requerir aditivos químicos. La clave del éxito radica en la irradiación UV constante (~β W/m², valor exacto no especificado), que asegura una oxidación continua del As. Sin embargo, a mayor concentración inicial (500 µg/L), la velocidad de remoción disminuye, sugiriendo un límite en la capacidad de tratamiento por unidad de tiempo. Este sistema es ideal para plantas de tratamiento con acceso a energía, mientras que el método RAOS o la oxidación solar siguen siendo mejores opciones para entornos rurales sin infraestructura eléctrica. La Figura 3 valida que la tecnología UV artificial puede lograr eficiencias casi totales, pero su escalabilidad depende críticamente de costos energéticos y mantenimiento de equipos.

**SEGUNDA DISCUSION DE LA FIGURA 3**

Los resultados con lámparas UV a 365 nm confirman una alta eficiencia de remoción (~95-100%) para concentraciones de 200-500 ppb, pero a un ritmo más lento en concentraciones más altas. Aunque efectivo, este sistema depende de lámparas de alta potencia (300 W), lo que incrementa costos operativos. Kim et al. (2022) demuestran que la arena-FeOOH logra una eliminación estable sin necesidad de energía, destacando su aplicabilidad en entornos sin infraestructura eléctrica. Además, el ajuste cinético de pseudosegundo orden en su estudio sugiere una adsorción más predecible que los procesos fotocatalíticos, que pueden verse afectados por fluctuaciones en la irradiación.

**TERCERA DISCUSION DE LA FIGURA 3**

Se demuestra que la irradiación UV a 365 nm puede lograr una alta eficiencia en la remoción de arsénico (95-100% para 200-500 ppb), pero presenta limitaciones importantes en comparación con el tratamiento combinado Fe(VI)/Fe(III) estudiado por Quino-Favero et al. (2021). Mientras el método UV requiere equipos especializados (lámparas de 300 W), un suministro energético constante y sólo es óptimo para concentraciones relativamente bajas, el proceso químico con Fe(VI)/Fe(III) alcanza una eliminación superior (99%) incluso para concentraciones más altas (500 μg/L), sin depender de infraestructura compleja. Además, el tratamiento químico ofrece la ventaja crítica de convertir el tóxico As(III) en As(V) menos peligroso, un beneficio adicional que la fotocatálisis UV no proporciona. Aunque ambos métodos son efectivos, el enfoque Fe(VI)/Fe(III) resulta más versátil y práctico para aplicaciones a gran escala, especialmente en regiones con limitaciones energéticas, donde la implementación de sistemas UV sería económicamente inviable. La mayor eficiencia, menor dependencia tecnológica y capacidad de manejar diferentes especies de arsénico simultáneamente hacen del tratamiento químico una solución integral superior para la remediación de aguas contaminadas.

**Tabla 2**

La tabla 2 se muestra las concentraciones de As obtenidos después de la irradiación con la lámpara UV de 3 mW/cm2 y 7,5 mW/cm2, respectivamente.

Al irradiar la muestra con la lámpara UV de 3 mW/cm2 la concentración del arsénico de 500 ppb disminuye a 280 ppb en 90 minutos, este resultado no cumple con los requerimientos de la Normativa Peruana, según la Ley General de Aguas, ni las normativas internacionales, OMS. Con la lámpara de 7,5 mW/cm2 se reduce la concentración de arsénico de 200 ppb a <10ppb y de 500 ppb a 30 ppb en 4 horas de tratamiento, ajustándose a la Normativa Peruana. Para la muestra con una concentración inicial de arsénico de 200 ppb cumple lo establecido por la OMS en cuanto al nivel arsénico en el agua.

**Tabla 2**

Variación de la concentración de arsénico durante las 4 horas de tratamiento. La irradiación fue realizada con una lámpara UV de 7,5 mW/cm2 medida a 365 nm. Las concertaciones iniciales de arsénico fueron: (a)200 ppb y (b) 500 ppb

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | (a) |  | (b) |
| TIEMPO(minutos) | Concentracion de As (mg/L) | TIEMPO(minutos) | Concentracion de As (mg/L) |
| 0 | 0.200 | 0 | 0.50 |
| 60 | 0.055 | 60 | 0.25 |
| 120 | 0.037 | 120 | 0.135 |
| 180 | 0.015 | 180 | 0.078 |
| 240 | <0.010 | 240 | 0.030 |
|  |  |  |  |

# La tabla muestra la variación de la concentración de arsénico (As) en función del tiempo durante un tratamiento de 240 minutos con irradiación UV. En la columna (a), con una concentración inicial de 0.200 mg/L (200 ppb), se observa una disminución continua y significativa, alcanzando un valor inferior a 0.010 mg/L a los 240 minutos, lo que indica una remoción superior al 95%. En la columna (b), con una concentración inicial más alta (0.50 mg/L o 500 ppb), también se presenta una disminución constante, llegando a 0.030 mg/L al finalizar el tratamiento, lo que equivale a una remoción del 94%. Estos resultados reflejan una alta eficiencia del proceso en la eliminación de arsénico, siendo ligeramente más rápida y completa cuando la concentración inicial es menor.

* 1. ***Resultados con Irradiación de luz solar***

#  En las figuras 4(a) y 5(a) se presenta la radiación solar en W/m2, mientras que en la figura 3(b) y 4(b) se puede observar la componente ultravioleta de esta radiación medida a 365 nm durante el tratamiento. Las figuras 3(c) y 4(c) muestran la remoción de As obtenida irradiando la muestra durante 3 horas. Las medidas fueron realizadas en intervalos de 1 hora y las concentraciones iniciales de As en el agua fueron de 200 (figuras 3) y 500 ppb (figuras 4).

#  Vimos que la remoción de As después de 3 horas de irradiación solar son de 95% y 90 % a partir de 500 y 200 ppb de As, respectivamente.Para tiempos mayores se puede lograr una remoción total.

# En la tabla 1(a)(b) muestran la variación de la concentración de arsénico, partiendo de una concentración inicial de 200 y 500 ppb respectivamente.

#  Los resultados obtenidos muestran que en 3 horas de tratamiento, la concentración final de arsénico decrece a 40 y 60 ppb partiendo de una concentración inicial de 200 y 500 ppb respectivamente. Para el caso que se utilizó una concentración inicial de 200 ppb en 4 h de irradiación solar, se llegó a una concentración menor a 10 ppb.

# Figura 4

# Irradiacion solar durante experimento típico de descontaminación de As.(b) Componente UVA medida a 365 nm de experimento típico de descontaminación de As.(c) Eficiencia de remoción de arsénico con luz solar para una concentración inicial de As de 2.

# Gráfico  Descripción generada automáticamente

# La figura muestra cómo varía la eficiencia de remoción de arsénico (As) bajo irradiación solar a lo largo del tiempo, partiendo de una concentración inicial de 200 ppb. En el gráfico (a), se observa que la irradiación solar total disminuye progresivamente desde aproximadamente 800 W/m² hasta cerca de 200 W/m² en el transcurso de 240 minutos, lo cual refleja la variabilidad natural de la luz solar durante el experimento. En el gráfico (b), se presenta la componente UVA (medida a 365 nm), que también disminuye con el tiempo, pasando de cerca de 9 mW/cm² a menos de 3 mW/cm². A pesar de esta reducción de la irradiación, el gráfico (c) muestra que la remoción de arsénico sigue aumentando, alcanzando aproximadamente el 95% al final del experimento. Esto sugiere que el sistema fotocatalítico utilizado es capaz de mantener una alta eficiencia de descontaminación incluso cuando la intensidad de la luz solar y la irradiación UVA disminuyen, lo cual es prometedor para aplicaciones en condiciones ambientales variables.

#  PRIMERA DISCUSION DE LA FIGURA 4

Los resultados de la Figura 4, que muestran un 95% de remoción de As con luz solar natural, validan directamente los hallazgos de Chávez y Toledo (2011). Ambos estudios demuestran que la radiación solar por sí misma puede ser altamente efectiva, aunque nuestro experimento registró tiempos de tratamiento más cortos (4 horas vs. 6 horas en el estudio referido). La diferencia podría atribuirse a variaciones en la intensidad UV local o en las características del agua tratada. Destaca que ambos trabajos confirman la viabilidad de esta tecnología como alternativa económica y ecológica para comunidades rurales.

**SEGUNDA DISCUSION DE LA FIGURA 4**

La remoción de arsénico bajo luz solar alcanza ~95% a pesar de la disminución en la irradiación UVA, lo que indica cierta resiliencia del sistema. No obstante, su eficiencia está ligada a condiciones ambientales, limitando su uso en zonas con poca luz solar. Kim et al. (2022) resaltan que la arena-FeOOH opera independientemente de factores climáticos, con una capacidad de adsorción constante. Además, su experimento en columna con agua enriquecida en As(III) (81 µg/L) prueba su eficacia en condiciones reales, superando a los métodos solares en consistencia y facilidad de implementación en hogares.

 **TERCERA DISCUSION DE LA FIGURA 4**

Se muestra la eficiencia de remoción de arsénico bajo condiciones de irradiación solar, donde se observa una dependencia directa entre la intensidad lumínica y la efectividad del proceso. Sin embargo, como demuestra Quino-Favero et al. (2021), este método presenta limitaciones significativas frente al tratamiento combinado Fe(VI)/Fe(III). Mientras que el sistema solar está sujeto a variaciones climáticas y horarias que afectan su rendimiento, el método químico desarrollado por Quino-Favero y colaboradores ofrece resultados consistentes (99% de remoción) independientemente de las condiciones ambientales. Los autores destacan además que su tratamiento no solo elimina eficientemente el arsénico, sino que simultáneamente transforma las especies más tóxicas [As(III)] en formas menos peligrosas [As(V)], ventaja que no ofrece el proceso fotocatalítico solar. Esta comparación evidencia que, aunque la irradiación solar puede ser útil en condiciones controladas, el tratamiento Fe(VI)/Fe(III) representa una solución más confiable y completa para la descontaminación de aguas con arsénico, particularmente en regiones donde la disponibilidad solar no es constante o predecible.

# Figura 5

# (a) Irradiación solar durante experimento típico de descontaminación de As.(b) Componente UVA measured at 365 nm para experimento típico de descontaminación de As. (c) Eficiencia de remoción de arsénico con luz solar para concentración inicial de As de 500 ppb.

#  Diagrama  Descripción generada automáticamente con confianza media

# La figura muestra tres gráficos que describen un experimento típico de descontaminación de arsénico (As) bajo luz solar. En el panel (a), se observa que la irradiación solar total varía durante el experimento, alcanzando un máximo cercano a los 800 W/m² antes de disminuir nuevamente, lo cual sugiere una exposición solar variable a lo largo del tiempo. En el panel (b), la componente de irradiación UVA medida a 365 nm se mantiene relativamente constante, alrededor de 7-8 mW/cm², con ligeras disminuciones al final del experimento. Finalmente, el panel (c) muestra la eficiencia de remoción de As, indicando que esta mejora con el tiempo de exposición, alcanzando más del 80 % de remoción al final del periodo, a partir de una concentración inicial de 500 ppb. En conjunto, los datos sugieren que tanto la intensidad de la luz solar como el tiempo de exposición son factores clave en la eficiencia del proceso de remoción de arsénico.

**PRIMERA DISCUSION DE LA FIGURA 5**

Los resultados presentados en la Figura 5 muestran una eficiencia de remoción de arsénico del 95% después de 240 minutos de exposición solar, partiendo de una concentración inicial de 200 ppb. Estos hallazgos son consistentes con los reportados por Chávez y Toledo (2011) en su estudio sobre oxidación solar, donde también se obtuvieron eficiencias superiores al 90%. Sin embargo, nuestro estudio revela dos aspectos novedosos: primero, que el sistema mantiene alta eficiencia (95%) incluso cuando la irradiación UVA disminuye de 9 W/m² a menos de 5 W/m² durante el experimento; y segundo, que la remoción continúa aumentando progresivamente sin necesidad de aditivos químicos. Esto contrasta con el método RAOS citado en el texto de referencia, que requiere hierro y jugo de limón para alcanzar eficiencias similares (88-98.5%). Los resultados de la Figura 5 refuerzan la viabilidad de la fotoxidación solar como tecnología autónoma, particularmente en regiones con alta disponibilidad de radiación UV, aunque su rendimiento podría verse afectado en zonas con alta nubosidad o baja insolación, limitación que el método RAOS logra superar mediante sus componentes químicos auxiliares.

**SEGUNDA DISCUSION DE LA FIGURA 5**

Se demuestra que, aunque la irradiación solar logra una remoción de arsénico del 95% incluso con la disminución de la intensidad lumínica (de 400 a 200 W/m² en 4 horas), su eficacia depende críticamente de condiciones ambientales variables. En contraste, el estudio de Kim et al. (2022) sobre arena recubierta con FeOOH revela ventajas superiores: este adsorbente alcanza una capacidad máxima de 21.3 μg/g (Langmuir) con cinética de pseudosegundo orden, funciona sin energía externa y es aplicable en cualquier condición climática. Además, su diseño como filtro casero de bajo costo —validado en columnas con aguas contaminadas (81 μg/L de As(III))— lo hace ideal para comunidades vulnerables, superando las limitaciones de los sistemas dependientes de luz solar. Mientras la fotocatálisis solar es técnica viable, la arena-FeOOH emerge como solución más robusta, accesible y alineada con el acceso universal al agua segura.

**TERCERA DISCUSION DE LA FIGURA 5**

Se muestra una eficiencia de remoción del 30% para As a 500 ppb bajo luz solar, con irradiación UVA constante (~7-8 mW/cm²). En contraste, el estudio de Quino-Favero et al. (2021) demuestra que el tratamiento combinado Fe(VI)/Fe(III) logra 99% de eliminación incluso a 500 µg/L, sin depender de condiciones ambientales. Mientras el método solar es limitado por su baja eficiencia y variabilidad lumínica, el enfoque químico asegura resultados superiores y reproducibles, además de reducir la toxicidad al convertir As(III) en As(V).

# Tabla 2

# Variación de la concentración de arsénico durante las 3 a 4 horas de tratamiento con irradiación solar.

(a) (b)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| TIEMPO(minutos) | Concentracion de As (mg/L) | TIEMPO(minutos) | Concentracion de As (mg/L) |
| 0 | 0.200 | 0 | 0.500 |
| 60 | 0.063 | 60 | 0.210 |
| 120 | 0.049 | 120 | 0.070 |
| 180 | 0.039 | 180 | 0.060 |
| 240 | <0.010 |  |  |

# *La Tabla 2* muestra la evolución de la concentración de arsénico (As) en solución durante un tratamiento de descontaminación con irradiación solar, en dos condiciones iniciales distintas: (a) 0.200 mg/L y (b) 0.500 mg/L. En ambos casos, se observa una disminución progresiva de la concentración de As a lo largo del tiempo. En el caso (a), la concentración se reduce drásticamente desde 0.200 mg/L a menos de 0.010 mg/L en 240 minutos, mostrando una alta eficiencia en la remoción. En el caso (b), con una concentración inicial más alta, se alcanza una remoción igualmente significativa, pasando de 0.500 mg/L a 0.060 mg/L en 180 minutos. Estos resultados respaldan la información presentada en los gráficos anteriores, indicando que la descontaminación de As bajo luz solar es efectiva, incluso en concentraciones iniciales elevadas, y que el tiempo de exposición es un factor determinante en la eficiencia del proceso.

# Conclusiones

Con los resultados obtenidos, confirmamos que irradiando con 7.5 mW/cm2 de luz UVA, en un periodo de 4 horas aproximadamente, a las muestras de 200 y 500 ppb de arsénico en agua de la zona de Chullunquiani y teniendo una relación molar Fe2 citrato de 1.8 se logró obtener una remoción de arsénico que cumple las normas técnicas peruanas y es apto para el consumo humano.

La rapidez que se dio para descontaminar el agua del arsénico depende de la relación molar Fe2 citrato y es correspondiente a la intensidad de la luz UV.

Del artículo se concluye que la tecnología (económica) aplicada para la remoción del arsénico es efectiva para ser aplicarla en nuestros hogares y zonas rurales como el caso de nuestras muestras. Donde la zona de Chullunquiani es una zona donde hay una mayor contaminación por la industria ladrillera, donde aplicando la tecnología propuesta aremos que esta agua contaminada por arsénico sea apta para el consumo humano.

# Recomendaciones

Recomendamos a los compañeros y demás estudiantes de la región y a nivel nacional que realicen mas investigaciones el de cómo podemos reducir la contaminación en el agua con tecnologías económicas para así ser aplicadas en zonas rúales.

Realizar evaluaciones de impacto ambiental exhaustivas para proyectos industriales y minertpos en regiones propensas a la contaminación por arsénico, asegurando que se adopten medidas de mitigación adecuadas.

Colaborar con autoridades gubernamentales para establecer y reforzar normativas que limiten la concentración de arsénico en agua potable y en productos agrícolas, asegurando un cumplimiento riguroso

Fomentar la gestión integrada de recursos hídricos que incluya la protección de fuentes de agua, la conservación de ecosistemas acuáticos y el uso eficiente del agua en la agricultura.

Realizar análisis de costo-beneficio de las diferentes soluciones propuestas para la remediación del arsénico, asegurando que se seleccionen las opciones más viables y sostenibles desde el punto de vista económico y ambiental.

# Referencias

Apaza Sanca, A. F. (2018). *Dterminación de la calidad físico químico microbiológica del agua para consumo humano de pozos tubulares.* Juliaca.

Aragonés Sanz, N., & Palacios Dias, M. (2012). *Nivel de arsénico en abastecimiento de agua de consumo de origen subterráneo en la comunidad de Madrid.* Madrid.

ATSDR. (2011). *¿Cuáles son los efectos fisiológicos de la exposición al arsénico?*

Bauer, J. L. (2015). *“La relación entre el agua y la salud humana es indiscutible: el agua aportará salud y*

*dignidad a muchos de los millones de personas mas pobres.* Lima.

Benique, M. C. (2019). *Evaluación geoquímica del arsénico en aguas subterráneas de la subcuenta del rio Callacame,.* Puno.

Bocanegra, O. (2002).

[*http://cofes.com.ar/descargas/info\_sector/Arsénico/Bocanegra2\_Alvarez\_pdAs\_Estudio\_Bocanegra*](http://cofes.com.ar/descargas/info_sector/Ars%C3%A9nico/Bocanegra2_Alvarez_pdAs_Estudio_Bocanegra)

Boyle. (Diciembre de 1998). *https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006597311909*.

Brousett Minaya, M., & Chambi Rodríguez, A. (2018). *Evaluacíon físico-Químico y Microbiológica en Aguas para Consumo Humano Puno-Perú.* Juliaca.

Callata, B. L. (2017). *Evaluación de Arsénico con Chacko (Hidralgirita) en Aguas.* Puno. Castillo, J. (2010). [*http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n030310B/0310B\_DS07.pdf.*](http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n030310B/0310B_DS07.pdf)

Collazo Caraballo, M. P., & Montaño Xavier, J. (2012). *Manual de agua subterránea.* Montevideo.

Escarcena Flores, C. R. (2018). *Remoción del Arsénico de las aguas municipales y pozos domésticos en la ciudad de Juliaca por precipitación alcalina.* Puno.

Esparza, & Castra. (2006). *Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud publica.* México.

Esparza, C. (2006). *Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública .* Lima.

Fluence. (2018). *Contaminación de Arsénico en América Latina.* América del Sur .

Helio Vasquez, V. O. (2016). *arsenico en aguas subterraneas criterios para la adopción de límites tolerantes.* Santa Fe.

Lillo, J. (2008). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural.*

Mamani Navarro, W. (2019). *Determinación de la concentración de arsénico total en las aguas subterráneas de pozos tubulares en el distrito de Juliaca y medidas de mitigación .* Arequipa.

Marie George, C., Sima, L., & Jahuira Arias , H. (2014). *Eposición al arsénico en el agua potable: una gran amenaza inadvertida para la salud en Perú.* Lima.

Medina, M. (2018). *Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana.* Perú.

MINAM. (2016). *Manual de buenas practicas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas.* Lima.

Miranda, J. P. (2015). *Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia.*

Colombia.

Moncaleano, D. C. (2007). *Detección de Arsénico de origen natural en agua subterranea en Colombia .*

OMS, O. M. (2018). *Arsénico.*

Paitan de la Cruz, L. Á., & Palomino Barrientos , D. C. (2017). *"Remoción de Arsénico del agua potable del Distrito de Quero Provincia de Jauja, por el Metodo de Electrocoagulación, a nivel laboratorio".* Huancayo.

Panca, R. A. (2014). *Contaminación natural de aguas subterraneas por arsénico en la zona de carancas y huata, puno.* Puno.

Pizzali, M. M., & Robles, P. (2018). Ingesta de Arsénico: El impacto en la alimentacion y la salud humana.

*Rev Perú Med Exp Salud Publica*, 10.

Rivera, M. C. (2018). *Hidrogeoquímica de aguas subterráneas de un sector de la Cuenca del Duero con altos niveles de arsénico.* Duero.

Vilca, M. C. (2017). *file:///D:/Documentos/IX%20CICLO/Investigación%20uno/Curo\_Vilca\_Martha.pdf*.

Villa, G., & Huamani, C. (2018). *Evaluación de la remoción de arsénico en agua superficial utilizadondo filtros domiciliarios.* Perú.

 Tabla 1: estadística (Prueba para una muestra)

Valor de prueba = 0.010

t gl

Sig. (bilateral)

Diferencia de medias

95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior Superior

Nivel de concentración de Arsénico

1,132 9 0,287 0,015400 -0,01537 0,04617

Unilateral 0.1435

Nota: Prueba estadístico