

Removal of arsenic by solar oxidation from groundwater in the town of Cruz de Medano, Lambayeque

Remoción de arsénico por oxidación solar de aguas subterráneas del centro poblado Cruz de Medano, Lambayeque

Bryan Ruben's Ramos Dávila Ing.¹, Juan Carlos Flores-Cerna, M Cs^{1,2},

¹Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, bryanramos0112@gmail.com, juan.flores@upn.pe

²Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, jfloresc@unc.edu.pe

Abstract - Groundwater for human consumption with high arsenic concentrations is considered a public health problem. This problem occurs in the town of Cruz de Medano, district of Mórrope - Lambayeque, since they lack drinking water and instead use groundwater, which is extracted from wells, which is why the objective of this research focused on calculating the removal of arsenic by solar oxidation of groundwater in that place, using steel wool, citric acid and time to solar exposure. The experimental part was carried out in the same town center, finding an initial concentration of 0.1154 mg As/L in the groundwater, after which 8 treatments were carried out, each containing one liter of water to be treated, and different amounts and concentrations of the variables indicated for reduction were added. The treated samples were preserved and then sent for the respective analysis to the accredited laboratory, achieving a 97.11% reduction of the initial arsenic, where it is concluded that the proposed method complies as an alternative that can be applied for the decontamination of water for human consumption in areas with the same problem.

Keywords-- arsenic, citric acid, solar radiation.

Resumen - Las aguas subterráneas para consumo humano con elevadas concentraciones de arsénico son consideradas un problema para la salud pública. Este problema ocurre en el centro poblado Cruz de Medano, distrito de Mórrope - Lambayeque, ya que carecen de agua potable y en su lugar se hace uso de agua subterránea, la misma que es extraída de los pozos, es por ello que el objetivo de esta investigación se centró en calcular la remoción de arsénico por oxidación solar de aguas subterráneas en dicho lugar, utilizando lana de acero, ácido cítrico y el tiempo a la exposición solar. La parte experimental se realizó en el mismo centro poblado, encontrando en las aguas subterráneas una concentración inicial de 0.1154 mg As/L, posterior a ello se realizaron 8 tratamientos conteniendo cada uno un litro de agua a tratar, se añadió distintas cantidades y

concentraciones de las variables indicadas para la reducción. Las muestras tratadas fueron preservadas y luego enviadas para el respectivo análisis al laboratorio acreditado, lográndose una reducción del 97.11% del arsénico inicial, donde se concluye que el método planteado cumple como una alternativa que puede aplicarse para la descontaminación de aguas para consumo humano en zonas con la misma problemática.

Palabras clave: arsénico, ácido cítrico, radiación solar.

I. INTRODUCTION

La presencia de Arsénico en aguas subterráneas destinadas para consumo humano se ha convertido en uno de los problemas que afecta a poblaciones enteras de distintas partes del mundo, sobre todo en aquellas consideradas de bajo nivel económico. El problema es debido a factores naturales y a las mismas actividades humanas, las concentraciones de arsénico en estas aguas sobrepasan considerablemente el límite de 0.01 mg/L establecido por la Organización Mundial de la Salud. [1]

Este problema se ha percibido en gran dimensión en zonas que pertenecen a países como India, China, Nepal, Vietnam, Hungría, Rumania, Taiwán, Estados Unidos y Bangladesh, siendo estos dos últimos donde se han dado un gran número de estudios complejos referentes al tema [2]. Por otro lado, en América Latina se han observado casos muy relevantes dentro de Argentina, Chile y México; en este último país, por ejemplo, se encontró que de los 36 pozos subterráneos que abastecían de agua para consumo a la población del estado de Colima, el 80.5% tenían concentraciones de arsénico que superaban lo aceptable [2]. En países como Japón, Argentina, Nueva Zelanda, EE.UU., Dominica, Islandia, Kamchatka y Francia, el origen del problema que se da por la presencia de altas concentraciones de arsénico en el agua subterránea está directamente relacionado con procesos hidrotermales; mientras que los casos de Chile, Ghana, Tailandia y Grecia

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.592>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

están relacionados a depósitos minerales y a la presencia de actividad minera [3].

Casos como los mencionados se replican en más partes del mundo convirtiéndose en una situación potencialmente peligrosa debido a que la ingesta prolongada de arsénico a través del agua y otros medios trae consecuencias críticas en la salud humana. [2] manifiesta que se verían afectados varios sistemas como el digestivo, cardiovascular, inmunológico, entre otros; pero principalmente afectaciones a la piel. Esta información es avalada por el organismo científico International Agency for Research on Cancer (IARC), quien considera al arsénico como un agente cancerígeno para los humanos basándose en estudios que demuestran que el cáncer de piel está relacionado con pacientes que ingirieron arsénico a través del agua. [4]

El Perú no es ajeno a esta problemática, diversas investigaciones han demostrado que el agua de consumo proveniente de aguas subterráneas en regiones como Apurímac, Lima, Puno, Ayacucho, Lambayeque y otras, contienen concentraciones de arsénico elevadas que pueden perjudicar a la población. Entre ellas, la Laguna Aricota ubicado en Moquegua presenta este problema que pudo haberse originado debido a que los ríos afluentes de esta laguna pasan por el volcán Yucamane lo que provoca una contaminación natural de arsénico; a pesar de ello la población de la ciudad de Ilo usa el agua de la laguna en mención para fines domésticos e industriales [4]. En el 2012 cuando un grupo de investigadores peruanos y norteamericanos, analizaron 151 muestras provenientes de ríos, tuberías de agua potable y caños municipales de Lima, Juliaca, La Oroya y Puno, demostraron que el agua recogida directamente de las tuberías de agua potable, obtuvo 10 mg/L de concentración de arsénico, cantidad que excedía los límites de arsénico establecidos por la OMS para el agua potable. [5]

En la actualidad, este problema persiste como en el caso de Lambayeque, que en el último año ha sido punto de preocupación debido a que la población del distrito de Mórrope, quienes se abastecían de agua proveniente de pozos subterráneos, venían consumiendo agua con contenido de arsénico muy por encima del límite permitido por el [6]. El Centro Nacional de Salud Ocupacional y Protección del Ambiente para la Salud [CENSOPAS], informó que el gran porcentaje de pozos ubicados en el distrito en mención estaban contaminados con arsénico e incluso con plomo; ello conllevó a que en mayo del mismo año la Presidencia del Consejo de Ministros (PCM) declarara en estado de emergencia a los caseríos que comprenden el distrito de Mórrope, los cuales son Arbolsol, Carrizal, Casa Blanca, Fanupe Barrio Nuevo, Lagunas, Quemazón, Santa Isabel, Tranca Fanupe, Tranca Sasape y Cruz del Medano; este último de especial consideración debido a que alberga a la gran parte de personas afectadas.

Posterior a ello, el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional en conjunto con las autoridades involucradas en este problema, emitieron un informe técnico que mencionaba principalmente a la distribución de agua potable a través de cisternas y la sensibilización a la población como las primeras medidas adoptadas para evitar que la población continúe expuesta a consumir agua con contenido de arsénico; adicionalmente en este informe se detalla que se tienen como opciones de solución la colocación de filtros para eliminación de arsénico en los pozos subterráneos, la construcción de una planta de tratamiento, el abastecerse de agua potable traída de Chiclayo y la extracción de agua del pozo de la Playa de San Pedro de Mórrope, todas ellas involucran contar con un presupuesto aproximadamente de 8 millones de soles.

Una declaratoria de emergencia se ha extendido en más de 7 oportunidades, debido a que aún no se implementa una solución para este problema de arsénico en el agua, esto debido a que a la fecha no se cuenta con el presupuesto necesario para la ejecución de proyectos que permitan dar solución a este problema; mientras tanto, la población sigue siendo abastecida de agua por camiones cisternas en determinados días, lo cual genera en la población una incomodidad que los lleva a seguir utilizando el agua de los pozos subterráneos, como es el caso del Caserío Cruz del Medano. En este lugar que cuenta con la mayor cantidad de población, se sigue empleando el agua que llega a sus caños y también del pozo antiguo que se encuentra en su plaza central, a pesar de tener conocimiento de la contaminación que existe y los efectos que tendría para su salud. [6]

Esta problemática demanda que se apliquen con urgencia tratamientos necesarios para reducir las concentraciones de este metal en el agua; sin embargo, como se puede observar estos tienden a ser costosos y solo se aplican en determinadas zonas; por ello se plantea realizar el proyecto “Remoción de arsénico por oxidación solar de aguas subterráneas del centro poblado Cruz del Medano, Lambayeque” a fin de que sea una alternativa efectiva, rápida y accesible para la población.

II. METODOLOGIA

A. *Tipo de investigación*

Esta investigación es experimental, puesto que se manipularán 3 variables independientes, donde se aplicarán en 8 tratamientos con distintas cantidades de insumos y tiempo de exposición solar sobre la variable dependiente, lo cual con dicho tratamiento busca dar una solución de la problemática expuesta dada en el centro poblado Cruz del Medano con los conocimientos adquiridos durante la formación profesional, con el fin de implementar de forma práctica la técnica de solución que es el método de Radiación Solar. Así mismo, se contará con una muestra inicial sin ningún tratamiento

identificado como T₀, siendo éste nuestra muestra inicial sin tratamiento. [7]

TABLA 1
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Variables para la remoción de arsénico						
Tratamientos	Ácido cítrico		Lana de acero		Exposición Solar	Replicas
	3%	6%	1g	2g	3h 6h	
T ₀	0mL		0g		0h	
T ₁	1 mL (3%)		1g		3h	
T ₂	1 mL (3%)		1g		6h	
T ₃	1 mL (3%)		2g		3h	
T ₄	1 mL (3%)		2g		6h	3
T ₅	1 mL (6%)		1g		3h	
T ₆	1 mL (6%)		1g		6h	
T ₇	1 mL (6%)		2g		3h	
T ₈	1 mL (6%)		2g		6h	

B. Población y muestra

- Población

Toda el agua disponible proveniente de pozos subterráneos del centro poblado de Cruz de Medano y destinados para consumo humano, ubicado en Mórrope en la provincia y departamento de Lambayeque en el mes de febrero del 2021.
- Muestra

La muestra tiene carácter No probabilístico, por conveniencia, comprende de agua proveniente de 2 diferentes pozos ubicados en la localidad de Cruz de Medano distrito de Mórrope, Lambayeque. Los pozos fueron muestreados el día 27 de febrero del año 2021, en la cual para la recolección de la muestra para el pozo 1 y pozo 2 se realizó según [8], los puntos de muestreo, son: la plaza del centro poblado y la zona de distribución de agua. Por consiguiente, se extrajo 13.5 litros de agua por cada punto y se obtiene un total de 27 litros.

Mapa de ubicación de puntos de muestreo en el centro poblado de Cruz del Medano-Región Lambayeque

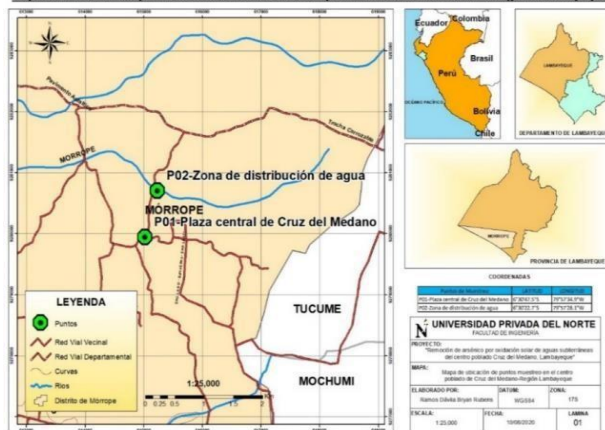


Figura 1. Mapa de los Puntos de muestreo

TABLA 2
COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREOS

PUNTO DE MUESTREO	COORDENADAS	
	X	Y
Pozo 01: Plaza central de Cruz del Médano	-6.5132	-79.9597
Pozo 02: Zona de distribución de agua	-6.5063	-79.9578

C. Materiales, reactivos e instrumentos

- Materiales de escritorio
 - 01 Laptop HP probook 4540s
 - 01 Impresora HPinalámbrica
 - 01 Millar de hojas bond
- Insumos y reactivos
 - Lana de acero de la marca Virutex.
 - Ácido Cítrico de la marca RZBC. (Concentraciones de 3% y 6%)
- Materiales de campo
 - 27 Botellas de plástico transparente de capacidad de 2.5 L
 - 02 Gotero de vidrio
 - 02 Bailer desechable
 - 05 Algodón comercial
 - 03 Envase graduado de plástico de 1 L
 - 01 Alicata de acero
 - 04 Soporte de madera para las botellas de plástico
 - 02 Guantes quirúrgicos
 - 01 Cooler
 - 10 Ice packs
 - 03 baldes
- Instrumentos para la recolección de datos
 - Ficha de cadena de custodia
 - Ficha de recolección de datos
- Equipos
 - Espectrofotómetro Modelo Agilent 720 ICP.
 - Balanza analítica KERN & Sohn GmbH

D. Procedimiento

- Ubicación

La presente investigación se llevó a cabo en el centro poblado de Cruz de Médano de la región de Lambayeque, en base a las siguientes consideraciones:

 - Las aguas subterráneas del centro poblado presentaban concentraciones de arsénico superior al valor máximo admisible de 0.01 mg/L recomendado por la Organización Mundial de la Salud [1]

- Clima cálido, altos niveles de irradiación solar, aproximadamente entre 6 y 6.5 kW h/m², según [9].
- Preparación de los insumos y materiales
Para la cantidad y concentración de insumos se estableció un rango de cantidad de Lana de acero y de ácido cítrico a utilizar, colocados en el diseño de la presente investigación de acuerdo a [10].
- Se preparó dos concentraciones de 3% (30 g/L) y 6% (60 g/L) de ácido cítrico de la marca RZBC, tomando como referencia una concentración de 1000 g/L de ácido cítrico, de las cuales utilizamos 1 mL.
- Para la lana de acero, se envió al laboratorio ENVIROTEST S.A.C para el respectivo pesaje de 1 y 2 gramos, donde se utilizó la balanza analítica KERN& Sohn GmbH – versión 2.2.
- Se realizó el armado del soporte de madera para colocar de manera inclinada las botellas de plástico con el agua a tratar.

• Recolección de la muestra inicial
La toma de muestra del Pozo 1, se realizó según [8]. Se retiró el bailer de su empaque y se ató la driza al extremo de este, luego se procedió a introducir dentro del pozo donde se tomaron tres muestras consecutivas enjuagando el bailer y el balde luego de cada una, para así obtener la recolección de 13.5 litros de muestra.

La toma de muestra del Pozo 2, se realizó según [8]. La cual tiene un sistema de bombeo continuo. Se abrió el grifo con flujo máximo y se dejó correr con promedio de 5-10 minutos, luego se procedió a tomar la muestra de 13.5 litros.

Para la recolección de la muestra inicial y para los tratamientos, se procedió a recolectar la muestra de agua de los 2 diferentes pozos, donde se extrajo 13.5 litros de cada pozo para luego juntar ambas cantidades; así se realizó una muestra compuesta de 27 litros para los 9 tratamientos, en la cual se utilizará un 1 litro de agua por cada tratamiento. Para la muestra inicial, Tratamiento 0, se extrajo 3 litros de la muestra compuesta, de las cuales se utilizó 500 mL para cada una de las repeticiones, sin añadir ningún insumo. En la preservación se añadió a cada uno 3 mL de ácido nítrico concentrado y fue enviado en un cooler refrigerado al laboratorio ENVIROTEST (Environmental Testing Laboratory S.A.C) para su respectivo análisis de cantidad de arsénico inicial. [11]

- Aplicación de los tratamientos
En total se aplicaron 9 diferentes tratamientos que consistieron en variar la cantidad de lana de acero (1 g y 2 g), 1 mL con diferentes concentraciones de ácido cítrico (3% y 6%) y tiempo de exposición solar (3 y 6 horas), así mismo, se tiene una muestra inicial sin ningún tratamiento, una muestra inicial identificado como T₀, por ende, de acuerdo al diseño de la investigación se procedió a establecer los tratamientos de la siguiente manera.
En cada botella de plástico de 2.5 L se aplicó una cantidad de lana de acero y ácido cítrico y se dejó reposando de manera inclinada sobre el soporte de madera. Trascurrido las 3 primeras horas de exposición solar, se retiraron las botellas de agua que contenían los tratamientos T₁, T₃, T₅ Y T₇; al pasar las 6 horas se retiraron las botellas con los tratamientos T₂, T₄, T₆ Y T₈.

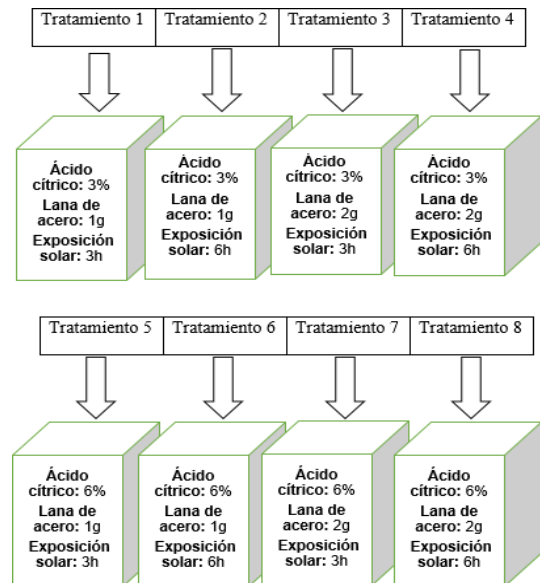


Figura 2. Diagrama de bloques de la aplicación de tratamientos

En la figura 3 se muestra el esquema de funcionamiento del método de Radiación Solar conformado por botellas de PET de 2.5 L y un soporte de madera con un ángulo de inclinación de 30°. Mediante este sistema habrá una reacción química con el ácido cítrico, la lana de acero y con el arsénico presente en el agua, se aprovechará el tiempo que estará frente a la radiación solar para optimizar la remoción de arsénico.

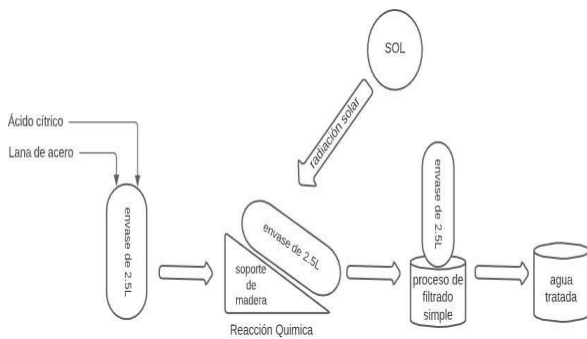


Figura 3. Esquema de funcionamiento del método de Radiación Solar



Figura 4. Funcionamiento del método de Radiación Solar

- **Recolección de las muestras de agua tratada**
Todas las muestras fueron retiradas y colocadas en posición vertical dentro de la vivienda. Al día siguiente fueron filtradas, acondicionadas y tras pasadas hacia el frasco rotulado, llenando solo 500 mL y añadiendo a cada uno 3 mL de ácido nítrico concentrado para su preservación; se registraron los datos en la cadena de custodia, posterior a ello, fueron enviados en un cooler refrigerado al laboratorio ENVIROTEST (Environmental Testing Laboratory S.A.C) para su respectivo análisis de arsénico residual [11]

- **Análisis de datos**
Con los resultados obtenidos del promedio de las 3 repeticiones por cada tratamiento de la concentración de arsénico que contenían el agua antes y después de la aplicación de los tratamientos, se determinó el porcentaje de remoción del arsénico total en función al tiempo de exposición solar, a través de la siguiente fórmula:

$$E = \frac{T_0 - T_n}{T_0} \times 100 \quad (\text{ecuación 1})$$

En la ecuación 1, se determinará la eficiencia de la remoción de arsénico.

Donde:

E: Eficiencia de remoción del arsénico [%]

T_n : Concentración de arsénico tras aplicación de tratamiento n.

T_0 : Concentración de arsénico inicial (sin ningún tratamiento)

El análisis estadístico se realizó mediante el método de análisis de varianza (ANOVA), en base a los datos de la concentración final del arsénico total de los 8 tratamientos experimentales. Se encargó de recolectar, clasificar, ordenar, analizar y representar datos para así poder obtener particularidades del grupo, esta se apoyó en la herramienta de medidas de tendencia central; la media y la mediana, en donde se observará si cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas y si existe diferencias significativas entre los tratamientos de remoción de arsénico. Posterior a ello, se realizará la prueba Tukey, para obtener información más detallada sobre las diferencias entre medias específicas para encontrar el tratamiento que tenga mayor remoción de arsénico y que tenga una menor concentración de arsénico.

III. RESULTADOS

La parte experimental de esta investigación es desarrollada durante 1 día, con 27 muestras totales, de las cuales fueron 3 repeticiones por cada tratamiento, para luego observar y realizar el promedio de los grupos mediante el informe enviado por el laboratorio ENVIROTEST S.A.C, para conocer la concentración inicial y cuáles de los tratamientos tuvo una mayor reducción de la concentración de arsénico, donde se observarán en las siguientes tablas.

TABLA 3

ANÁLISIS DE ARSÉNICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA OBTENIDA DEL CENTRO POBLADO CRUZ DE MEDANO Y COMPARATIVO CON EL LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES ESTABLECIDO EN EL D.S. N° 031-2010 S.A.

Tipo de agua	Parámetro	Unidad	Concentración	Límites Máximos Permisibles
Agua Subterránea	Arsénico	mg/L	0.1154	0.01

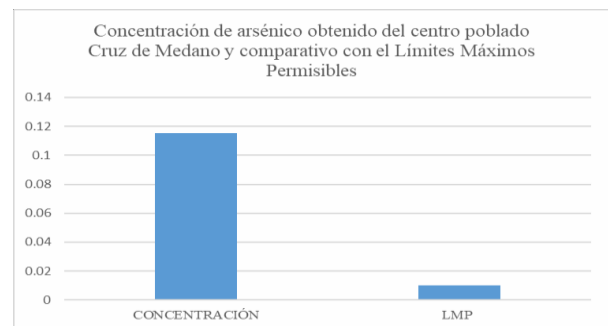


Figura 5. Comparación de la concentración de arsénico inicial con los Límites Máximos Permisibles

En la figura 5 se observa que la concentración de arsénico inicial, posee un valor de 0.1154 mg As/L, en donde se encuentra por encima del límite máximo permisible (Ver tabla 5) que establece el [6] que es 1.1 mg As/L.

TABLA 4
CONCENTRACIÓN FINAL DE ARSÉNICO DESDE EL TRATAMIENTO 1 AL TRATAMIENTO 4

Tratamientos	Variables			Concentración inicial de arsénico (mg/L)	Concentración final de arsénico (mg/L)
	Ácido cítrico (%)	Lana de acero (g)	Exposición solar (h)		
T1	3	1	3	0.1154	0.087
T2	3	1	6		0.029
T3	3	2	3		0.070
T4	3	2	6		0.022

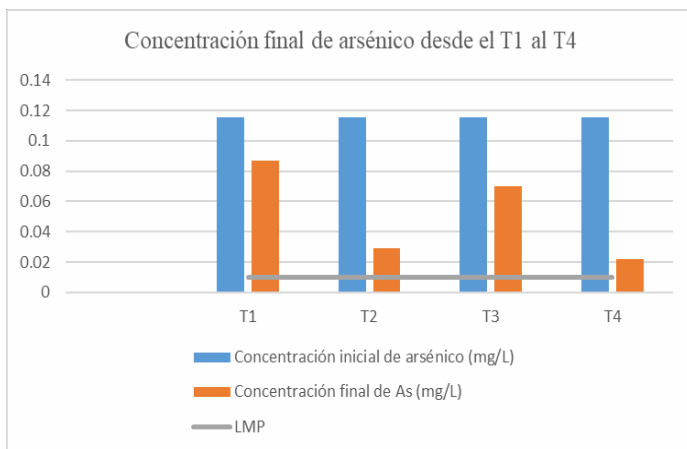


Figura 6. Concentración final de arsénico desde el T1 al T4

En la figura 6, se puede observar la reducción con respecto a la concentración inicial, donde el T2 y T4 poseen mayor reducción, pero aún se encuentra por encima del límite máximo permisible que establece el [6] que es 0.01 mg As/L.

TABLA 5
CONCENTRACIÓN FINAL DE ARSÉNICO DESDE EL TRATAMIENTO 5 AL TRATAMIENTO 8

Tratam.	Variables			Concentración inicial de arsénico (mg/L)	Concentración final de arsénico (mg/L)
	Ácido cítrico (%)	Lana de acero (g)	Exposición solar (h)		
T5	6	1	3	0.1154	0.062
T6	6	1	6		0.009
T7	6	2	3		0.051
T8	6	2	6		0.003

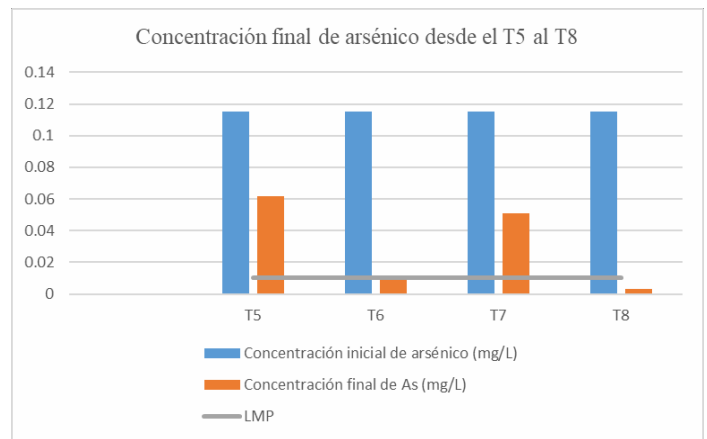


Figura 7. Concentración final de arsénico desde el T5 al T8

En la figura 7, se puede observar la reducción con respecto a la concentración inicial, donde el T6 y T8 poseen mayor reducción, encontrándose por debajo del límite máximo permisible que establece el [6] que es 0.01 mg As/L.

TABLA 6
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO AL APLICAR EL TRATAMIENTO DE OXIDACIÓN SOLAR DEL TRATAMIENTO 1 AL TRATAMIENTO 4.

Tratamientos	Variables			% Remoción de arsénico
	Ácido cítrico (%)	Lana de acero (g)	Exposición solar (h)	
T1	3	1	3	24.90%
T2	3	1	6	75.16%
T3	3	2	3	39.05%
T4	3	2	6	80.65%

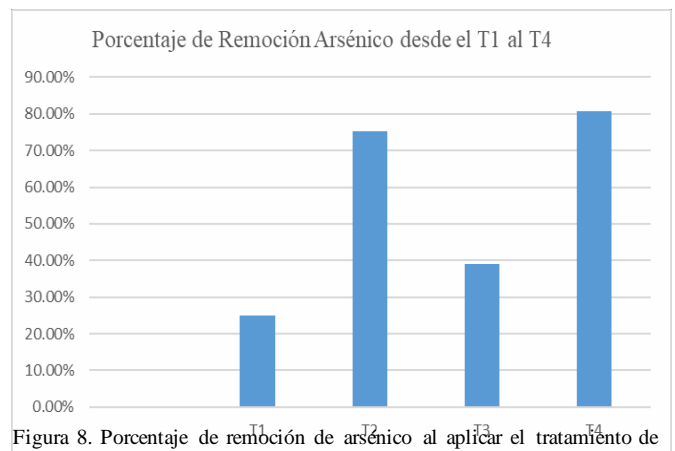


Figura 8. Porcentaje de remoción de arsénico al aplicar el tratamiento de Oxidación Solar del T1 al T4.

En la figura 8, se puede observar el resultado de la eficiencia de remoción de arsénico dado en porcentaje, en donde los Tratamientos 2 y 4 presentan una mayor remoción con

75.16% y 80.65%; los tratamientos 1 y 3 la menor con un 24.90% y 39.05%.

TABLA 7

PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO AL APLICAR EL TRATAMIENTO DE OXIDACIÓN SOLAR DEL TRATAMIENTO 5 AL TRATAMIENTO 8.

Tratamientos	Variables Ácido cítrico (%)	Lana de acero (g)	Exposición solar (h)	% Remoción de arsénico
T5	6	1	3	45.98%
T6	6	1	6	92.49%
T7	6	2	3	55.52%
T8	6	2	6	97.11%

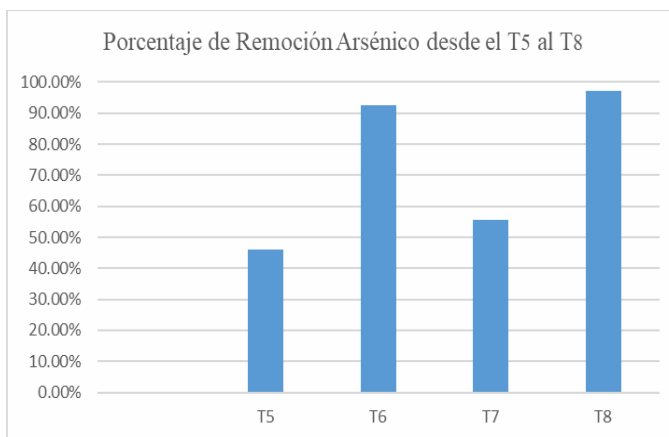


Figura 9. Porcentaje de remoción de arsénico al aplicar el tratamiento de Oxidación Solar del T5 al T8.

En la figura 9, se puede observar el resultado de la eficiencia de remoción de arsénico dado en porcentaje, en donde los Tratamientos 6 y 8 presentan una mayor remoción con 92.49% y 97.11%; los tratamientos 5 y 7 la menor con un 45.98% y 55.52%.

IV. DISCUSIONES

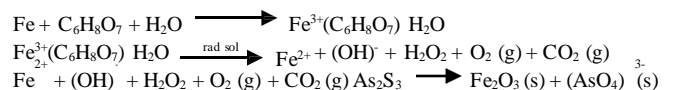
En la tabla 3 se puede observar los resultados obtenidos en el análisis de arsénico inicial realizado a la muestra estudiada (agua subterránea). Esta muestra una concentración de arsénico de 0.1154 mg As/L de agua; este último valor sobrepasa el Límite Máximo Permisible de Parámetros Químicos Inorgánicos y Orgánicos (arsénico 0.01 mg/L) establecido en el [6], en el cual están los requisitos necesarios para que el agua pueda ser considerada apta para el consumo humano; y al igual que la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que el incumplimiento de estas disposiciones no garantiza la inocuidad, genera riesgos sanitarios y atenta contra la protección de la salud y bienestar de la población; situación que en la actualidad se ve reflejada en la zona de estudio. Además, los resultados de los análisis obtenidos, concuerdan con lo expuesto por los

autores [11], [12] y [13], quienes en sus investigaciones sobre el nivel de arsénico en las aguas de consumo humano del centro poblado cruz de Médano en Mórrope, obtuvieron valores muy cercanos, como 0.11 mg As/L, 0.25 mg As/L y 0.064 mg As/L respectivamente.

En la Tabla 4 y 5, se detalla los resultados obtenidos de la remoción de arsénico al aplicar los tratamientos de oxidación solar donde se variaron los factores de concentración de ácido cítrico, cantidad de Lana de acero y tiempo de exposición solar. Se puede observar que el mejor tratamiento (T8) logró remover el 97.11% de arsénico (véase tabla 7), tras aplicar una concentración del 6% de ácido cítrico (1 mL), 2 gramos de lana de acero, en un tiempo de exposición solar de 6 horas continuas. En otro de los tratamientos que resultó más efectivo (T6) con una remoción del 92.49% se empleó 6% ácido cítrico, 1 gramo de lana de acero, en un tiempo de exposición de 6 horas; en ambos casos la concentración final de arsénico en el agua (0.003 mg As/L y 0.009 mg As/L) está por debajo del Límite Máximo Permisible para Arsénico dado por el [6], como se puede observar en la figura 5. Esto concuerda con [11], quien en su investigación también aplicó 2 gramos de lana de acero en un tiempo de exposición de 6 horas, obteniendo un 98% de remoción. Al respecto, el autor manifiesta que la variable radiación solar (cantidad y tiempo) influye significativamente, debido a que activa la formación de radicales y favorece principalmente la oxidación del hierro cero valente y la formación de hidróxidos en presencia de citrato para la adsorción del arsénico, esta es la razón porque se obtiene menos porcentaje de remoción en el tratamiento T7 y el T5.

Por otro lado [14], también en su investigación obtuvo una mayor remoción al emplear 1.6 gramos de lana de acero, cantidad cercana a la usada en este proyecto, sobre ello manifiesta que la lana de acero responsable del proceso de oxidación retiene al arsénico, además su empleo significa una gran ventaja debido a que es de bajo costo, de fácil acceso y a su importante relación área/volumen. Además, este insumo, responsable de la oxidación, tiene como antecedentes de uso los filtros de purificación de agua.

Con respecto al ácido cítrico, se puede observar que los mejores resultados se obtuvieron con la concentración máxima planteada (6 %); sin embargo, [4] manifiestan que si bien esta variable actúa como catalizador en la oxidación del arsénico; el exceso de ácido cítrico puede interferir en el proceso de remoción, además de afectar la calidad del agua, como cambios en la coloración (tonalidad amarillenta) producto de la oxidación y un aumento en los sólidos en suspensión. En la experimentación no se observó ninguna de las dos últimas situaciones mencionadas.



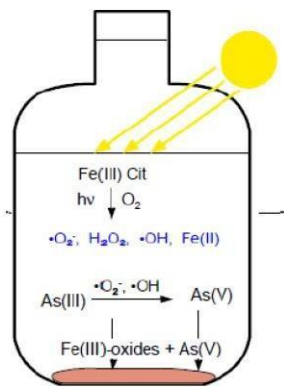


Figura 10. Principio básico de oxidación solar

Respecto a los tratamientos que se realizó, se observó que el arsénico en el agua a tratar, es removido por el método de oxidación solar, en la cual la lana de acero junto al ácido cítrico, que funciona como un catalizador, al entrar en contacto con el agua agilizará el proceso de oxidación del hierro. Por consiguiente, la radiación solar ayudará a la oxidación del arsénico, formando peróxidos que son los que oxidan al arsénico, en los cuales el arsénico se adhiere y precipita con el óxido férrico al fondo del recipiente. Esto concuerda con lo dicho por [11], donde indica que, dentro de la operatividad de la oxidación solar, la que genera oxidantes muy fuertes, es la radiación solar, en la cual dichos oxidantes tienen la capacidad de adherirse a los óxidos de hierro, para que luego estos se precipiten junto al arsénico en forma de sal.

V. CONCLUSIONES

- La remoción de arsénico por oxidación solar, tuvo una alta eficiencia, cuyos valores fueron mayores del 92 % y 97 % en los tratamientos 6 y 8 respectivamente, estos resultados indican que la metodología por oxidación solar es factible por su eficiencia y simplicidad.
- La concentración promedio de arsénico antes del tratamiento por oxidación solar de las aguas subterráneas en el centro poblado Cruz del Medano, Lambayeque es de 0.1154 mg As/L, registrándose el valor por encima del 0,01 mg As/L.
- La concentración promedio de arsénico después de la aplicación de los tratamientos T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇ y T₈ por oxidación solar de las aguas subterráneas en el centro poblado Cruz del Medano, Lambayeque fueron 0.087, 0.029, 0.070, 0.022, 0.062, 0.009, 0.051 y 0.003 mg As/L respectivamente, registrándose algunos valores por encima y por debajo del 0,01 mg As/L.
- La cantidad óptima de lana de acero, ácido cítrico y el tiempo óptimo de exposición solar que logro mayor remoción en la aplicación de la oxidación solar de las

muestras analizadas de agua del centro poblado Cruz de Medano, Lambayeque es de la cantidad de 2 gramos, 1 mL aplicando la concentración del 6% y 6 horas respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las autoridades de la Universidad Privada del Norte por brindar su apoyo para el desarrollo del estudio de caso con los proyectos de investigación.

REFERENCIAS

- [1] OMS. Guías para la calidad del agua potable. Ginebra, Suiza, Agosto 2006
- [2] S. Fendorf, D. Benjamin. "Procesos biogeoquímicos que controlan el destino y el transporte de arsénico: implicaciones para el sur y sudeste de Asia" Avances en agronomía, vol 104, pp 137-164, Setiembre 2009.
- [3] R. Escalera, O Ormachea. "Diseño e implementación de un sistema de tratamiento para la remoción de arsénico del agua de consumo en el altiplano y valles de Bolivia". Investigación & Desarrollo, vol 20, pp 23-39, Mayo 2020.
- [4] M. Chávez, M. Toledo. "Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. Apurímac, Perú" Sociedad Química del Perú, vol 77, pp 307-314, Noviembre 2011
- [5] N. Cuevas, N. Flores. "Adaptación de la tecnología RAOS aplicando el calentamiento solar en las aguas del río Sama. Tacna, Perú. http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/1549/proin_058_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] D.S. N° 031-2010-SA. "Reglamento Nacional de Calidad de Agua" https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/391087/Reglamento_de_la_calidad_del_agua_para_consumo_humano_D.S._N%C2%BA_031-2010-SA20191017-26355-1yv4hfm.pdf
- [7] T. Otzen, C. Manterola. "Técnicas de muestreo sobre una población a estudio.", International Journal of Morphology, vol 35, pp 227-232, Diciembre 2016.
- [8] MIMAN. "Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados muestreo de aguas subterráneas". <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2018/08/MANUAL-DE-BUENAS-PRACTICAS-MUESTREO-AGUA.pdf>
- [9] SENHAMI. "Atlas de energía solar del Perú". <https://www.senamhi.gob.pe/pdf/Atlas%20de%20Radiacion%20Solar.pdf>
- [10] E. Avendaño, "Remoción de arsénico del río sama utilizando la metodología de hierro cero valente", Ciencia & Amp vol 15, pp 34-39. Abril 2019.
- [11] M. Fiestas, A. Millones. "Influencia de la concentración y el tiempo de contacto del carbón activado de cáscara de coco en la remoción de arsénico de aguas subterráneas de Mórrope. Lambayeque, Perú". <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/4028/BC-TES-TMP-2821.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] A. Goicochea, J. Ruiz. "Adsorción de arsénico disuelto en aguas subterránea en el distrito de Mórrope (Lambayeque) utilizando residuos sólidos de café (afrecho). Lambayeque, Perú". <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/3264/BC-TES-TMP-2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] M. Campodónico. "Diagnóstico del estado actual de la concentración de arsénico en las aguas de consumo humano del centro poblado Cruz del Medano en Mórrope. Lambayeque, Perú". https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/2035/Martha%20Campodónico_Trabajo%20de%20Investigacion_Bachiller_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [14] R. Zapana. "Estudio de remoción de arsénico del agua del río sama - Tacna, empleando Fe⁰ y ácido cítrico". Universidad Jorge Basadre. Tacna, Perú. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/2501>