



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

T E S I S

**EFECTO DE LA RESINA XAD-7 Y TIEMPO SOBRE LAS
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y REMOCIÓN
DE ARSÉNICO (V) COMO ALTERNATIVA DE
TRATAMIENTO DE AGUA**

PRESENTADA POR

BACHILLER SHOUNY CHORA VALENCIA

ASESOR

MGR. ERIK EDWIN ALLCCA ALCA

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

MOQUEGUA – PERÚ

2022

ÍNDICE

	Pág.
Página de jurado	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice.....	iv
Contenido de tablas	vii
Contenido de figuras	ix
Contenido de apéndices.....	x
Resumen.....	xi
Abstract	xii
Introducción	xiii

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema	1
1.2. Definición del problema	3
1.2.1. Problema general.	3
1.2.2. Problemas específicos.....	3

1.3.	Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1.	Objetivo general.....	3
1.3.2.	Objetivos específicos.	3
1.4.	Justificación	4
1.5.	Alcances y limitaciones	5
1.5.1.	Alcances.....	5
1.5.2.	Limitaciones.	5
1.6.	Variables	5
1.6.1.	Identificación de variables.....	5
1.6.2.	Operacionalización de variables.	6
1.7.	Hipótesis de la investigación	6
1.7.1.	Hipótesis general.....	6
1.7.2.	Hipótesis derivadas.	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de la investigación.....	8
2.2.	Bases teóricas.....	10
2.3.	Definición de términos	17

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1.	Tipo de la investigación.....	18
------	-------------------------------	----

3.2. Diseño de la investigación	18
3.3. Población y muestra.....	20
3.4.1. Población.	20
3.4.2. Muestra.	20
3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos	20
3.4.1. Técnica para la recolección de datos.	20
3.4.2. Instrumentos para recolección de datos.	21

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados	24
4.2. Contraste de hipótesis	34
4.3. Discusión de resultados.....	35

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	37
5.2. Recomendaciones.....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
APÉNDICE.....	47
Matriz de consistencia.....	63

CONTENIDO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	6
Tabla 2. Valencia y forma del arsénico.....	12
Tabla 3. Tipos de tratamiento de remoción de As	14
Tabla 4. Características de la resina Amberlite XAD	16
Tabla 5. Hoja de registro para la conductividad eléctrica y turbidez.....	22
Tabla 6. Hoja de registro para la conductividad eléctrica y turbidez.....	23
Tabla 7. Análisis de varianza para pH	24
Tabla 8. Prueba LSD Fisher de resina sobre el pH	25
Tabla 9. Prueba LSD Fisher de tiempo sobre el pH.....	25
Tabla 10. Prueba LSD Fisher de resina * tiempo sobre el pH	26
Tabla 11. Análisis de varianza para conductividad electrica	27
Tabla 12. Prueba LSD Fisher de resina sobre la conductividad eléctrica.....	27
Tabla 13. Prueba LSD Fisher de tiempo sobre sobre la conductividad electrica..	28
Tabla 14. Prueba LSD Fisher de resina * tiempo sobre sobre la conductividad eléctrica.....	28
Tabla 15. Análisis de varianza para turbidez	29
Tabla 16. Prueba LSD Fisher de resina sobre la turbidez	30
Tabla 17. Prueba LSD Fisher de tiempo sobre sobre la turbidez.....	30
Tabla 18. Prueba LSD Fisher de resina * tiempo sobre sobre la turbidez	31
Tabla 19. Análisis de varianza para remoción de arsénico	32
Tabla 20. Prueba LSD Fisher de resina sobre la remoción de arsénico.....	32
Tabla 21. Prueba LSD Fisher de tiempo sobre sobre la remoción de arsénico.....	32

Tabla 22. Prueba LSD Fisher de resina * tiempo sobre sobre la remoción de arsenico	33
Tabla 23. Resumen de resultados obtenidos	36

CONTENIDO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución de arsénico en el mundo	11
Figura 2. Formas de arsenito y arseniato en relación al pH.....	13
Figura 3. Estructura de resina Amberlite XAD-7	17
Figura 4. Diseño de investigación.....	18
Figura 5. Diagrama de flujo de acciones y actividades.....	19
Figura 6. Resultado de uso de resina XAD-7 y tiempo sobre el pH.	26
Figura 7. Resultado de uso de resina XAD-7 y tiempo sobre la conductividad eléctrica.....	29
Figura 8. Resultado de uso de resina XAD-7 y tiempo sobre la turbidez.....	31
Figura 9. Resultado de uso de resina XAD-7 y tiempo sobre la remoción de arsénico.....	33

CONTENIDO DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice A.....	47
Apéndice B.....	48
Apéndice C.....	49
Apéndice D.....	56
Apéndice E.....	59

RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “Efecto de la resina XAD-7 y tiempo sobre los parámetros fisicoquímicas y remoción de arsénico (V) como alternativa de tratamiento de agua”, presento como objetivos: evaluar el efecto de la resina XAD-7 y el tiempo sobre las propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica, turbidez) y la remoción de arsénico (porcentual) del agua tratada. Se utilizo un arreglo factorial de 3x3 con 3 repeticiones donde los factores fueron el uso de resina XAD-7 (0, 10 y 20 g/L) y tiempo de agitación (10, 50 y 90 min). Se utilizo agua destilada a la que se agregó una solución de estándar de arsénico V, hasta una concentración de ~0,5 mg/L. Se presaron diferentes dosis de resina XAD-7 (0, 10 y 20 g) que se añadieron al agua contaminada, se colocaron en un agitador a 100 rpm con diferentes tiempos. Los resultados mostraron existencia de diferencia estadística significativa tanto en los factores y sus interacciones. Para el pH, los valores de los tratamientos T5, T6, T7, y T8, donde T5 con 6.73 ± 0.032 pH y T8 7.45 ± 0.006 pH. Para la conductividad eléctrica T4, T5 y T6, donde T4 con 996.00 ± 8.544 uS/cm y T6 con 989.33 ± 5.508 uS/cm. En la turbidez los valores obtenidos se encuentran dentro de lo recomendado según el DS N° 004-2017-MINAM. Para la remoción de arsénico el T9 alcanzo el $99.06 \pm 0.011\%$. Por lo que se recomienda el uso de resina XAD-7 para el tratamiento de agua contaminada con arsénico V.

Palabras clave: XAD-7, remoción de arsénico, velocidad de agitación

ABSTRACT

The present research work entitled "Effect of the XAD-7 resin and time on the physicochemical parameters and removal of arsenic (V) as an alternative for water treatment", presented as objectives: to evaluate the effect of the XAD-7 resin and the time on the physicochemical properties (pH, electrical conductivity, turbidity) and the arsenic removal (percentage) of the treated water. A 3x3 factorial arrangement with 3 repetitions was used where the factors were the use of XAD-7 resin (0, 10 and 20 g/L) and agitation time (10, 50 and 90 min). Distilled water was used to which an arsenic V standard solution was added, up to a concentration of ~0.5 mg/L. Different doses of XAD-7 resin (0, 10 and 20 g) were added to the contaminated water, placed in a shaker at 100 rpm with different times. The results showed that there is a significant statistical difference both in the factors and their interactions. For the pH, the values of the treatments T5, T6, T7, and T8, where T5 with 6.73 ± 0.032 pH and T8 7.45 ± 0.006 pH. For the electrical conductivity T4, T5 and T6, where T4 with 996.00 ± 8.544 uS/cm and T6 with 989.33 ± 5.508 uS/cm. In turbidity, all the values obtained are within the recommended according to Supreme Decree No. 004-2017-MINAM. For arsenic removal, T9 reached $99.06 \pm 0.011\%$. Therefore, the use of XAD-7 resin is recommended for the treatment of water contaminated with arsenic V.

Keywords: XAD-7, arsenic removal, stirring rate.

INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es un elemento de elevada presencia además de ser tóxico presente en el ambiente, el cual presenta una concentración de 1.5 – 3 mg/kg en la corteza de la tierra, es un metaloide cristalino cuyas propiedades se encuentran en un intermedio entre metales y metaloides (Shaibur et al., 2008). Se presenta en tres formas de alotrópicas diferentes: α (amarillo) presenta formación tetraédrica diferente con comportamiento a un metal, β (negro) con estructura y comportamiento parecido al fósforo rojo, y γ (gris) de formación cuadrática parecida al antimonio y conductividad eléctrica semejante al bario y plomo de característica metálica (Silva, 2013), además que se encuentra en cuatro estados de oxidación: arsenato (5), arsenito (3), arsina (-3) y en (0), la forma más estable es arsenato (5) (Singh et al., 2015). La estabilidad adicional depende del tipo de ambiente presente, por ejemplo en el agua con oxígeno disuelto, el arsenato es estable, mientras arsenito es estable en un ambiente redox reducido, además de que se pueden presentar de diferentes formas en el ambiente, como el ácido monometilarsónico, trimetilarsina, arsenobetaina y, arsenoazúcar (Zhao et al., 2010)

Según el Banco Mundial en su estudio realizado el 2014, el 50 % de las captaciones de agua para consumo, no cumplen con los niveles permitidos para la concentración de As en el agua (0,01 mg As/l), esto de acuerdo a los estándares de calidad establecidos por el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM y Decreto Supremo N° 031-2010-SA. La exposición y consumo de agua contaminada genera el 8 % de fallecimientos en el sector rural (MINSA, 2019).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema

El As se encuentra distribuido por diferentes partes del mundo, generando preocupación debido a la contaminación, la mayor concentración se encuentra en Bangladesh (sureste de Asia) con 0,05 mg/l, la exposición al arsénico en el agua de consumo ha sido asociado con varios cánceres, efectos tóxicos en el hígado, piel, riñón, sistema cardiovascular, pulmón además de envenenamiento (Argos et al., 2010). En América del Sur, la presencia de arsénico expone a más de 4 millones de habitantes, los países y regiones con elevada presencia de As son: Argentina (La Pampa, Córdoba y Buenos Aires), Chile (Arica, Antofagasta y Coquimbo) y, Perú (Puno, Arequipa, Moquegua y Tacna) (Bundschuh et al., 2008), los ríos Vizcachas y Chilota ubicados en Moquegua presentan concentraciones de 0,16 mg/l (Pinto, 2018), en pozos superficiales en el distrito de Huata – Puno 0,25 mg/l (Apaza y Calcina, 2014) y, en la Bocatoma Tranca de Sama – Tacna 0,29 mg/l (Morales et al., 2017). El As de forma natural se encuentra en estados de oxidación +5

(arsenato) y reducida +3 (arsenito), la especie más común es el arsenato (As +5), en aguas en las cuales el pH se encuentra entre 5 a 9, el arsénico se encuentra como H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- , H_2AsO_4 y $\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$ (Apaza y Calcina, 2014), por ello, es importante proponer medidas preventivas para la exposición y consumo, sobre todo para el agua que va a ser consumida, por lo que se debe promover tecnologías de reducción de As en el agua.

Las tecnologías utilizadas en la actualidad para la remoción de As son: oxidación, membranas, intercambio iónico, adsorción, coagulación – floculación, entre otros (Singh et al., 2015). La adsorción, es una tecnología que utiliza un adsorbente, cuya finalidad es de que el material adsorbente pueda adherir a su superficie mediante fuerzas electrostáticas o de Van der Waals, en este caso al As. Los estudios muestran una elevada adsorción en el carbón activado, alúmina activada, arenas, zeolitas naturales, resinas entre otros (Goel et al., 2004). Las resinas se utilizan ampliamente como adsorbentes para el tratamiento de contaminantes orgánicos en el agua, por lo que es necesario estudiar las capacidad de sorción y demás condiciones en las resinas (Yang et al., 2016), además que pueden ser regeneradas y utilizadas varias veces.

Las aguas superficiales contienen diferentes metales como son arsénico, cadmio, plomo, boro, estroncio, aluminio, entre otros (Villena, 2018), por lo que la presencia de diferentes metales puede ocasionar interferencias en el momento de la adsorción por la resina macro porosa XAD-7, y a fin de evitar estas interferencias se plantea agregar una solución de H_2AsO_4 (As V) a agua destilada, a fin de evaluar la remoción de arsénico.

1.2. Definición del problema

1.2.1. Problema general.

¿Cuál es el efecto de la resina XAD-7 y el tiempo sobre las propiedades fisicoquímicas y remoción de arsénico (V) como alternativa de tratamiento de agua?

1.2.2. Problemas específicos.

¿Cuál es el efecto de la resina XAD-7 y el tiempo sobre las propiedades fisicoquímicas del agua tratada?

¿Cuál es el efecto de la resina XAD-7 y el tiempo sobre la remoción de arsénico del agua tratada?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar el efecto de la resina XAD-7 y el tiempo sobre las propiedades fisicoquímicas y remoción de arsénico (V) como alternativa de tratamiento de agua.

1.3.2. Objetivos específicos.

Evaluar el efecto de la resina XAD-7 y el tiempo sobre las propiedades fisicoquímicas del agua tratada

Evaluar el efecto de la resina XAD-7 y el tiempo sobre la remoción de arsénico del agua tratada.

1.4. Justificación

El As inorgánico presenta mayor toxicidad que su forma orgánica, y es de la forma inorgánica como se presenta en las aguas naturales (Litter, 2010), El agua contaminada que es consumida, dentro del organismo es absorbida en el intestino delgado, y se bioacumulan en diferentes órganos como son: el hígado, riñones, corazón, sistema nervioso, pulmones, músculo, tracto gastrointestinal y bazo. El daño generalizado a los diferentes órganos se debe a su elevada toxicidad, d elas enfermedades que puede ocasionar son accidentes vasculares cerebrales (AVC), hipertensión arterial (HTA), cardiovasculares y diabetes mellitus tipo II (Saborío y Hidalgo, 2015), como también cáncer en los diferentes órganos piel, hígado, riñones, entre otros (Kuo et al., 2017), por ello es necesario tomar medidas a fin de evitar el consumo de arsénico.

- **Justificación ambiental.** La concentración de arsénico en agua en regiones cercanas a Moquegua como Tacna distrito de Inclán con 0,51 mg/l (Villa et al., 2018), y Puno en el distrito de 0,048 mg/l (Chata, 2015), además que GERESA-Moquegua (2019), manifiesta que Moquegua es una zona de riesgo a la salud por el consumo de agua, por lo mencionado el uso de la resina XAD-7 reduce el nivel de arsénico del agua que es utilizada para consumo.
- **Justificación socioeconómica.** Inicialmente el costo de la resina XAD-7 es elevado aproximadamente 1 200.00 soles/Kg, al ser un adsorbente, su fácil regeneración en un medio básico o ácido logra su uso posterior, siendo una alternativa de remoción de arsénico en agua superficial utilizada para consumo, puesto que la población rural carece de acceso a agua potable.

1.5. Alcances y limitaciones

1.5.1. Alcances.

La presente investigación es de carácter experimental, por lo que se plantea reducir el contenido de arsénico desde 0,2 mg/L utilizando resina polimérica macroporosa XAD-7, como una alternativa para la remoción de arsénico, el método propuesto será de fácil acceso a los pobladores a fin de que en lo posterior pueda ser utilizada por los mismo.

1.5.2. Limitaciones.

Se evaluó la remoción de arsénico a nivel de laboratorio, utilizándose agua destilada y una solución de As V, considerando que en el agua superficial para consumo presenta otros metales y compuestos orgánicos, el presente estudio no podrá determinar si la resina XAD-7 adsorberá solo arsénico o este se verá influenciado por la presencia de otros metales y/o compuestos orgánicos.

1.6. Variables

1.6.1. Identificación de variables.

1.6.1.1. Variable independiente.

- XAD-7.
- Tiempo.

1.6.1.2. Variables dependientes.

- Turbidez.

- Conductividad eléctrica.
- pH.
- Remoción de arsénico.

1.6.1.3. Variables intervinientes.

- Temperatura.
- Altitud.

1.6.2. Operacionalización de variables.

La tabla 1 muestra la operacionalización de variables del presente proyecto de investigación:

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidad	Instrumento
Independiente	XAD-7	Concentración	g/l	Balanza
	Tiempo	Minutos	min	Cronometro
Dependiente	Transparencia	Turbidez	NTU	Turbidímetro
	Contenido de sales disueltas	Conductividad eléctrica	µS/cm	Conductímetro
	Potencial de hidrogeno	pH	pH	pH metro
	Remoción de arsénico	Arsénico	%	Espectrómetro de plasma
Intervinientes	Temperatura ambiental	Grados centígrados	°C	Termómetro

1.7. Hipótesis de la investigación

1.7.1. Hipótesis general.

El uso de la resina XAD-7 en un tiempo adecuado remueve eficientemente el arsénico (V) del agua manteniendo las propiedades fisicoquímicas de acuerdo con la normatividad vigente

1.7.2. Hipótesis derivadas.

El uso de la resina XAD-7 en un tiempo adecuado mantiene las propiedades fisicoquímicas de acuerdo con la normatividad vigente

El uso de la resina XAD-7 en un tiempo adecuado remueve eficientemente el arsénico (V) del agua de acuerdo con la normatividad vigente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Balaji y Matsunaga (2002), en su trabajo evaluaron las características de adsorción de As (V) y As (III) utilizando resina Amberlite XAD-7 cargada con dióxido de titanio. La resina se preparó mediante impregnación de Ti (OC₂H₅)₄ a partir de hidrólisis con hidróxido de amonio. Se llevaron a cabo experimentos de adsorción por lotes en función del pH, el tiempo de agitación y la concentración de As (V) y As (III). La resina mostró una fuerte adsorción de As (V) de pH 1 a 5 y de As (III) de pH 5 a 10. Los experimentos de adsorción en columna mostraron que la adsorción de As (III) es más favorable en comparación con As (V) debido a la mayor capacidad adsorción de As (III) que de As (V).

Ciopec et al. (2019), evaluó la funcionalidad de la resina Amberlite XAD-7 mediante rayo X dispersivo, exploración de microscopia de electrones (SEM), entre otros, además de la eficacia de absorción del As (V) mediante modelos de la isoterma de adsorción no lineales: Langmuir, Freundlich y Sorbos. Los datos experimentales obtenidos fueron mejor encajados por la isoterma de adsorción de

Sorbos. Los valores de parámetros termodinámicos (G° , H° , S°) mostraron que el proceso de adsorción era endotérmico y espontáneo, donde la capacidad de adsorción máxima obtuvo experimentalmente ser 18.8 $\mu\text{g As (V)/g}$ con una reutilización efectiva hasta en 5 ciclos.

Hosseini-Bandegharaei et al. (2016), utilizó resina de Amberlite XAD-7 en soluciones ácidas (pH 2,5–2,7) con la finalidad de eliminar Torio (IV). Se consideró diferentes factores fisicoquímicos como el pH, tiempo de contacto, temperatura, cantidad de sorbente y concentración inicial de torio. Los datos de la isoterma se adaptaron al modelo Langmuir.

Ciopec et al. (2013), evaluó las propiedades de adsorción de la resina de Amberlite XAD-7 cargada con iones de Fe (III). A fin de estudiar el As (V) mecanismo de adsorción los datos experimentales fueron modelados utilizando tres modelos de la isoterma de adsorción no lineales: Langmuir, Freundlich y Sorbos. Los resultados demostraron que la resina de Amberlite XAD-7 es eficiente para la remoción de As en el agua cuya capacidad de adsorción máxima es de 18.8 $\mu\text{g de As/g}$.

Negrea et al. (2011), utilizó resina Amberlite XAD-7 con ácido di-(2-etilhexil) fosfórico (DEHPA) con alcohol etílico. Se demostró que la adsorción de Cr (III) se alcanzó a los 45 minutos con un pH de 3. La capacidad de adsorción máxima es Cr (III) de $\sim 3 \text{ mg/g}$.

2.2. Bases teóricas

El As presenta un comportamiento tanto como metal como no metal, considerado como metaloide, en la tabla periódica ocupa el número 33 y presenta una masa atómica 74,92 mol/g, es considerado un microelemento, además de ser el elemento de mayor abundancia en la tierra, en la corteza su presencia varia de 2 a 3 mg/Kg. Puede presentarse hasta en 200 formas, las formas minerales pueden ser clasificadas como arsenatos (~60%), sulfitos y sulfosales de arsénico (~20%), y silicatos de arsénico (Sarkar y Paul, 2016).

En el ambiente, el As además, se presenta entre los estados de oxidación de III y V, generalmente se encuentran en el suelo y agua, el As (V) predomina en medios oxidativos, mientras que el As (III) predomina en medio reductivos. Los sulfitos son los menos resistentes a la intemperie; los sulfitos que contienen el arsénico fácilmente son aguantados comparado con los otros minerales de arsénico. La oxidación de sulfitos de arsénico permite que arsénico se extienda en varios componentes del ambiente como suelo, agua y aire (Keshavarzi et al., 2011).

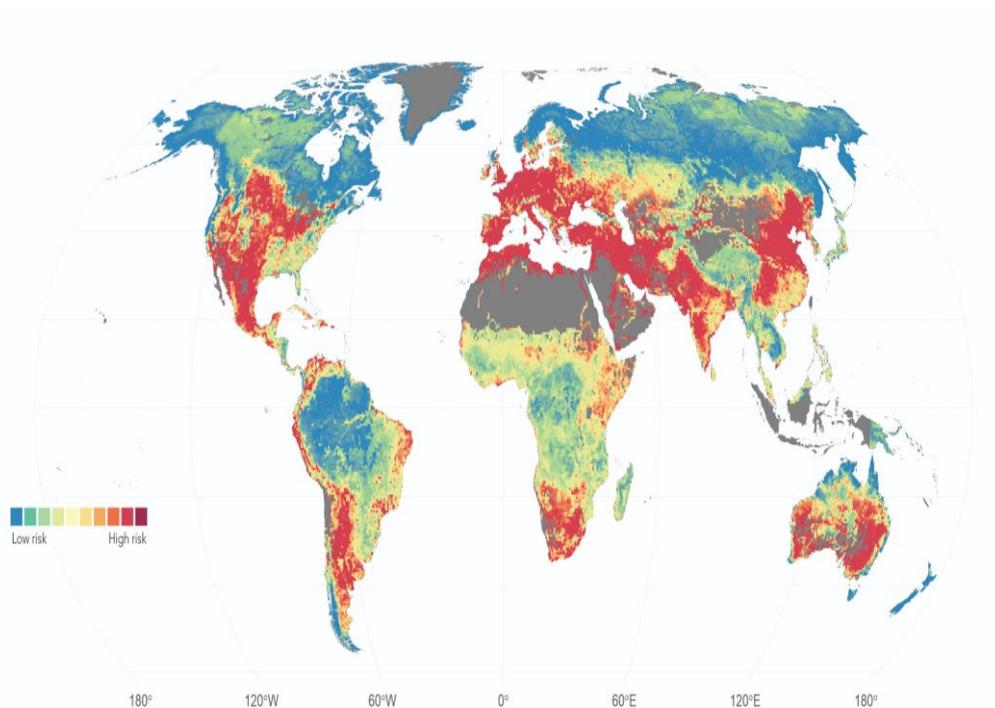
El 59% de los países asiáticos presenta elevados niveles de As sobre todo en el agua, países como India, Paquistán y Bangladesh presentan concentraciones $> 0,01$ mg/l y para el caso de Bangladesh la valores $> 0,05$ mg/l (Chakraborti et al., 2010) y, debido a ello entre 200 000 a 270 000 habitantes fallecieron debido al cáncer en Bangladesh (Smith et al., 2000).

Debido a que el As se encuentra en la corteza terrestre, este alcanza la superficie por las explosiones volcánicas, es por ello que en los lugares donde se encuentra rocas volcánicas, al formar acuíferos, y presentar condiciones oxidativas

moderadas potencial redox (Eh) mayor a 0 mV, las concentraciones de As son elevadas. Los países ubicados en el cinturón de fuego del Pacífico, que comprende además la cadena de los Andes, la presencia de rocas volcánicas contamina tanto el suelo, además de que por corrientes de aire y precipitaciones pueden alcanzar las fuentes de agua (Argentina en la llanura Chaco-Pampeana), además de que, las aguas termales, fumarolas y erupciones, aportan cantidades de As al ambiente (Bundschuh y Litter, 2013). La distribución de As en el mundo se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Distribución de arsénico en el mundo



Nota: Bundschuh y Litter, 2013

En condiciones de reducción, el As se moviliza por disolución reductiva en pH neutro. El As puede ser inmovilizado a condiciones específicas (pH, Eh entre otros), pudiendo precipitar por medio de la formación de hidróxidos tanto de hierro como

de otros metales, o ser adsorbido por otras sustancias metálicas como silicatos (Bundschuh y Litter, 2013). Estas condiciones de inmovilización también puede darse en las zonas de extracción de agua (in situ) o en otros lugares (agua superficial), esto ocurre si cambia la condición rédox del medio, por ejemplo, si la liberación del As a partir de hidróxido metálicos sucede en medio oxidante a $\text{pH} \geq 8$, se tendrá elevadas concentraciones de As (Otero et al., 2015; Bundschuh y Litter, 2013).

Nriagu et al. (2007), muestra que el estado de oxidación hará que el As se presente en un estado específico (ver Tabla 2), además que, según el pH este se presentara de diferentes formas como se muestran en la Figura 2 (Airam et al., 2015).

Tabla 2

Valencia y forma del arsénico

Estado	Valencia	Forma
Solido	0	
Solido	3	Arsenitos
Solido	5	Arseniatos
Gas	-3	Arsina

Nota: Nriagu et al., 2007

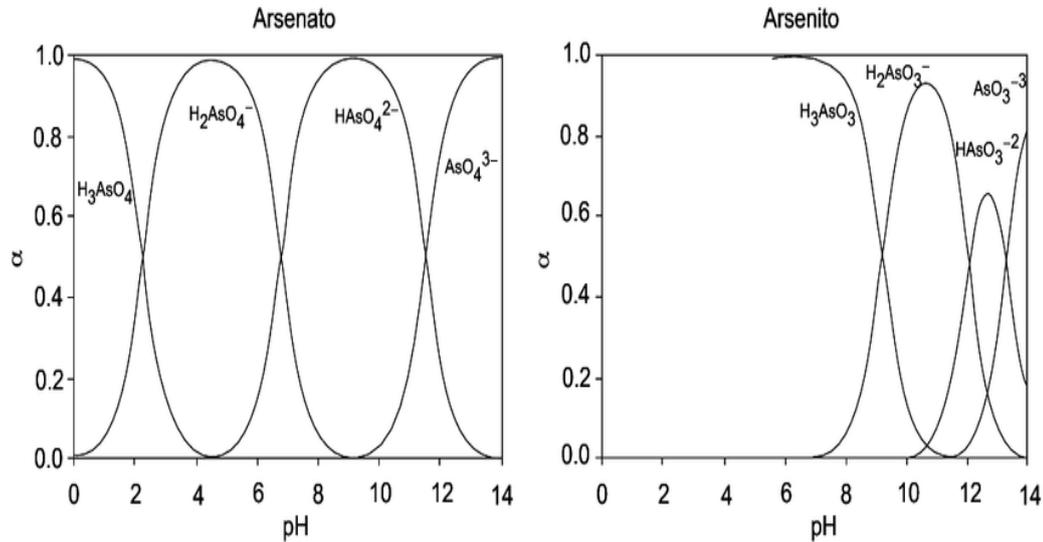
El nivel de toxicidad del As, depende de la forma, estado, solubilidad, pureza y tasa de absorción, en su estado gaseoso (arsina) es la sustancia de mayor toxicidad, el As inorgánico presenta mayor toxicidad que el orgánico (Medina et al., 2018).

Los procesos de remoción de As, se basan principalmente en tratamiento fisicoquímicos, esta tecnología incluye floculación-coagulación, adsorción, intercambio iónico, filtración de membrana, ósmosis inversa (RO), métodos reactivos permeables, etc., además de otras alternativas biológica como son

fitorremediación, filtración biológica, microbiología, entre otros (ver Tabla 3) (Sarkar y Paul, 2016).

Figura 2

Formas de arsenito y arseniato en relación al pH



Nota: Airam et al., 2015

La adsorción, es un proceso donde las sustancias disueltas son retenidas por superficies sólidas con las cuales se tiene contacto, son de dos tipos; adsorción física o (Van der Waals) y adsorción química. Este fenómeno depende del área superficial y porosidad del adsorbente, temperatura del medio, pH entre otros. La adsorción física es reversible y supone que la transferencia de electrones ocurra entre adsorbente y adsorbato, formándose múltiples capas del adsorbato en la superficie de adsorbente (Dąbrowski, 2001).

Las especies de arsénico presentes en el agua se adhieren en la superficie del adsorbente por la fuerza de Van der Waals, dependiendo de:

- Concentración inicial de arsénico.
- Cantidad de adsorbente.

- Tiempo de contacto sustancia-adsorbente.
- Solubilidad de arsénico.
- pH.
- Temperatura.
- Velocidad de agitación.
- Presencia de otros compuestos.

Tabla 3

Tipos de tratamiento de remoción de As

Tratamiento	Característica	Ventajas	Desventajas
Oxidación	El As (III) es oxidado a As (V) mediante, ozonización, aplicación de H ₂ O ₂ , MnO ₄ , Cl ₂ , ClO ₂ , FeO ₄ , radiación UV, etc.	Fácil utilización (en situ). Relativamente económica.	Proceso lento. Si la oxidación es aplicada previa a otra técnica de retiro, eleva el coste operativo del tratamiento.
Coagulación, precipitación y filtración	Los coagulantes desestabilizan el AS en el agua, logrando que este precipite y pueda ser filtrado	El coste operativo bajo, simple de funcionar, puede trabajar sobre una amplia gama del pH, los coagulantes están fácilmente disponibles	Produce el lodo muy contaminado con As. No tan eficaz para As (III)
Adsorción	El As es adsorbido en la superficie solida de adsorbentes	Reduce el As(V) eficazmente. Mejora el gusto y el olor	Adsorbentes son al regenerado periódicamente Para obtener una adsorción realmente eficaz, se requieren una preoxidación y la filtración
Intercambio iónico	Oxianiones de As son sustituidos por los iones de resinas sintéticas	Proceso de retiro eficaz.	Otros aniones o los sólidos suspendidos pueden interferir en el proceso.
Filtración de la membrana	Osmosis	Elimina otros contaminantes.	El coste de establecimiento inicial es alto.

Nota: Sarkar y Paul, 2016

La solubilidad de adsorbentes en fase acuosa y nivel de la adsorción es gobernada por regla de Lundelius que declara que, “*cuanto mayor es la solubilidad del*

adsorbato menor es el grado de adsorción” (Lyubchik et al., 2011). Se ha observado que varios adsorbentes prefieren algunos iones selectivos sobre los demás; en el caso de la alúmina activado prefiere adsorber H_2AsO_4 (As V) sobre H_3AsO_3 (As III)

Desde su descubrimiento en la década de 1960, los adsorbentes poliméricos conocido como resinas, han atraído cada vez más atención como una de las alternativas más prometedoras para carbón activado para la eliminación de productos químicos orgánicos de aguas residuales. La capacidad de sorción de una resina es la cantidad máxima de químicos adsorbidos en la resina, mientras que la afinidad de sorción es un parámetro que indica la fuerza total de todas las interacciones entre el químico y la resina sobre la que están adsorbidos (Yang et al., 2016)

Ahmad et al. (2015), describe que, los adsorbentes Amberlite XAD son polímeros esféricos muy porosos a base de poliestireno macrorreticular altamente reticulado, polímeros condensados alifáticos o fenol-formaldehído. En la base de la matriz polimérica, se puede dividir en dos principales grupos: i) resinas a base de poliestireno-divinilbenceno, incluidas XAD-1, XAD-2, XAD-4, XAD-16, XAD-1180, XAD-2000 y XAD-2010 y ii) resinas a base de éster de ácido poliacrílico, incluidas XAD-7, XAD-8 y XAD-11. Algunas características físicas de las propiedades de estas resinas se muestran en la Tabla 4.

Amberlite XAD 7 y XAD 8 se ofrecen como adsorbentes adecuados para retención cuantitativa, se han encontrado una amplia aplicación en virtud de su área superficial $500 \text{ m}^2/\text{g}$ y un tamaño de poro de 450 \AA , distribución uniforme del

tamaño de poro, durabilidad y estabilidad química frente a ácidos, bases y agentes oxidantes, lo hace ideal para la remoción de metales pesados como el Cr, Cd y As (Ahmad et al., 2015).

Tabla 4

Características de la resina Amberlite XAD

Amberlite	Matriz	Área superficial m ² /g	Tamaño de partícula mesh	Tamaño de poro (Å)
XAD-2	Estireno - divinilbenceno	300	20-60	90
XAD-4	Estireno - divinilbenceno	750	20-60	100
XAD-8	Ester acrílico	140	40-60	250
XAD-16	Estireno - divinilbenceno	800	20-60	200

Nota: Ahmad et al., 2015

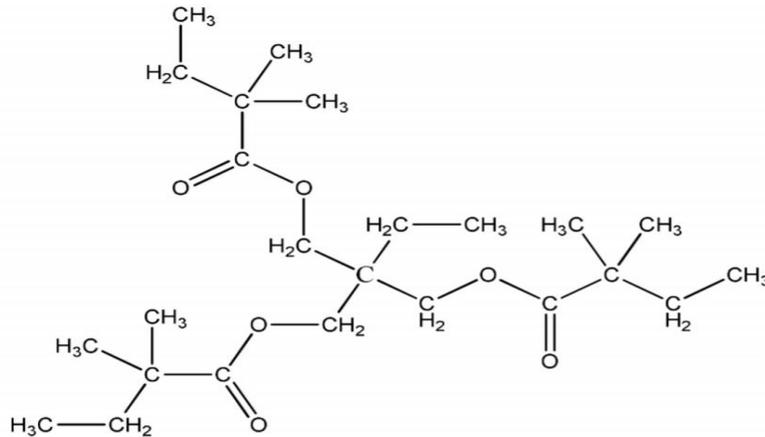
La estructura del XAD-7 se presenta a continuación:

Sigma-Aldrich (2022), menciona que la resina polimérica macroporosa XAD-7 es no iónica, sus propiedades de la resina son:

- Matriz: acrílica.
- Grupo activo: polimerica.
- Tamaño de partícula: 20 a 60 mesh.
- Tamaño de poro: 0,5 ml/g.
- Área superficial: 380 m²/g.
- Temperatura de ignición: 800 °F.
- Presión de vapor: 17 mmHg (20 °C)

Figura 3

Estructura de resina Amberlite XAD-7 HP



Nota: Sigma-Aladrich, 1998

De la normatividad vigente en la actualidad, es la siguiente

- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, establece que el nivel para As no deberá superar los 0,01 mg/L (Ministerio del Ambiente, 2017)
- Decreto Supremo N° 031-2010-SA, Reglamento de calidad de agua para consumo, establece que el nivel para As no deberá superar los 0,01 mg/L (MINSAL, 2010)

2.3. Definición de términos

Resina polimérica XAD-7. Resina que actúa como adsorbente de sustancias inorgánica e orgánicas.

Remoción de arsénico. Capacidad de reducir la concentración de arsénico en un medio (suelo o agua).

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1. Tipo de la investigación

- **Por su propósito:** es aplicada.
- **Por su profundidad:** es correlacional ya que se evaluará el efecto del uso de dos variables independientes.
- **Por su prolongación en el tiempo:** es transversal ya que el estudio se desarrollará en un momento puntual.
- **Por su naturaleza de los datos manejados es:** Cuantitativa.

3.2. Diseño de la investigación

La presente investigación corresponde a un diseño experimental donde se evaluó el efecto de dos variables independientes de estudio como: concentración XAD-7 (A) y tiempo (B), sobre las variables dependientes (propiedades fisicoquímicas y remoción de As)

Figura 4

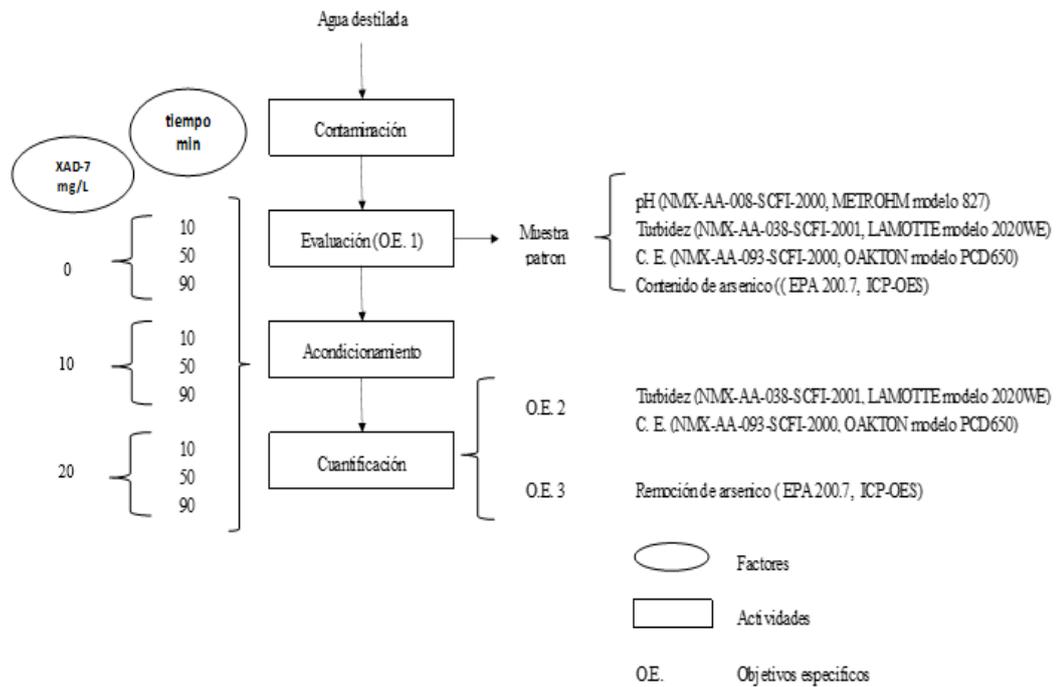
Diseño de investigación

A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₁ B ₃
A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	A ₂ B ₃
A ₃ B ₁	A ₃ B ₂	A ₃ B ₃

El trabajo de investigación presento como finalidad evaluar la resina XAD-7 a diferentes concentraciones (0, 15 y 30 mg/l) y diferentes tiempos (10, 50 y 90 min), se evaluó las propiedades fisicoquímicas como turbidez, pH conductividad eléctrica y remoción de As. Se utilizo un Diseño Completamente al Azar (DCA) con Arreglo Factorial de 3x3 con 3 repeticiones y, las diferencias estadísticas significativas se evaluaron mediante el análisis de la Prueba LSD, para ello se utilizó el software INFOSTAT (gratuito), el diseño y modelo estadístico detallamos a continuación:

Figura 5

Diagrama de flujo de acciones y actividades



Modelo estadístico.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ij} : es la valor u observación de las características químicas en la i -ésima especie de tuna y j -ésima repetición

i : 0, 10, 20 mg/L

j : 10, 50, 90 min

μ : Media general.

τ_i : Efecto de la i -ésima de XAD-7

β_j : Efecto de la j -ésima tiempo

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción de XAD-7 y tiempo

ε_{ij} : Error residual

3.3. Población y muestra

3.4.1. Población.

Agua contaminada con As (V), a partir de uso de agua destilada y adición de H_3AsO_4 .

3.4.2. Muestra.

La muestra corresponde a 27 litros de agua contaminada que serán distribuidos en vasos de precipitado de 1 litro durante el experimento.

3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos

3.4.1. Técnica para la recolección de datos.

Observación directa: Se utilizo para el caso de observaciones en el laboratorio donde se realizará la recolección de los datos.

Observación indirecta: Se utilizo para el caso de observaciones por el servicio de análisis del contenido de arsénico.

3.4.2. Instrumentos para recolección de datos.

Se utilizaron 9 tratamientos, cada tratamiento fue de 1 L de agua destilada que se contamina con H_3AsO_4 (Solución estándar de Arsénico Merck 1000 mg As/L), mediante la siguiente ecuación:

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2 \dots \dots \dots [Ecuación 1]$$

$$V_1 = \frac{V_2 * C_2}{C_1} \dots \dots \dots [Ecuación 1]$$

$$V_1 = \frac{(1L) * (0,5 \text{ mg/L})}{(1000 \text{ mg/L})} \dots \dots \dots [Ecuación 3]$$

$$V_1 = 0,00005L \approx 0,5mL \dots \dots \dots [Ecuación 4]$$

El valor calculado concuerda con el resultado del análisis BHIOS LABORATORIOS (Apéndice 3).

Se pesaron (0, 10 y 20 g) de resina polimérica Amberlite XAD-7 HP Sigma Aldrich (información de producto Apéndice 4), en una balanza Sartorius Modelo Entris 2224I-1S, en un vaso de precipitado se agregó 1 L de agua destilada más la solución estándar de arsénico y la resina XAD-7 HP.

Para la prueba de adsorción se utilizó un equipo de agitación Lavibond ET 740 a una velocidad de 50 rpm, y se programó a 10, 50 y 90 min de tiempo de agitación.

Para los análisis de los parámetros pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, se utilizó multiparamétrico Milwaukee modelo Mi 805, el pH de acuerdo

a la norma NMX-AA-008-SCFI-2000, y la conductividad eléctrica de acuerdo a la norma NMX-AA-093-SCFI-2000 introduciendo el electrodo en el vaso de precipitado de 1 L hasta que el valor de lectura se estabilizo, la turbidez se analizó de acuerdo a la norma NMX-AA-038-SCFI-2001 donde se utilizó 10 ml de la muestra que fueron colocadas en la porta muestra de turbidímetro LAMOTTE modelo 2020WE. Para la toma de datos se utilizó la tabla 5.

Tabla 5

Hoja de registro para la conductividad eléctrica y turbidez

Tratamiento	XAD-7	Tiempo	pH	Conductividad eléctrica (uS/cm)	Turbidez (NTU)
1	0 g	10 min			
2	0 g	50 min			
3	0 g	90 min			
4	10 g	10 min			
5	10 g	50 min			
6	10 g	90 min			
7	20 g	10 min			
8	20 g	50 min			
9	20 g	90 min			

Para la cuantificación de la concentración de arsénico en el agua, se aisló las muestras en envase PET de 1 l (27 muestras y un testigo), se envió al Laboratorio BHIOS S.A.C., ubicado en la ciudad de Arequipa, este laboratorio cuenta con acreditación Instituto Nacional de Calidad N° LE-055 INACAL, el protocolo utilizado corresponde a la norma EPA 200.7, correspondiente a la determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales, el equipo utilizado fue plasma de acoplamiento inductivo con espectrofotómetro de emisión óptico (ICP-OES), el porcentaje de remoción fue evaluado mediante al ecuación 5 en relación a la concentración testigo C_0 y las concentraciones obtenidas en los tratamientos (Acuña y Araya, 2016):

$$\% \text{ remocion} = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) * 100\% \dots \dots \dots [\text{Ecuación 5}]$$

Tabla 6

Hoja de registro para la conductividad eléctrica y turbidez

Tratamiento	XAD-7	Tiempo	Contenido inicial de arsénico (mg/L)	Contenido final de arsénico (mg/L)	Remoción de arsénico (%)
1	0 g	10 min			
2	0 g	50 min			
3	0 g	90 min			
4	10 g	10 min			
5	10 g	50 min			
6	10 g	90 min			
7	20 g	10 min			
8	20 g	50 min			
9	20 g	90 min			

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

Sobre los resultados obtenidos del uso de la resina XAD-7 y el tiempo sobre el pH, la tabla 7 muestra los resultados del análisis de varianza a partir de los datos que se presentan en el Apéndice 1, donde existe diferencia estadística significativa tanto en la resina, tiempo y la interacción resina * tiempo, a partir de que el p-valor es menor de 0,05, por lo se procedió a realizar la prueba de medias LSD Fisher

Tabla 7

Análisis de varianza para pH

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Resina	83	2	41,5	29408,39	<0,0001*
Tiempo	2,71	2	1,36	962	<0,0001*
Resina*Tiempo	3,41	4	0,85	603,96	<0,0001*
Error	0,03	18	1,40E-03		
Total	89,15	26			

Coefficiente de variación: 0,62

Nota: * diferencia altamente significativa

La tabla 8 muestra que la resina mejora la calidad del agua considerando que sin el uso de resina el pH presenta 3,72 pH y la adición de 20g/L mejora el pH

a 7,89, por lo que el uso de resina estadísticamente es mejor y superior a los demás niveles de aplicación de resina, además se muestra un incremento del pH con la aplicación de resina

Tabla 8

Prueba LSD Fisher de resina sobre el pH

Resina	Medias	n	Error estándar	
20	7,89	9	0,01	a
10	6,69	9	0,01	b
0	3,72	9	0,01	c

La tabla 9 muestra que el tiempo de tratamiento o exposición del agua con la resina logra que a 90 min el pH alcance 6,53 y es estadísticamente diferente a los demás, el pH a los 10 min 5,79, el comportamiento del tiempo con respecto al pH tiene una relación positiva.

Tabla 9

Prueba LSD Fisher de tiempo sobre el pH

Tiempo	Medias	n	Error estándar.	
90	6,53	9	0,01	a
50	5,96	9	0,01	b
10	5,79	9	0,01	c

La tabla 10 muestra la interacción entre la resina * tiempo, en la que el uso de 20 g/L de resina y tiempo de 90 minutos obtiene como resultado 9,02 pH, siendo estadísticamente diferente a los demás tratamientos, los menores valores son de aquellos que no se aplicó resina independientemente del tiempo (10, 50 y 90 min) con pH entre 3,7 a 3,74, todos ellos estadísticamente iguales entre sí.

Tabla 10

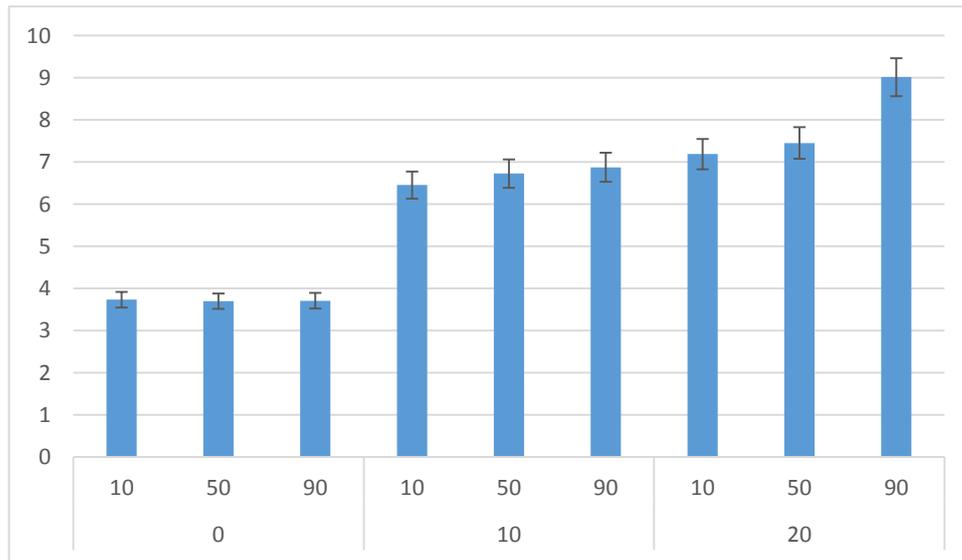
*Prueba LSD Fisher de resina * tiempo sobre el pH*

Resina	Tiempo	Medias	n	Error estándar	
20	90	9,02	3	0,02	a
20	50	7,45	3	0,02	b
20	10	7,19	3	0,02	c
10	90	6,88	3	0,02	d
10	50	6,73	3	0,02	e
10	10	6,46	3	0,02	f
0	10	3,74	3	0,02	g
0	90	3,71	3	0,02	g
0	50	3,7	3	0,02	g

La figura 6 muestra los promedios obtenidos tanto para la resina XAD-7 (0, 10 y 20 g/L) a diferentes tiempos de exposición (10, 50 y 90 min).

Figura 6

Resultado de uso de resina XAD-7 y tiempo sobre el pH



La tabla 11 muestra los resultados del análisis de varianza para conductividad eléctrica a partir de los datos que se presentan en el Apéndice 1, donde existe diferencia estadística significativa tanto en la resina, tiempo y la

interacción resina * tiempo, a partir de que el p-valor es menor de 0,05, por lo se procedió a realizar la prueba de medias LSD Fisher

Tabla 11

Análisis de varianza para conductividad eléctrica

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Resina	14969646	2	7484823,2	58918,43	<0,0001*
Tiempo	1702,3	2	851,15	6,7	0,0067*
Resina*Tiempo	1750,15	4	437,54	3,44	0,0294*
Error	2286,67	18	127,04		
Total	14975385	26			

Coefficiente de variación: 1,13

Nota: * diferencia altamente significativa

La tabla 12 muestra que la resina incrementa la conductividad eléctrica del agua, donde el uso de 20 g/L presenta 1910 uS/cm y estadísticamente es diferente a todos los demás, el agua que se contamina presenta 86,11 uS/cm, por lo que el uso de resina estadísticamente es mejor y superior a los demás niveles de aplicación de resina, además se muestra un incremento de la conductividad eléctrica con la aplicación de resina

Tabla 12

Prueba LSD Fisher de resina sobre la conductividad eléctrica

Resina	Medias	n	Error estándar	
20	1910	9	3,76	a
10	994,44	9	3,76	b
0	86,11	9	3,76	c

La tabla 13 muestra que el tiempo de tratamiento o exposición del agua con la resina logra que a 50 min la conductividad eléctrica alcance los 1006,44 uS/cm que estadísticamente es diferente solo a los 90 min con un valor de 987 uS/cm.

Tabla 13*Prueba LSD Fisher de tiempo sobre sobre la conductividad eléctrica*

Tiempo	Medias	n	Error estándar	
50	1006,44	9	3,76	a
10	997,11	9	3,76	ab
90	987	9	3,76	b

La tabla 14 muestra la interacción entre la resina * tiempo, en la que el uso de 20 g/L de resina y tiempo de 50 minutos obtiene como resultado 1934 uS/cm, siendo el valor más alto y estadísticamente diferente a los demás tratamientos, los menores valores son de aquellos que no se aplicó resina independientemente del tiempo (10, 50 y 90 min) con conductividad eléctrica entre 84,67 a 87,33, todos ellos estadísticamente iguales entre sí.

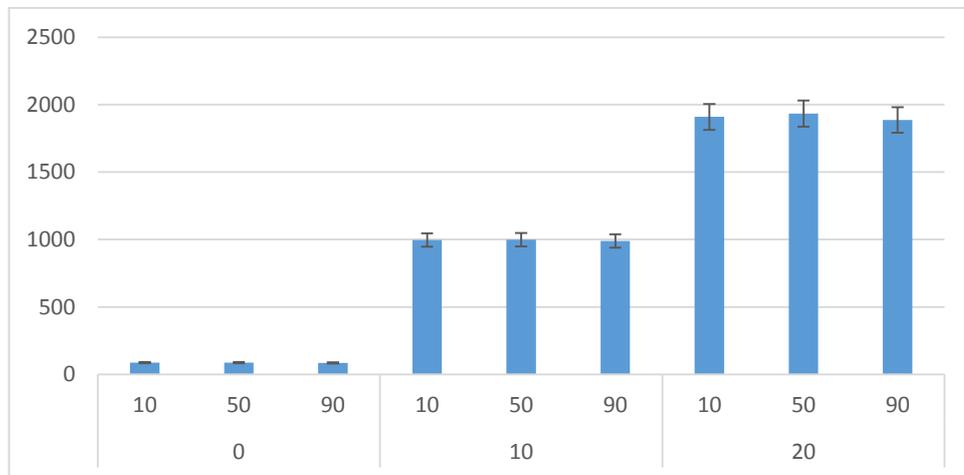
Tabla 14*Prueba LSD Fisher de resina * tiempo sobre sobre la conductividad eléctrica*

Resina	Tiempo	Medias	n	Error estándar	
20	50	1934	3	6,51	a
20	10	1909	3	6,51	b
20	90	1887	3	6,51	c
10	50	998	3	6,51	d
10	10	996	3	6,51	d
10	90	989,33	3	6,51	d
0	50	87,33	3	6,51	e
0	10	86,33	3	6,51	e
0	90	84,67	3	6,51	e

La figura 7 muestra los promedios obtenidos tanto para la resina XAD-7 (0, 10 y 20 g/L) a diferentes tiempos de exposición (10, 50 y 90 min), donde se observa que a 20 g/L la conductividad eléctrica es superior a los 1887 uS/cm. Por lo que la aplicación de la resina incrementa progresivamente la conductividad en el agua.

Figura 7

Resultado de uso de resina XAD-7 y tiempo sobre la conductividad eléctrica



La tabla 15 muestra los resultados del análisis de varianza para turbidez a partir de los datos que se presentan en el Apéndice 1, donde existe diferencia estadística significativa tanto en la resina, tiempo y la interacción resina * tiempo, a partir de que el p-valor obtenido son menores de 0,05, por lo se procedió a realizar la prueba de medias LSD Fisher

Tabla 15

Análisis de varianza para turbidez

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Resina	25,47	2	12,73	309,38	<0,0001*
Tiempo	1,62	2	0,81	19,67	<0,0001*
Resina*Tiempo	1,67	4	0,42	10,14	0,0002*
Error	0,74	18	0,04		
Total	29,5	26			

Coefficiente de variación: 15,94

Nota: * diferencia altamente significativa

La tabla 16 muestra que la resina incrementa la turbidez del agua, donde el uso de 20 g/L presenta 2,47 NTU y estadísticamente es diferente a todos los demás, el agua que se contamina presenta 0,09 NTU, por lo que el uso de resina estadísticamente incrementa la turbidez.

Tabla 16*Prueba LSD Fisher de resina sobre la turbidez*

Resina	Medias	n	Error estándar	
20	2,47	9	0,07	a
10	1,26	9	0,07	b
0	0,09	9	0,07	c

La tabla 17 muestra que el tiempo de tratamiento o exposición del agua con la resina logra que a 10 min la turbidez alcance los 1,58 NTU que estadísticamente es diferente a todos los demás, por lo que a menor tiempo mayor será la turbidez.

Tabla 17*Prueba LSD Fisher de tiempo sobre sobre la turbidez*

Tiempo	Medias	n	Error estándar	
10	1,58	9	0,07	a
90	1,25	9	0,07	b
50	0,98	9	0,07	c

La tabla 18 muestra la interacción entre la resina * tiempo, en la que el uso de 20 g/L de resina y tiempo de 10 minutos obtiene como resultado 3,24 NTU, siendo el valor más alto y estadísticamente diferente a los demás tratamientos, los tratamientos de 20g/L a tiempos de 90 y 50 obtuvieron 2,25 y 1,91 NTU respectivamente, ambos estadísticamente iguales entre sí, los menores valores son de aquellos que no se aplicó resina independientemente del tiempo (10, 50 y 90 min) con turbidez entre 0,04 a 0,16 NTU, todos ellos estadísticamente iguales entre sí.

La figura 8 muestra los promedios obtenidos tanto para la resina XAD-7 (0, 10 y 20 g/L) a diferentes tiempos de exposición (10, 50 y 90 min), donde se observa

que a 20 g/L la turbidez es superior a los 1,91 NTU. Por lo que la aplicación de la resina incrementa progresivamente la turbidez en el agua.

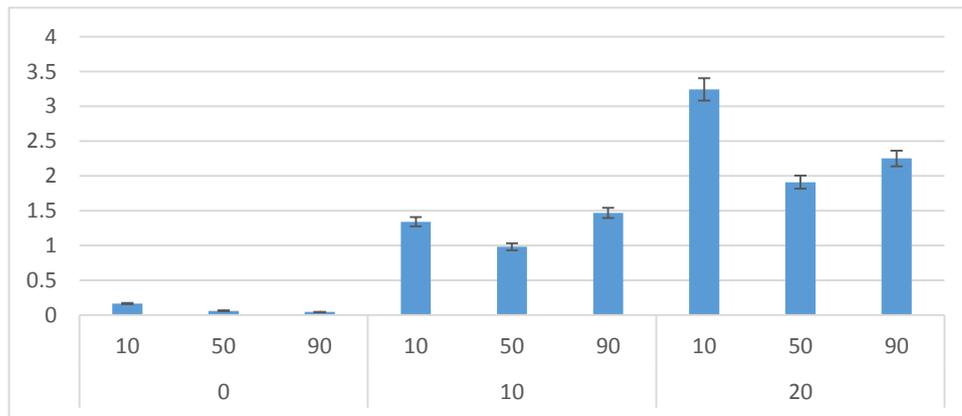
Tabla 18

*Prueba LSD Fisher de resina * tiempo sobre la turbidez*

Resina	Tiempo	Medias	n	Error estándar	
20	10	3,24	3	0,12	a
20	90	2,25	3	0,12	b
20	50	1,91	3	0,12	b
10	90	1,47	3	0,12	c
10	10	1,34	3	0,12	c
10	50	0,98	3	0,12	d
0	10	0,16	3	0,12	e
0	50	0,06	3	0,12	e
0	90	0,04	3	0,12	e

Figura 8

Resultado de uso de resina XAD-7 y tiempo sobre la turbidez



La tabla 19 muestra los resultados del análisis de varianza para la remoción de arsénico a partir de los datos que se presentan en el Apéndice 1, donde se observa que existe diferencia estadística significativa tanto en la resina, tiempo y la interacción resina * tiempo, a partir de que el p-valor obtenido son menores de 0,05, por lo se procedió a realizar la prueba de medias LSD Fisher.

Tabla 19*Análisis de varianza para remoción de arsénico*

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Resina	4530,43	2	2265,22	351,52	<0,0001*
Tiempo	5680,22	2	2840,11	440,73	<0,0001*
Resina*Tiempo	12394,05	4	3098,51	480,83	<0,0001*
Error	115,99	18	6,44		
Total	22720,7	26			

Coeficiente de variación: 14,38

Nota: * diferencia altamente significativa

La tabla 20 muestra que la resina incrementa la remoción de arsénico, donde el uso de 20 g/L presenta 35,75 % de remoción y estadísticamente es diferente a todos los demás, el agua que se contaminó presentó valor inicial es de 5,49 mg/L, por lo que el uso de resina estadísticamente incrementa la remoción de arsénico.

Tabla 20*Prueba LSD Fisher de resina sobre la remoción de arsénico*

Resina	Medias	n	Error estándar	
20	35,75	9	0,85	a
10	11,05	9	0,85	b
0	6,15	9	0,85	c

La tabla 21 muestra que el tiempo de tratamiento o exposición del agua con la resina logra que a 10 min la turbidez alcance los 1,58 NTU que estadísticamente es diferente a todos los demás.

Tabla 21*Prueba LSD Fisher de tiempo sobre la remoción de arsénico*

Tiempo	Medias	n	Error estándar	
90	38,15	9	0,85	a
10	8,15	9	0,85	b
50	6,66	9	0,85	b

La tabla 22 muestra la interacción entre la resina * tiempo, en la que el uso de 20 g/L de resina y tiempo de 90 minutos obtiene como resultado 99,06 % de remoción de arsénico, el uso de resina a 10 g/L a tiempos de 10, 50 y 90 minutos obtuvieron valores entre 8,76 a 12,48 % de remoción de arsénico respectivamente, siendo estadísticamente iguales entre sí.

Tabla 22

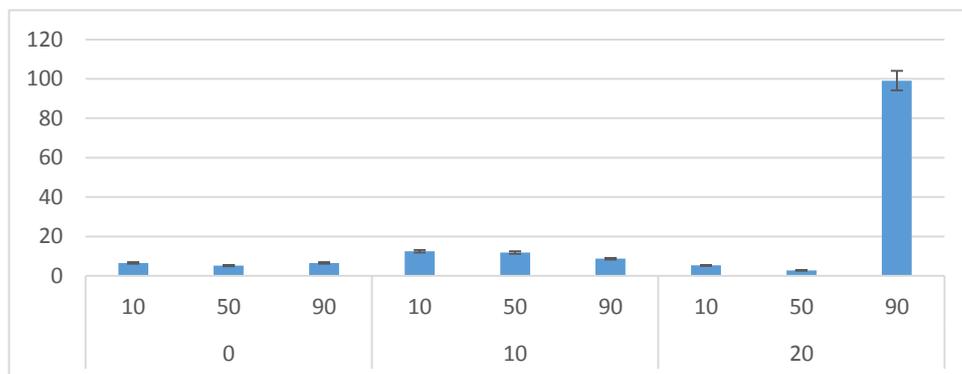
*Prueba LSD Fisher de resina * tiempo sobre sobre la remoción de arsénico*

Resina	Tiempo	Medias	n	Error estándar	
20	90	99,06	3	1,47	a
10	10	12,48	3	1,47	b
10	50	11,91	3	1,47	b
10	90	8,76	3	1,47	bc
0	90	6,62	3	1,47	cd
0	10	6,62	3	1,47	cd
20	10	5,36	3	1,47	cd
0	50	5,23	3	1,47	cd
20	50	2,84	3	1,47	d

La figura 9 muestra los promedios obtenidos tanto para la resina XAD-7 (0, 10 y 20 g/L) a diferentes tiempos de exposición (10, 50 y 90 min), donde se observa que a 20 g/L la remoción de arsénico es cercana a 100%. Por lo que la aplicación de la resina incrementa progresivamente la remoción de arsénico.

Figura 9

Resultado de uso de resina XAD-7 y tiempo sobre la remoción de arsénico



4.2. Contraste de hipótesis

De acuerdo al análisis de varianza realizado en los diferentes parámetros evaluados en el presente estudio:

La tabla 7 para el pH muestra que existe diferencia estadística altamente significativa, donde se obtuvo que la resina, el tiempo y la interacción resina * tiempo ($<0,0001$ p-valor), rechazándose la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alterna, por lo que el uso de resina y el tiempo afectan significativamente el pH del agua.

La tabla 11 para la conductividad eléctrica muestra que existe diferencia estadística significativa, donde se obtuvo que la resina presentó diferencia altamente significativa ($<0,0001$ p-valor), asimismo el tiempo y la interacción resina * tiempo con p-valor de 0.0067 y 0.0294 respectivamente, rechazándose la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alterna, por lo que el uso de resina y el tiempo afectan significativamente la conductividad eléctrica del agua.

La tabla 15 para la turbidez muestra que existe diferencia estadística altamente significativa, tanto de la resina, el tiempo ($<0,0001$ p-valor) y la interacción resina * tiempo (0,0002 p-valor), rechazándose la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alterna, por lo que el uso de resina y el tiempo afectan significativamente la conductividad eléctrica del agua

La tabla 19 para la remoción de arsénico muestra que muestra que existe diferencia estadística altamente significativa, donde se obtuvo que la resina, el tiempo y la interacción resina * tiempo ($<0,0001$ p-valor), rechazándose la hipótesis

nula y aceptando la hipótesis alterna, por lo que el uso de resina y el tiempo afectan significativamente en la remoción de arsénico del agua.

4.3. Discusión de resultados

La tabla 23 muestra el resumen de los resultados obtenidos en los diferentes tratamientos utilizados.

Según los resultados mostrados en la tabla 23, estos valores según el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM para la categoría 1 “Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable”.

El pH según la subcategoría A1 “Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección” recomienda niveles entre 6,5 a 8,5 pH, conductividad eléctrica hasta 1500 uS/cm y turbidez hasta 5 NTU. Para el pH, los valores de los tratamientos T5, T6, T7, y T8, se encontrarían dentro de los valores, donde el menor es T5 con 6.73 ± 0.032 pH y T8 7.45 ± 0.006 pH, según las características de la resina Ciopec et al. (2019) manifiesta que el pH del agua se ve incrementada, Yang et al. (2016) menciona que esto se debe a la ionización del agua por parte de la resina, ello debido a la estructura de la resina (Sigma-Aladrich, 1998).

Para la conductividad eléctrica T4, T5 y T6, se encontrarían dentro de los valores, donde el menor es T4 con 996.00 ± 8.544 uS/cm y T6 con 989.33 ± 5.508 uS/cm, Melo (2006) menciona que el uso de XAD-7 incrementa la conductividad eléctrica independiente mente del tratamiento para la que vaya ser utilizado (ácidos fúlvicos y metales pesados), esto se debe a la polaridad de la resina (Sigma-Aladrich, 1998).

Tabla 23*Resumen de resultados obtenidos*

	Resina (g)	tiempo (min)	pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Turbidez (NTU)	Remoción de arsénico (%)
T1	0	10	3.74 \pm 0.015 ^g	86.33 \pm 1.155 ^e	0.16 \pm 0.012 ^e	6.62 \pm 3.042 ^{cd}
T2	0	50	3.70 \pm 0.035 ^g	87.33 \pm 0.577 ^e	0.06 \pm 0.017 ^e	5.23 \pm 1.328 ^{cd}
T3	0	90	3.71 \pm 0.036 ^g	84.67 \pm 0.577 ^e	0.04 \pm 0.015 ^e	6.62 \pm 1.547 ^{cd}
T4	10	10	6.46 \pm 0.031 ^f	996.00 \pm 8.544 ^d	1.34 \pm 0.488 ^c	12.48 \pm 3.312 ^b
T5	10	50	6.73 \pm 0.032 ^e	998.00 \pm 2.646 ^d	0.98 \pm 0.010 ^d	11.91 \pm 0.824 ^b
T6	10	90	6.88 \pm 0.032 ^d	989.33 \pm 5.508 ^d	1.47 \pm 0.116 ^c	8.76 \pm 2.438 ^{bc}
T7	20	10	7.19 \pm 0.035 ^c	1909.00 \pm 25.515 ^c	3.24 \pm 0.285 ^a	5.36 \pm 4.850 ^{cd}
T8	20	50	7.45 \pm 0.006 ^b	1934.00 \pm 14.107 ^b	1.91 \pm 0.183 ^b	2.84 \pm 1.862 ^d
T9	20	90	9.02 \pm 0.076 ^a	1887.00 \pm 13.454 ^a	2.25 \pm 0.061 ^b	99.06 \pm 0.011 ^a

En la turbidez los valores obtenidos todos se encuentran dentro de lo recomendado por la normatividad menores a 5 NTU, siendo el mayor valor obtenido 2.25 ± 0.061 NTU, además que no se encontraron reportes donde se mida la turbidez. El incremento de la turbidez se debe a que las partículas proveniente de la resina XAD-7 no precipitaron, quedándose suspendidas, por lo que un floculante mejoraría la turbidez (Montoya et al., 2011) .

Para la remoción de arsénico el T9 alcanzo el $99.06 \pm 0.011\%$, siendo este el tratamiento más eficiente, considerando, otros estudios lograron remover el 75% por método SORAS (Chávez y Miglio, 2011) utilizando el método de fotoxidación solar SORAS removió un 75%, Francisca y Carro (2014) utilizando cloruro férrico un 95% y sulfato de aluminio un 80%, y Montero, Paredes y Rivera (2010), mediante el uso de quitosano en 12.5%

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Primera. De los factores utilizados en el estudio resina XAD-7 (0, 10 y 20 g) y el tiempo de agitación (10, 50 y 90 min), los parámetros evaluados pH, conductividad eléctrica y turbidez considerando solo la adición de resina XAD-7 obtuvieron valores de: Para pH los valores fueron 6,46 a 9,02 pH cuando el pH inicial del agua fue de 3,74. Para la conductividad eléctrica 989,33 uS/cm a 1934 uS/cm, no recomendándose utilizar 20 g/L ya que supera el nivel recomendado (1500 uS/cm). Para la turbidez los valores obtenidos entre 1,34 NTU a 3,24 NTU que se encuentran dentro del nivel recomendado por la normatividad DS. N° 004-2007-MINAM y DS N° 031-2010-SA.

Segunda. De los factores utilizados en el estudio resina XAD-7 (0, 10 y 20 g) y el tiempo de agitación (10, 50 y 90 min), para la remoción de arsénico,

considerando solo la adición de resina XAD-7, se utilizó el valor inicial de 5,5 mg/L determinándose que el uso de 20 g/L a 90 min el valor fue de 0,005 mg/L que se encuentran dentro del nivel recomendado por la normatividad DS. N° 004-2007-MINAM, representando una remoción del 99.06 %.

Tercera. El uso de resina como método de tratamiento del agua acida y con presencia de arsénico V presenta resultados adecuados.

5.2. Recomendaciones

Primera. Realizar estudios de optimización de parámetros para el uso adecuado de la resina XAD-7.

Segunda. Evaluar otros parámetros de adsorción para la mejor remoción de arsénico, además de la cinética de adsorción.

Tercera. Proponer métodos combinados para la remoción de arsénico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, A., y Araya, A. (2016). Potential natural low-cost adsorbents for the removal of arsenic in drinking water in Costa Rica Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 506. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i6.2899>
- Ahmad, A., Siddique, J., Laskar, M., Kumar, R., Mohd, S., Khatoon, A., y Shiekh, R. (2015). New generation Amberlite XAD resin for the removal of metal ions: A review. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 31, 104–123. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.12.008>
- Airam, E., Montoya, R., Hernández, L., Luévanos, M., y Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103–118.
- Apaza, R., y Calcina, M. (2014). Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de Carancas y Huata, Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Investigation*, 16(01), 51–58. <https://doi.org/10.18271/ria.2014.35>
- Argos, M., Kalra, T., Rathouz, P., Chen, Y., Pierce, B., Parvez, F., Islam, T., Ahmed, A., Rakibuz, M., Hasan, R., Sarwar, G., Slavkovich, V., Van Geen, A., Graziano, J., y Ahsan, H. (2010). Arsenic exposure from drinking water, and all-cause and chronic-disease mortalities in Bangladesh (HEALS): A prospective cohort study. *The Lancet*, 376(9737), 252–258. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60481-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60481-3)
- Balaji, T., y Matsunaga, H. (2002). Adsorption characteristics of As(III) and As(V)

- with titanium dioxide loaded Amberlite XAD-7 resin. *Analytical Sciences*, 18(12), 1345–1349. <https://doi.org/10.2116/analsci.18.1345>
- Bundschuh, J., y Litter, M. (2013). *Situación de América Latina con relación al problema global del arsénico* (Issue January 2010).
- Bundschuh, J., Nicolli, H., Scientific, N., y Blarasin, M.(2008). *Distribución de arsénico en la región sudamericana. January.*
- Chakraborti, D., Rahman, M., Das, B., Murrill, M., Dey, S., Chandra, S., Dhar, R. K., Biswas, B., Chowdhury, U., Roy, S., Sorif, S., Selim, M., Rahman, M., y Quamruzzaman, Q. (2010). Status of groundwater arsenic contamination in Bangladesh: A 14-year study report. *Water Research*, 44(19), 5789–5802. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.051>
- Chata, A. (2015). *Presencia de metales pesados (Hg, As, Pb y Cd) en agua y leche en la cuenca del río Coata 2015*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Chávez, M., y Miglio, M. (2011). Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. *Soc. Quím. Perú*, 77(4), 307–314. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2011000400008&script=sci_arttext
- Ciopec, M., Davidescu, C., Negrea, A., Duțeanu, N., Rusu, G., Grad, O., y Negrea, P. (2019). Amberlite XAD7 resin functionalized with crown ether and Fe(III) used for arsenic removal from water. *Pure and Applied Chemistry*, 91(3), 375–388. <https://doi.org/10.1515/pac-2018-0607>
- Ciopec, M., Negrea, A., Negrea, P., y Lupa, L. (2013). *Global Journal on Advances in Pure y Applied Sciences Arsenic removal from underground water*

through adsorption onto XAD-7 impregnated resin with mixed extractants. *I(1)*, 203–217.

Dąbrowski, A. (2001). Adsorption - From theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93(1–3), 135–224. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8)

Francisca, F., y Carro, M. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 30(2), 177–190.

GERESA-Moquegua. (2019). *Estado de vigilancia de la calidad de agua para consumo humano*.

Goel, R., Kapoor, S., Misra, K., y Sharma, R. (2004). Removal of arsenic from water by different adsorbents. *Indian Journal of Chemical Technology*, 11, 518–552.

Hosseini, A., Allahabadi, A., Rahmani, A., Rastegar, A., Khamirchi, R., Mehrpouyan, M., Hekma, R., y Pajohankia, Z. (2016). Thorium removal from weakly acidic solutions using titan yellow-impregnated XAD-7 resin beads: kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 309(2), 761–776. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4689-x>

Keshavarzi, B., Moore, F., Mosaferi, M., y Rahmani, F. (2011). The Source of Natural Arsenic Contamination in Groundwater, West of Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 3(3–4), 135–147. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0051-x>

Kuo, C., Moon, K., Wang, S., Silbergeld, E., y Navas, A. (2017). The association

- of arsenic metabolism with cancer, cardiovascular disease, and diabetes: A systematic review of the epidemiological evidence. *Environmental Health Perspectives*, 125(8). <https://doi.org/10.1289/EHP577>
- Litter, M. (2010). Actualización La problemática del arsénico en la Argentina : el HACRE. *Rev. Soc. Argent. Endocrinol. Ginecol. Reprod.(SAEGRE)*, XVII(2), 5–10. http://www.saegre.org.ar/revista/numeros/2010/n2/actualizacion_n2.pdf
- Lyubchik, S., Lyubchik, A., Lygina, O., Lyubchik, S., y Fonseca, I. (2011). Comparison of the Thermodynamic Parameters Estimation for the Adsorption Process of the Metals from Liquid Phase on Activated Carbons. *Thermodynamics - Interaction Studies - Solids, Liquids and Gases*. <https://doi.org/10.5772/19514>
- Medina, M., Robles, P., Mendoza, M., y Torres, C. (2018). Artículo de Revisión Arsenic Intake : Impact in Human Nutrition and Health. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 35(1), 93–102. <https://doi.org/10.17843/rpmpesp.2018.351.3604.93>
- Melo, L. (2006). *Análisis y caracterización de ácidos fúlvicos y su interacción con algunos metales pesados*. http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Analisis_y_caracterizacion_de_acidos.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2017). Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA). *El Peruano*, 6–9. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- MINSA. (2010). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N

° 031-2010-SA . Dirección General de Salud Ambiental Ministerio de Salud
Lima – Perú. *Dirección General de Salud Ambiental - Ministerio de Salud*,
45. <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/1590.pdf>

MINSA. (2019). Tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico. In *Ministerio de Salud*. [https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/ogitt/cati/3 BOLETÍN TÉCNOLOGICAS N-3 2019.pdf](https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/ogitt/cati/3%20BOLETÍN%20TÉCNOLÓGICAS%20N-3%202019.pdf)

Montero, Á., Paredes, B., y Rivera, M. (2010). Utilización de quitosana para la remoción de arsénico (As) del agua. *Superficies y Vacío*, 23, 136–139.

Montoya, C., Loaiza, D., Torres, P., Cruz, C., y Escobar, J. (2011). Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA, ISSN 1794-1237*, 137–148. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149222630010>

Morales, D., Avendaño, E., Zevallos, D., Fernández, J., Mendoza, Z., y Torres, A. (2017). Arsénico total no deseado ante valores referenciales de ph en agua superficial, cuenca hidrográfica sama, Región Tacna-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 19(3), 305–312. <https://doi.org/10.18271/ria.2017.295>

Negrea, A., Ciopec, M., Lupa, L., Davidescu, C., Popa, A., Ilia, G., y Negrea, P. (2011). Removal of AsV by FeIII-loaded XAD7 impregnated resin containing Di(2-ethylhexyl) phosphoric acid (DEHPA): Equilibrium, kinetic, and thermodynamic modeling studies. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 56(10), 3830–3838. <https://doi.org/10.1021/jc200476u>

Nriagu, J., Bhattacharya, P., Mukherjee, A., Bundschuh, J., Zevenhoven, R., y

- Loeppert, R. (2007). Arsenic in soil and groundwater: an overview. *Arsenic in Soil and Groundwater Environment - Biogeochemical Interactions, Health Effects and Remediation*, 9(06), 3–60. [https://doi.org/10.1016/s0927-5215\(06\)09001-1](https://doi.org/10.1016/s0927-5215(06)09001-1)
- Otero, A., Gago, R., Antelo, J., Fiol, S., y Arce, F. (2015). Surface complexation modelling of arsenic and copper immobilization by iron oxide precipitates derived from acid mine drainage. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 67(3), 493–508. <https://doi.org/10.18268/BSGM2015v67n3a12>
- Pinto, E. (2018). *Evaluación de los metales pesados en los ríos vizcachas y chilota distrito de Chojota, provincia General Sanchez Cerro, región de Moquegua*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Saborío, L., y Hidalgo, L. (2015). Consumo de arsénico y riesgo cardiovascular. *Medicina Legal de Costa Rica*, 32(1), 114–118.
- Sarkar, A., y Paul, B. (2016). The global menace of arsenic and its conventional remediation - A critical review. *Chemosphere*, 158, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.043>
- Shaibur, M., Kitajima, N., Sugawara, R., Kondo, T., Alam, S., Imamul, S., y Kawai, S. (2008). Critical toxicity level of arsenic and elemental composition of arsenic-induced chlorosis in hydroponic sorghum. *Water, Air, and Soil Pollution*, 191(1–4), 279–292. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9624-0>
- Sigma-Aldrich. (1998). AMBERLITE XAD POLYMERIC RESINS Replacement for Product Code 21 , 648-8. *Area*, 16–18.
- Sigma-Aldrich. (2022). *Amberlite® XAD7HP 20-60 mesh | Sigma-Aldrich*. <https://www.sigmaaldrich.com/PE/es/product/sigma/xad7>

- Silva, L. (2013). Arsenic, the unclassifiable element. *Educacion Quimica*, 24(EXTRAORD. 2), 495–500. [https://doi.org/10.1016/s0187-893x\(13\)72519-9](https://doi.org/10.1016/s0187-893x(13)72519-9)
- Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Singh, V., y Prasad, S. (2015). Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 247–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>
- Smith, A., Lingas, E., y Rahman, M. (2000). Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency: RN - Bull. W.H.O., v. 78, p. 1093-1103. *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), 1093–1103.
- Villa, G., Huamaní, C., Chávez, M., y Huamaní, J. (2018). Evaluación de la remoción de arsénico en agua superficial utilizando filtros domiciliarios. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 35(4), 652–656. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.354.3715.652>
- Villena, J. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 304. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>
- Yang, K., Qi, L., Wei, W., Wu, W., y Lin, D. (2016). Prediction of the sorption capacities and affinities of organic chemicals by XAD-7. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 1060–1070. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4012-3>
- Zhao, F., McGrath, S., y Meharg, A. (2010). Arsenic as a food chain contaminant: Mechanisms of plant uptake and metabolism and mitigation strategies.

Annual Review of Plant Biology, 61, 535–559.

<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112152>