



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Evaluación mediante meta-análisis del uso de
nanoadsorbentes para remover arsénico (III y V) en medio
acuoso**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental

AUTOR:

Huarcaya Sanchez, Limber Luis (orcid.org/ 0000-0002-0160-045X)

ASESOR:

Dr. Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto (orcid.org/0000-0002-8200-4640)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Innovación tecnológica y desarrollo sostenible

Lima – Perú

2021

DEDICATORIA

Para mis abuelos, padres, hermana y amigos.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia, asesor de tesis, a los profesores en mi carrera, compañeros de universidad, y a la persona que se tome el tiempo de leer el presente.

Índice de Contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. Introducción.....	1
II. Marco Teórico.....	4
III. Metodología.....	13
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	13
3.2. Variables y Operacionalización.....	13
3.3. Población, muestra y muestreo.....	14
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	14
3.5. Procedimientos.....	14
3.6. Método de análisis de datos.....	16
3.7. Aspectos éticos.....	17
IV. Resultados.....	18
4.1. Cinética e isothermas.....	18
4.2. Parámetros de adsorción.....	19
V. Discusiones.....	23
5.1. Cinética e isothermas.....	23
5.2. Influencia de los parámetros.....	24
5.3. Meta-análisis.....	26
VI. Conclusiones.....	27
VII. Recomendaciones.....	28
VIII. Bibliografía.....	29
IX. Anexo.....	41

Índice de tablas

Tabla 1: Características clínicas de la intoxicación por arsénico

Tabla 2: Efecto de la dosis del adsorbente en la eficiencia de remoción.

Tabla 3: Parámetros termodinámicos

Tabla 4: Metodología de búsqueda.

Tabla 5: Coincidencias entre modelos cinéticos e isotermas.

Índice de Figuras

Figura 1: Estabilidad del arsénico disuelto en agua, respecto al pH y Eh de agua a 25° C.

Figura 2: Optimización de los parámetros de adsorción

Figura 3: Proceso de recolección de artículos.

Figura 4: Distribución de modelos empleados para definir a) la cinética y b) las isotermas de adsorción, respecto a la cantidad de estudios totales.

Figura 5: Investigación de la distribución del pH para arsenito (a) y arsenato (b); caja de bigotes (c); y correlación entre la eficiencia de remoción y arsenito (d), y arsenato (e).

Figura 6: Distribución de la concentración inicial para arsenito (a) y arsenato (b); caja de bigotes (c); y correlación entre la eficiencia de remoción y arsenito (d) y arsenato (e).

Figura 7: Distribución de la dosis para arsenito (a) y arsenato (b); gráfico de cajas (c); y correlación entre la eficiencia de remoción y arsenito (d), y arsenato (e).

Figura 8: Distribución del tiempo de contacto para arsenito (a) y arsenato (b); gráfico de cajas (c); y correlación entre la eficiencia de remoción y arsenito (d) y arsenato (e).

Resumen

En este estudio se analizaron los principales parámetros y mecanismos de adsorción del As(III) y As(V) usando nanoadsorbentes a base de hierro. La obtención de documentos científicos se realizó en las bases de datos Scopus y Ebsco, posteriormente aplicando criterios de exclusión se obtuvieron un total de 10 artículos científicos. Para el meta-análisis se empleó el coeficiente de correlación y la prueba t de Student con N-2 grados de libertad y un 95% de confianza. La correlación entre los parámetros de adsorción y la eficiencia de remoción siguen la jerarquía de: tiempo de contacto > concentración inicial > pH > dosis del adsorbente para arsenito y tiempo de contacto > concentración inicial > dosis del adsorbente > pH para arsenato. El modelo cinético y de equilibrio de mejor ajuste a los datos experimentales fueron el pseudo segundo orden y la isoterma de Langmuir (para As(III) y As(V)), lo que supone una mayor afinidad de naturaleza química. Por último, el análisis de cada parámetro de adsorción mostró concordancias en cuanto a la literatura existente, pero también la posibilidad de estudios complementarios.

Palabras clave: arsénico, óxido de hierro, nanoadsorbente, cinética, isoterma.

Abstract

The main parameters and mechanisms of As(III) and As(V) adsorption using iron-based nanoadsorbents were analyzed. The scientific papers were obtained from the Scopus and Ebsco databases, then applying exclusion criteria, a total of 10 scientific articles were obtained. For the meta-analysis, the correlation coefficient and Student's t-test with N-2 degrees of freedom and 95% confidence were used. The correlation between adsorption parameters and removal efficiency follow the hierarchy of: contact time > initial concentration > pH > adsorbent dose for arsenite and contact time > initial concentration > adsorbent dose > pH for arsenate. The kinetic and equilibrium model of best fit to the experimental data were the pseudo-second order and Langmuir isotherm (for As(III) and As(V)), implying a higher affinity of chemical nature. Finally, the analysis of each adsorption parameter showed agreement with respect to the existing literature, but also the possibility of complementary studies.

Key words: arsenic, iron oxide, nanoadsorbents, kinetics, equilibrium.

I. Introducción

En la actualidad, el agua dulce representa el 2.5% del agua total, del cual el 30% proviene de las aguas subterráneas (Amen et al., 2020). Debido a ello, las investigaciones respecto a su calidad han tomado mayor relevancia. Sin embargo, uno de los contaminantes que mayor grado de riesgo ha presentado y que se encuentra en los cuerpos de agua es el arsénico (Uppal, Zheng y Le, 2019; Ahmad y Khan, 2015). Cabe mencionar que el arsénico puede encontrarse en diferentes formas tanto en el suelo, aire y cuerpos hídricos (Chen et al., 2019). Sin embargo, la forma más común de introducción al organismo es por medio del agua (Guo et al., 2018), principalmente del agua potable contaminada con arsénico proveniente de pozos instalados en sedimentos de aluvión (Shahid et al., 2018).

Diversas organizaciones del mundo, como la Organización Mundial de la Salud (WHO), la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) han catalogado al arsénico como un carcinógeno, permitiendo una concentración máxima en agua potable de 10 µg/L (Yang et al., 2020). Se estima que millones de personas alrededor del mundo son potencialmente expuestas a la ingesta de agua subterránea contaminada con arsénico (Ishikawa et al., 2017). De igual forma, existen un gran número de estudios que relacionan la exposición al arsénico con diferentes tipos de cáncer (Pullella y Kotsopoulos, 2020; Di Giovanni et al., 2020), mientras que su ingesta a corto plazo puede causar anomalías cardíacas, vómitos, calambres musculares y edema facial (Jain y Chandramani, 2018).

El arsénico en fuentes de agua es producto de actividades antropogénicas y procesos naturales (Yang et al., 2020). Así mismo, cabe mencionar que, en medios acuáticos, las formas inorgánicas en las que se presenta el arsénico son el arsenito ($\text{As}[\text{III}]$) y el arsenato ($\text{As}[\text{V}]$) (Niazi y Burton, 2016) mientras que, entre las especies orgánicas están el ácido dimetilarsenico, ácido monometilarsonico y la arsenobetaína (Lemonte et al., 2017). Comparado al arsenato, el arsenito presenta mayor peligro potencial, tanto por su aumentada dificultad de remoción, como por su impacto en la salud (Lobo et al., 2019).

Diferentes países alrededor del mundo presentan problemas con respecto a la contaminación por arsénico en agua potable. Se calcula que por lo menos 200 millones de personas a nivel mundial presentan riesgo de exposición al arsénico en aguas con niveles elevados (Uppal, Zheng y Le, 2019). Entre ellas, se encuentra China con 20 millones (Smith et al. 2017), Bangladesh, Pakistan y Vietnam con 10 millones (Uppal, Zheng y Le, 2019; Podgorski et al., 2017; Shahid et al., 2018). Asimismo, se estima que en Latinoamérica cerca de 14 millones de personas hacen uso de agua que se encuentra contaminada con arsénico ($>10 \mu\text{g/L}$) (Kumar et al., 2019; Litter et al., 2019). En Perú fueron reportados casos en el norte (Mondal et al., 2019), Altiplano-Puna (Tapia et al., 2019) y amazonía peruana (De Meyer et al., 2017).

Frente a esta realidad lo que se busca son tecnologías de tratamiento más eficientes, de bajo costo y fácil manejo operativo (Ghosh, Debsarkar y Dutta, 2019), principalmente, para los países con menor capacidad económica y donde se realizan actividades que ponen en riesgo la calidad del agua. Existen gran cantidad de artículos que analizan las diferentes tecnologías y sus mecanismos de remoción, entre las cuales destacan la adsorción, intercambio iónico, coagulación-filtración, separación por membrana (Das et al., 2020; Gao et al., 2020; Ghosh, Debsarkar y Dutta, 2019; Stanić y Nujić, 2015). Entre ellos, la adsorción se perfila como una de las más prometedoras, por sus óptimos resultados para remover contaminantes (Çermikli et al., 2020; Liu et al., 2020).

Asimismo, la nanotecnología se perfila como una herramienta para mejorar los materiales de adsorción (Saleem y Zaidi, 2020). Las investigaciones demuestran que los nanoadsorbentes poseen gran capacidad de adsorción.(Tahoon et al., 2020; Saleem y Zaidi, 2020).

Por otro lado, en los últimos años, se han abordado estudios de meta-análisis referidos a la adsorción de contaminantes tales como la introducción de diferentes tipos de tintes (Azari et al., 2020) y el estudio del biocarbón y sus propiedades (Hassan et al., 2020). De igual forma, numerosos estudios experimentales abordan la adsorción de arsénico (Kumar et al., 2019; Ishikawa et al., 2017; Amen et al., 2020; Liu et al., 2020). Sin embargo, en lo que respecta

a meta-análisis, aún existe un vacío de información respecto al uso de nanoadsorbentes para remover el arsénico III y V.

Por ende, el objetivo principal del trabajo de investigación es evaluar el uso de nanoadsorbentes a base de hierro para remover arsénico en medio acuoso. Para tal fin fue necesario plantearse los siguientes objetivos específicos: i) analizar el uso de modelos cinéticos e isothermas empleadas iii) analizar la influencia de los parámetros en el rendimiento y iii) meta-analizar mediante correlación cada parámetro de adsorción y la eficiencia de remoción.

Los resultados de la investigación ayudarán a crear un marco de referencia que sirva como guía para la toma de decisiones sobre la adsorción de arsénico en medio acuoso natural. Asimismo, la investigación planteada compila diferentes tipos de nanoadsorbentes a base de hierro, lo cual ayudará en los investigadores del tema, a escudriñar e impulsar las tecnologías e insumos más prometedores.

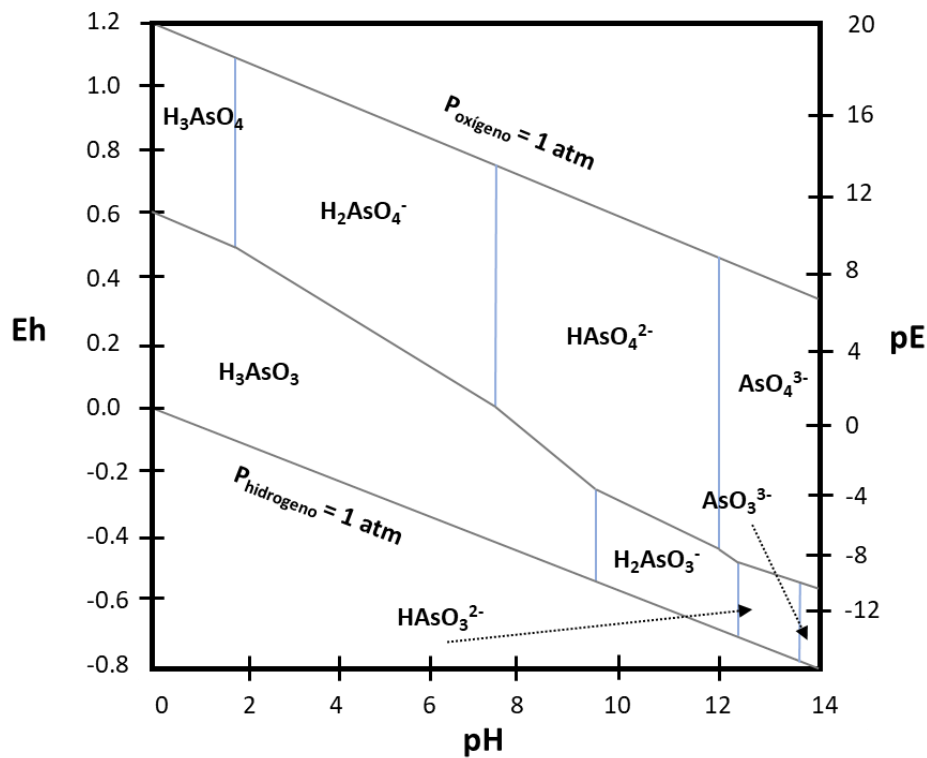
II. Marco Teórico

El arsénico es considerado el 12^{vo} compuesto más común en la naturaleza. Presenta una abundancia en la corteza terrestre de 1.8 ppm en peso (Chaves et al., 2015). Este metaloide puede llegar a las aguas naturales a través de la lixiviación de rocas y sedimentos compuestos por agentes reductores (Jain y Ali, 2000). Asimismo, estudios han demostrado que altas concentraciones de bicarbonato en aguas subterráneas puede relacionarse con la liberación de As (Rasool et al., 2016), causado por los iones bicarbonato que movilizan al arsénico desde los sedimentos desde condiciones óxicas como anóxicas (Shahid et al., 2018).

Existe una gran variedad de fuentes de arsénico, desde pequeñas cantidades provenientes de las actividades mineras, los desagües agrícolas, sedimentos, la eliminación de desechos industriales y municipales (Ahoulé et al., 2015) , hasta los residuos industriales (Litter et al., 2019). En contraste a otros elementos, su presencia en el ambiente se debe a un 90% de fuentes naturales (Reid et al., 2020).

El arsenito y arsenato son las especies de arsénico más comunes en los cuerpos hídricos (Lobo et al., 2019). Cabe resaltar que, para la presencia de arsenito en la forma de H_3AsO_3 , es vital que el medio se encuentre en condiciones de reducción a un pH inferior aproximado de 9.2 (Ishikawa et al. 2017). Por otro lado, bajo un ambiente oxidante y un pH superior al neutro, la forma dominante es el arsenato pentavalente cargado negativamente (Staníc y Nujić, 2015). En la figura 2 se detalla el comportamiento químico del arsénico en agua, en función del pH, pE y potencial redox.

Figura 1: Estabilidad del arsénico disuelto en agua, respecto al pH y Eh de agua a 25° C.



Fuente: Sarkar y Paul (2016).

Existe un amplio espectro de investigaciones relacionadas a los impactos negativos que trae consigo la ingesta de arsénico y su permanencia en el cuerpo. Ried et al. (2019) encontraron una correlación estadísticamente significativa entre los casos por cáncer de pulmón y los niveles de contaminación del agua, asimismo, estiman que alrededor de 160 millones de personas han estado expuestas a este agente químico. Entre las diferentes especies de arsénico, es el arsenito (3+) el que presenta mayor toxicidad para el ambiente y la salud debido a su capacidad de ser absorbido por las células (Dhoble et al., 2017). En la tabla 1 se muestran las enfermedades clínicas que produce el arsénico, separadas en tres fases: primera fase, fase media y terminal.

Tabla 1: Características clínicas de la intoxicación por arsénico.

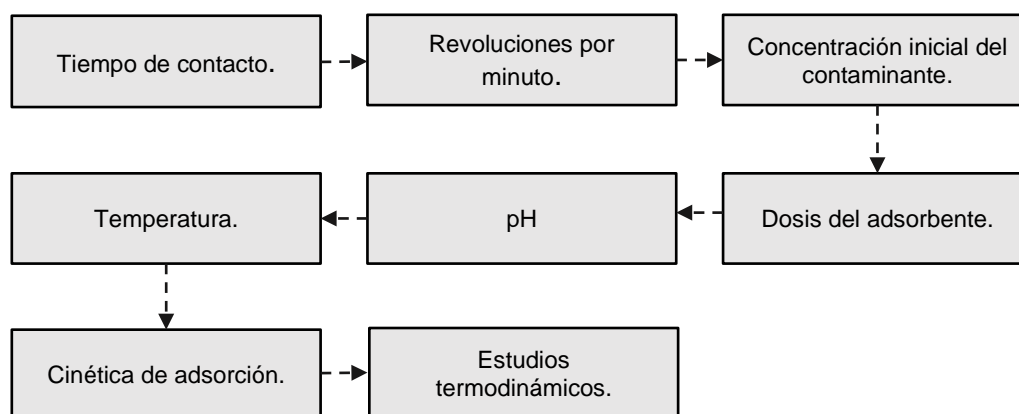
Primera fase	Fase media	Fase terminal
Melanosis (manchada/difusa)	Pigmentación de la gota de lluvia (leucomelanosis)	Enfermedad renal crónica e insuficiencia renal
Queratosis (manchada/difusa)	Hiperqueratosis	Enfermedad hepática crónica y fallo hepático
Conjuntivitis	Edema de pedal sin fovea	Enfermedad vascular periférica y gangrena
Bronquitis aguda	Neuropatía sensoriomotora distal	Piel, pulmón, vejiga Malignidad
Gastroenteritis	Proteinuria	Bronquitis crónica
Hepatomegalia y pruebas de función hepática trastornada		

Fuente: Jain y Chandramani, 2018.

Dentro de los tratamientos creados para la remoción de contaminantes en medio acuoso se encuentra el proceso de adsorción. Este tratamiento se basa en la concentración del contaminante (líquido o gas) en la interface de adsorbente (sólido). Adicionalmente, se han diseñado compuestos a escala nano (10^{-9}) con el fin de mejorar la eficiencia de remoción (Staníc y Nujić, 2015). Trabajos como el de (Ashraf et al., 2019) evalúan la remoción que poseen los nanocompuestos a base de titanio. Por otro lado, Manyangadze et al. (2020) analizan el mejoramiento de nanocompuestos a base de hierro, sílice y aluminio para remover metales pesados.

Sin embargo, también es fundamental ejecutar una correcta metodología experimental a fin de obtener parámetros óptimos de adsorción de cada nanocompuesto. Entre estas tenemos al pH inicial y aniones coexistentes en la solución, dosis del adsorbente, concentración del contaminante, temperatura del medio, tiempo de contacto, revoluciones por minuto, proceso batch o en columnas, etc. (Yu et al., 2019; Liu et al., 2018). La figura 1 muestra la metodología experimental hecha por Prabhakar y Samadder (2020) que se basa en mantener constante un conjunto de variables mientras se optimiza la restante.

Figura 2: Optimización de los parámetros de adsorción



Fuente: Prabhakar y Samadder, 2020.

Con respecto al papel que ocupa el pH en el funcionamiento de nanoadsorbentes a base de Fe_2O_3 , De Oliveira et al. (2020) obtuvieron mayor capacidad de adsorción cuando el pH se limita a 2 y decrece mientras aumenta hasta 7.9; Yu et al. (2019) obtuvo una adsorción del 100% para As(V) a un rango de pH de 2 a 4 y una adsorción máxima a un pH 9 para As(III); Liu et al. (2018) evaluó la eficiencia de remoción de As(V) a un pH 3, obteniendo un 85%; para el caso de Lin et al. (2020) un pH óptimo de 3 y 7 resultó con una eficiencia de remoción de $\approx 65\%$ y 57% para arsénico V y III respectivamente.

Para comprender el funcionamiento, es necesario recordar que los iones arsénico se encuentran en soluciones a un $\text{pH} > 2$ (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} , AsO_4^{3-}) (Sarkar y Paul, 2016). Como segundo dato, el pH en el punto de carga cero (pH_{zpc} por sus siglas en inglés) nos indica a que valor de pH la carga superficial del adsorbente cambia positiva o negativamente. La carga superficial de los nanoadsorbentes a base de óxido de hierro tiende a ser positivo a pH menores al punto de carga cero y es gracias a la electrostática entre la carga positiva del adsorbente y negativa del adsorbato, que la adsorción es mejor (Yu et al., 2019; Liu et al., 2018; Lin et al., 2020). Adicionalmente, cabe resaltar que esta carga superficial puede surgir gracias a la protonación y desprotonación de los sitios anfotéricos $\equiv\text{FeOH}_2^+$ y $\equiv\text{FeO}^-$ por debajo y encima del punto de carga cero (PZC), respectivamente. (Siddiqui y Chaudhry, 2017).

Respecto a la dosis del adsorbente, numerosos estudios demuestran que juega un papel fundamental, resultando en una mayor remoción del arsénico cuanto

mayor es la dosis del adsorbente (Wojciechowska y Bielun, 2020; De Oliveira et al., 2020; Robinson et al., 2020; Prabhakar y Samadder, 2020; Yu et al., 2019). Sin embargo, hay que tener en cuenta que la dosis del adsorbente debe ser ajustada de acuerdo a la concentración inicial del contaminante, no solo para un ahorro económico, sino también para obtener el requerido grado de adsorción (Wojciechowska y Bielun, 2020). En ese sentido, la tabla 2 muestra como la eficiencia de remoción aumenta respecto a la dosis.

Tabla 2: Eficiencia de remoción en función de la dosis del nanoadsorbente.

	Fe ₃ O ₄	PGA/P-Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
D ₁	1	0.1	0.2
R ₁	99	77	75
D ₂	2.5	0.3	0.75
R ₂	100	100	92
D ₃	5	0.5	2
R ₃	100	100	92
D ₄	10	N.R	5
R ₄	100	N.R	92.5

Nota: Fe₃O₄ (pH = 2; C₀ = 10 ppm) (Wojciechowska y Bielun, 2020) / PGA/P-Fe₂O₃ (pH = 5; T. de contacto = 120 min; C₀ = 5 ppm) (Yu et al., 2019) / Al₂O₃ (pH = 6.5; T. de contacto = 120 min.; C₀ = 500 ppb) (Prabhakar y Samadder, 2020).

El tiempo de contacto es también un factor que no puede pasar desapercibido en una investigación experimental. Lin, Lu y Liu (2012) determinaron, mediante el uso de nanopartículas de Fe₂O₃ que a una dosis de 0.08 g/L y 30°C, el arsenito y arsenato (pH 6 y 3 respectivamente) muestran una disminución en su concentración del 30% y 45% respectivamente, en los primeros 15 minutos de iniciado el proceso. Estudios como el realizado por De Oliveira et al. (2020) muestran que a una dosis de 0.67 g/L y una concentración inicial de arsenato de 30 mg/L, este parámetro de eficiencia llega a su equilibrio en las primeras 7 horas. Por último, Prabhakar y Samadder (2020) encontraron que, utilizando Al₂O₃ (nano-aluminio), a una concentración inicial del arsenito de 100 ppb, dosis de 1g/L, pH de 6.5 y temperatura a 298 K, se obtiene una remoción del 97.5% en equilibrio en los primeros 120 minutos.

La finalidad de manipular el tiempo de contacto es para conocer las mejores condiciones para estimar la capacidad de adsorción. De manera que, para

conocer el valor en equilibrio mas preciso, es fundamental proporcionar el tiempo suficiente (Prabhakar y Samadder, 2020). Mientras mas tiempo transcurre, los sitios activos del adsorbente se saturan hasta llegar al equilibrio. Asimismo, la fuerza de repulsión entre las especies ya sorbidas y las que se encuentran en la solución favorecen el decaimiento de sitios activos disponibles (Robinson et al., 2020).

En los procesos de adsorción, evaluar la isoterma es muy importante puesto que ayuda a comprender la conexión entre el adsorbente que contiene al soluto y la concentración de soluto en equilibrio a una temperatura constante (Pal, 2015; Wang y Guo, 2020). La ecuacion (1) muestra la isoterma de Langmuir que supone una superficie del adsorbente con sitios activos de energia uniforme, la cual propicia la adsorción de una única capa, la misma que al saturarse se consigue la máxima capacidad de adsorción (Prabhakar y Samadder, 2020), su forma lineal se muestra en la ecuación (2). En cuanto al modelo de Freundlich, mostrada en la ecuación (3) y su respectiva forma lineal en (4), asume que el adsorbente esta compuesto por una superficie heterogenea, en la que debido al aumento de sitios no disponibles, la entalpía de la adsorción disminuye logarítmicamente (Pal, 2015).

$$A_e = \frac{A_{max} * K_L * C_e}{1 + K_L * C_e} \quad (1)$$

$$\frac{C_e}{A_e} = \frac{1}{K_L * A_{max}} + \frac{C_e}{A_{max}} \quad (2)$$

$$A_e = K_F + C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$\ln(A_e) = \ln(K_F) + \frac{1}{n} * \ln(C_e) \quad (4)$$

Donde A_e y A_{max} son los valores de capacidad de adsorción en equilibrio y máxima respectivamente. C_e es la concentración de arsénico en la solución en equilibrio. Las constantes de los modelos K_F , K_L estan relacionadas a la energia de adsorción y capacidad de adsorción, respectivamente. En cuanto a $1/n$, es un factor de heterogeneidad (De Oliveira et al., 2020).

De igual forma, existen modelos para determinar la cinética de adsorción, la cual hace referencia a la cantidad de adsorbato adsorbido por unidad de adsorbente,

en un tiempo determinado. Investigaciones como las de Tamayo et al. (2019), Predoi et al. (2020), Robinson et al. (2020), Thy et al. (2020), Prabhakar y Samadder (2020) mencionan tanto a las ecuaciones de pseudo primer orden como de segundo orden. En ambos casos, se utiliza el que posea una mayor correlación entre los datos teóricos y experimentales.

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log}(q_e) - \frac{K_1 * t}{2.303} \quad (5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{K_2 * q_e^2} \quad (6)$$

Donde k_1 (L/min) y k_2 (g/ $\mu\text{g} \times \text{min}$) son las constantes de las ecuaciones de primer y segundo orden respectivamente. q_e y q_t son las capacidades de adsorción en el equilibrio y en un tiempo dado, respectivamente y t es el tiempo (min) al cual se tomó la medida.

Los parámetros termodinámicos juegan un papel importante para el investigador, ya que proporcionan información relevante respecto a la factibilidad y la naturaleza del proceso de adsorción (Renteria et al. 2010). Investigaciones como las de Renteria et al. (2010) y Prabhakar y Samadder (2020) muestran la importancia de entender la energía libre de Gibb's (ΔG°), cambio de entalpía (ΔH°) y cambio de entropía (ΔS°). En la tabla 3 se muestra la ecuación e interpretación de cada parámetro.

Tabla 3: Parámetros termodinámicos

Parámetro	Definición	Ecuación	Referencia
ΔG°	Valores negativos muestran la espontaneidad del proceso, así como su viabilidad. De igual forma, una relación inversa con la temperatura indica que la adsorción es mejor a temperaturas altas.	$\Delta G^\circ = -R \times T \times \text{Ln}(K_c)$ $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - \Delta S^\circ$	(Nassar et al., 2017)

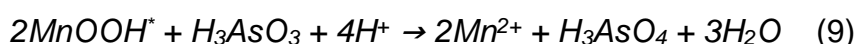
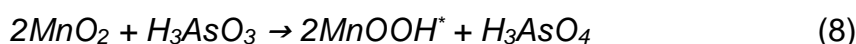
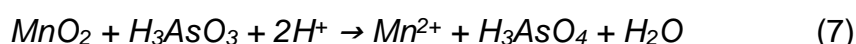
ΔH° Un cambio de entalpía positivo, indica un proceso endotérmico. Valores proceden de graficar K_L contra $1/T$ (Onyango et al., 2004)

ΔS° Valores bajos indican la disminución del movimiento de iones del adsorbato. Valores proceden de graficar K_L contra $1/T$ (Renteria et al., 2010; Prabhakar y Samadder, 2020)

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los mecanismos. En presencia del As(III), es preferible oxidarlo hasta As(V), puesto que su remoción se vuelve mas sencilla. Por ello, muchos investigadores escudriñan procesos simultaneos de oxidación – adsorción utilizando un oxidante de óxido metalico o fotocatalizador (Maiti, Mishra y Chaudhary, 2018). En la investigación de Wang et al. (2015) se utilizó un nanomaterial mixto basado en partículas de $Fe_3O_4:Cu$. Mediante escaneos antes y despues de la adsorción, se llegó a la conclusión que la aceleración de la reacción redox era responsabilidad del Cu^{2+} , actuando como catalizador oxidante de la especie As(III) a As(V). Asimismo, se determino que dicho catalizador posibilitaba la reaccion redox del As(III) por O_2 . Por último, los iones As(V) se adsorben por medio de grupos hidroxilos activos en las superficies de los nanocompuestos.

Respecto a nanopartículas de MnO_2 cargadas en grafeno en presencia de nanopartículas de oxido de hierro, Zhu et al. (2015) demostraron que a medida que se vertía dicho adsorbente a una solución de As(III), este contaminante se oxidaba a estado 5+ a causa del MnO_2 . Las reacciones químicas se muestran en las ecuaciones (7), (8) y (9).



Seguidamente, el As(V) se extiende por la superficie del adsorbente y son adheridos junto con el As(III) restante, al óxido de hierro 3+. Los grupos hidroxilo que se encuentran en las superficies del óxido de hierro pueden ser reemplazados por As(III) y As(V) mediante un intercambio de ligandos, formando complejos.

Yu et al. (2019) determinaron mediante espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS por sus siglas en inglés) la química de la superficie del adsorbente a base de nanocubos de Fe₂O₃, antes y después del proceso de adsorción. Como consecuencia, se determinó que la interacción electrostática fue fundamental para la adsorción del arsénico, así como la formación de complejos monodentados y bidentados.

III. Metodología

3.1. Tipo y diseño de investigación

El trabajo de investigación es de tipo básica. Esto se fundamenta en lo mencionado por Tam, Vera y Oliveros (2008), quienes manifiestan que la investigación aplicada posee el objetivo principal de generar nueva tecnología en base a los conocimientos obtenidos en una investigación de tipo estratégica. Asimismo, los resultados provenientes de este tipo de investigación son aplicables en variedad de lugar, por lo que genera mayores oportunidades de difusión, caso contrario de las básicas que buscan esencialmente crear conocimiento y teorías (Hernández, Fernández y Baptista, 2010).

Respecto al diseño, se considera no experimental, principalmente porque no se manipula a voluntad propia las variables de estudio. Aquí no se recrea ningún tipo de situación, sino todo lo contrario, se trabaja y analiza las situaciones ya existentes. Se observan fenómenos tal cual se muestran en su entorno natural, para su posterior análisis (Cortés y Iglesias, 2004). Del mismo modo Hernández, Fernández y Baptista (2010) afirman que la investigación no experimental hace referencia a la observación y análisis de un contexto ya proporcionado de forma natural. Es la no manipulación de variables para observar su efecto en otras.

Asimismo, es de nivel correlacional puesto que se evaluó la relación entre una variable con otra variable cuantitativa, buscando saber el comportamiento de una de ellas en función de la otra (Cortés e Iglesias, 2004).

3.2. Variables y Operacionalización

3.2.1. Variable dependiente

Se utilizó a los indicadores del proceso de adsorción. Dentro de este grupo encajan únicamente la eficiencia de remoción y capacidad de adsorción. Ambas variables se relacionan a la cantidad de contaminante removido del medio acuoso (Tang et al., 2011; Liu et al., 2018).

3.2.2. Variable independiente

Se consideró a los parámetros del proceso de adsorción tal como pH inicial, tiempo de contacto, dosis del adsorbente y concentración inicial del contaminante. Especificaciones más detalladas se encuentran en el anexo 1.

3.3. Población, muestra y muestreo

La población materia de investigación son todos los artículos que presentan las características que serán especificadas en el apartado siguiente (3.5.). Por ende, la muestra escogida serán aquellos artículos que además de poseer las características especificadas, se encontrarán en las bases de datos EBSCO y Scopus. Por otro lado, la búsqueda de los artículos en las bases de datos electrónicas fue ajustada para obtener únicamente aquellos de acceso abierto con un intervalo de tiempo desde el 2012 hasta el 2021.

Para Scopus se escogió la opción TITTLE () para las palabras clave utilizadas, las cuales fueron: (adsorption*) (removal) (arsenic*) (arsenite) (arsenate) (iron oxide*) (hematite) (magnetite) (nanoparticles) (nanocomposite). Las palabras que presentan (*) significan que fueron empleadas en absolutamente todas las búsquedas. Aquellas restantes fueron utilizadas como complemento empleando los conectores (OR). Por último, es preciso mencionar que no se consideraron revistas que abordan temas de astronomía, agricultura, biología, ni sus ramas derivadas.

En EBSCO se utilizó la opción “búsqueda avanzada”, texto completo y la opción título. Las palabras clave empleadas fueron: (arsenic) (adsorption) (nanoparticles*) (water**) (batch**). La palabra clave con (*) fue utilizada para buscar su coincidencia únicamente en el resumen del artículo. Los de (**) fueron para el texto completo de los artículos.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En cuanto a la técnica planteada, considerando lo realizado por Ochedi, Liu y Hussain (2020), Lin et al. (2020) y Muisa et al. (2020), los cuales plantearon investigaciones sistemáticas y de meta-análisis, y además, analizando el tipo, diseño y objetivos de mi investigación, se optó por el análisis documental como la técnica. Referente al instrumento de recolección de datos, se utilizó una matriz que contiene las variables independientes y la dependiente. Su representación se encuentra en el anexo 2.

3.5. Procedimientos

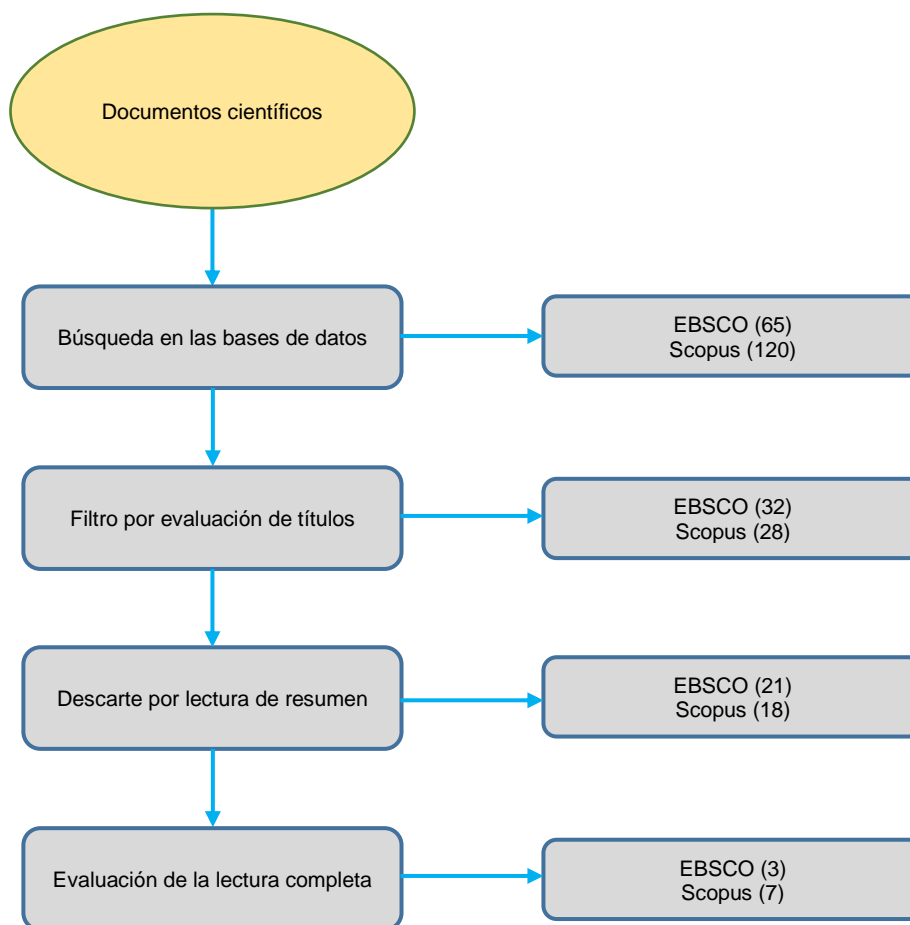
Fue necesario hacer uso de investigaciones que cumplan ciertas características. En tal sentido, se diseñaron criterios de inclusión y exclusión, cuyos lineamientos

estuvieron basados en lo planteado por Hassan et al. (2020), Azari et al. (2020) y Shahid et al. (2018), específicamente, en su desarrollo de metodología. A continuación, se muestran los criterios utilizados.

- No se consideró los artículos de meta-análisis, resúmenes, libros y revisiones, únicamente trabajos experimentales que utilicen un nanoadsorbente que contenga total o parcialmente al óxido de hierro.
- Se eligieron únicamente artículos basados en el idioma inglés y español.
- Los textos que no mostraron sus datos experimentales no fueron tomados en cuenta.
- Se consideraron solo aquellos que usaron una metodología experimental batch y con muestras creadas en laboratorio.
- Artículos que no tengan la evaluación del tiempo de contacto, pH, concentración inicial y dosis no fueron tomados en cuenta.

A fin de cumplir con los criterios ya especificados, fue necesario plantearse etapas, las cuales consistieron en la revisión del título, en donde deben encontrarse las palabras clave (salvo consideraciones del investigador). Seguidamente, al leer el resumen, debe encontrarse los parámetros materia de estudio o un indicio de análisis. Por último, se hace una revisión completa del documento. Aquellos documentos que se consideren no aptos, teniendo en cuenta lo mencionado con anterioridad, no formarán parte de la muestra de investigación.

Figura 3: Proceso de recolección de artículos.



Fuente: Adaptado de Azari et al., 2020.

3.6. Método de análisis de datos

Los datos recolectados y colocados en la matriz mostrada en el anexo 2 fueron separados en cinco (5) hojas de cálculo. Cada una de ellas contenía la columna de una variable independiente y la variable dependiente, tanto para arsenito como para arsenato. La cinética e isoterma se colocaron del mismo modo en una hoja de cálculo aparte.

Posteriormente, se insertaron gráficas de dispersión, que contenían en el eje X a la variable independiente (pH, tiempo de contacto, dosis o concentración inicial) y en el eje Y a la dependiente (eficiencia de remoción). Se utilizó las líneas de tendencia en forma lineal para obtener el R^2 . El coeficiente de correlación de cada gráfica de dispersión se obtuvo por cálculo del coeficiente de determinación (valor de R^2). Se utilizó el software Minitab19 para el cálculo de los valores p y los intervalos de confianza para cada coeficiente de correlación. El procedimiento se detalla en 3 pasos: 1) introducción de los datos materia de

análisis 2) opción “estadísticas” – “estadísticas básicas” – “correlación” 3) selección de las variables y nivel de confianza estadística. Cabe precisar que el software utiliza el estadístico t de student como prueba de hipótesis. En ese sentido, se considera como H_0 : población con $r = 0$ y H_1 : población con $r \neq 0$ (Guillen, Badii y Zepeda, 2014).

Las gráficas de cajas se insertaron utilizando únicamente las variables independientes tanto para arsenito y arsenato. Las gráficas de histograma se obtuvieron realizando cuadros de intervalo y frecuencia, donde la amplitud del intervalo fue asignada por el investigador.

3.7. Aspectos éticos

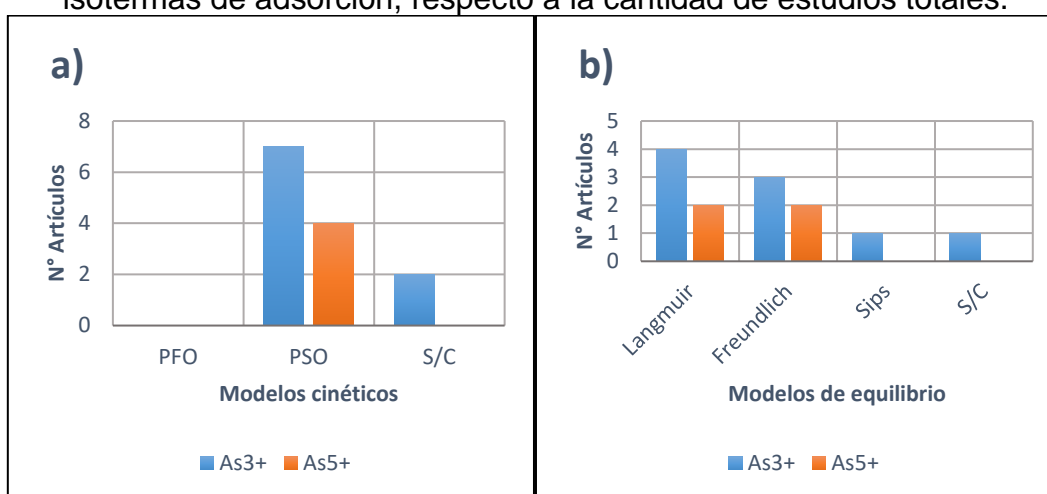
El trabajo es de autoría propia. Las ideas, comentarios, imágenes, tablas o descripciones sacadas de otros autores fueron estrictamente citadas a través del gestor de referencias MENDELEY DESKTOP. Asimismo, los documentos de autenticidad brindados por la institución, se encuentran debidamente anexados y firmados.

IV. Resultados

4.1. Cinética e isoterma

En cuanto a la cinética de adsorción, la figura 4a) nos muestra que la cinética de pseudo-segundo orden se ajusta mejor a los resultados experimentales de los nanoadsorbentes, tanto para arsenito y arsenato. Del mismo modo, la isoterma de Langmuir presenta un mejor ajuste para los dos estados de oxidación de arsénico. Por último, se aprecian artículos que no presentaron estudios cinéticos ni de equilibrio.

Figura 4: Distribución de modelos empleados para definir a) la cinética y b) las isoterma de adsorción, respecto a la cantidad de estudios totales.



Fuente: Elaboración propia.

*Leyenda: S/C (sin conteo; casos sin aplicar estudios cinéticos) / PFO (Pseudo primer orden) / PSO (Pseudo segundo orden).

La tabla 5 nos muestra los casos cruzados de isoterma y cinética. Es decir, en un 50% de los casos con As(V) se obtuvo un mejor ajuste del modelo PSO con Langmuir y Freundlich. Del mismo modo, el As(III) presentó igual cantidad de casos de PSO con Langmuir y Freundlich. Sin embargo, se observó un caso de buen ajuste con el modelo Sips.

Tabla 5: Coincidencias entre modelos cinéticos e isoterma.

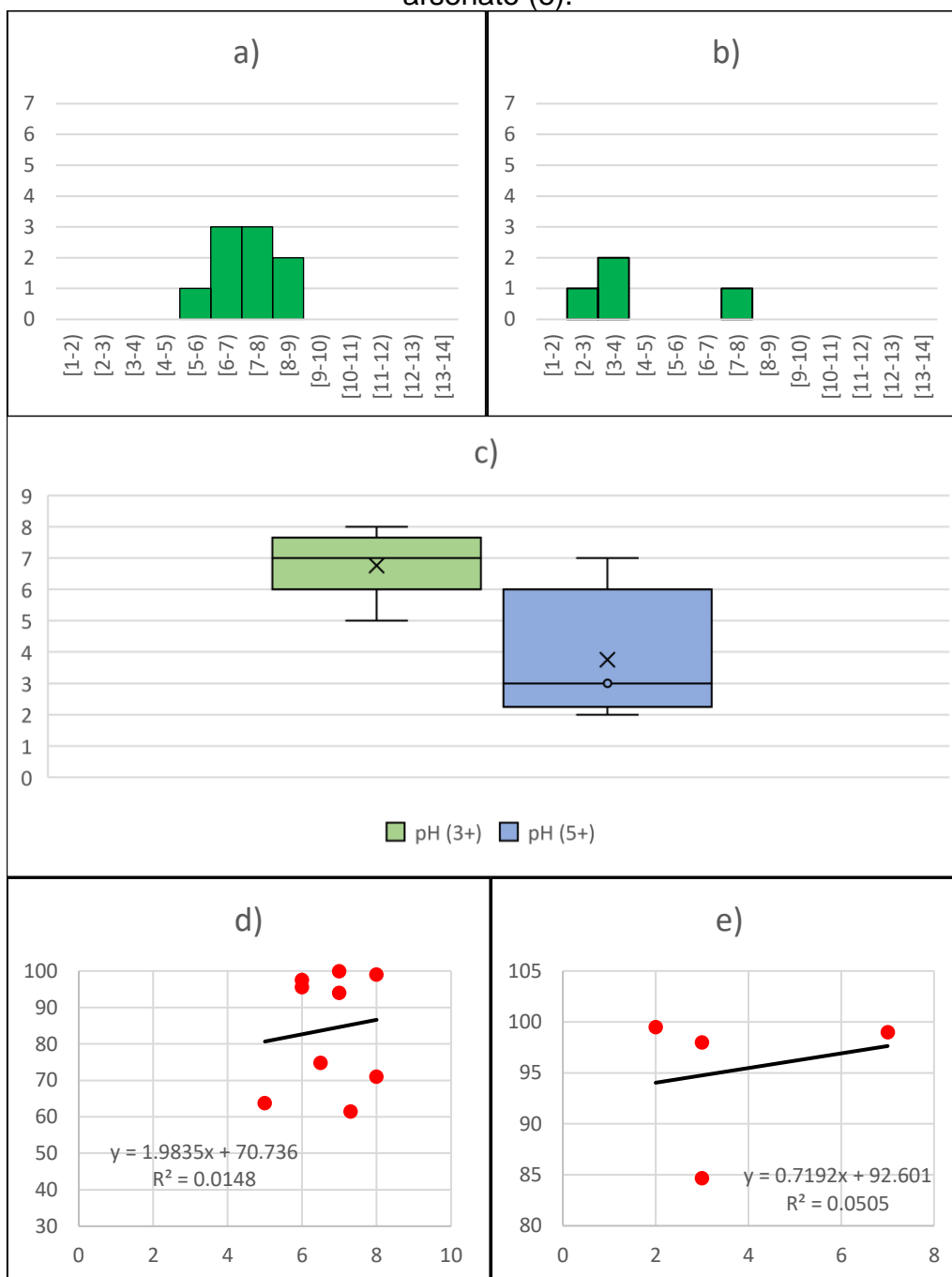
Especie	Cinética	Freundlich	Langmuir	SIPS	S/C
Arsenito	PSO	33%	33%	11%	0%
	S/C	0%	11%	0%	11%
Arsenato	PSO	50%	50%	0%	0%
	S/C	0%	0%	0%	0%

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Parámetros de adsorción

Se observa una mayor frecuencia de pH óptimo entre los intervalos de 6 a 8 para arsenito. Respecto al arsenato no se observaron diferencias. La figura 5c) indica una mayor varianza de pH en relación al arsenato que al arsenito. Por último, las figuras 5d) y 5e) muestran bajos coeficientes de determinación.

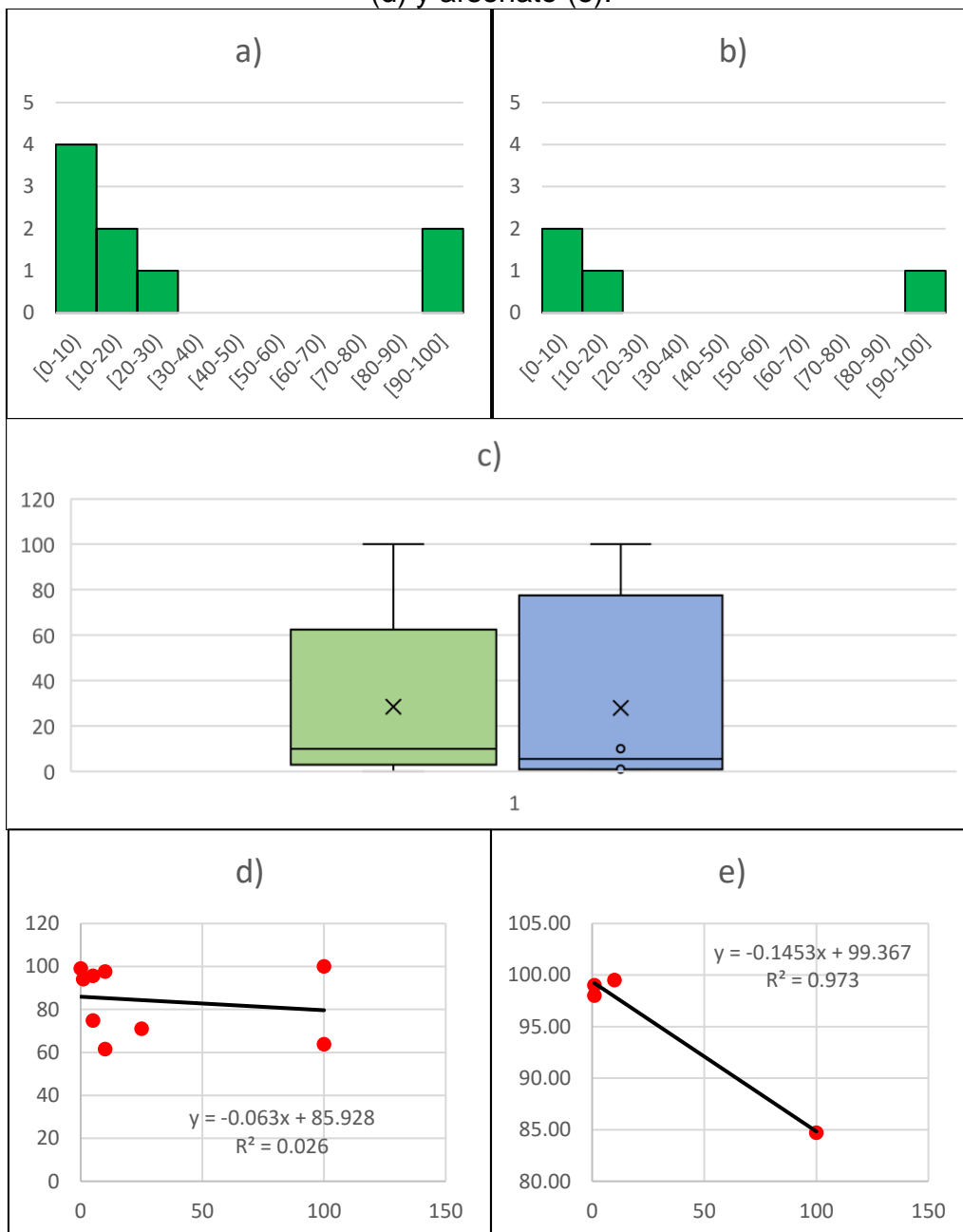
Figura 5: Investigación de la distribución del pH para arsenito (a) y arsenato (b); caja de bigotes (c); y correlación entre la eficiencia de remoción y arsenito (d), y arsenato (e).



Fuente: Elaboración propia.

Los valores óptimos de concentración inicial fluctúan, con mayor frecuencia, entre 0 a 10 mg/L para arsenito y arsenato. Las concentraciones iniciales de arsenato presentaron mayor varianza respecto al arsenito. Por último, los coeficientes de determinación son 0.026 y 0.973 para arsenito y arsenato.

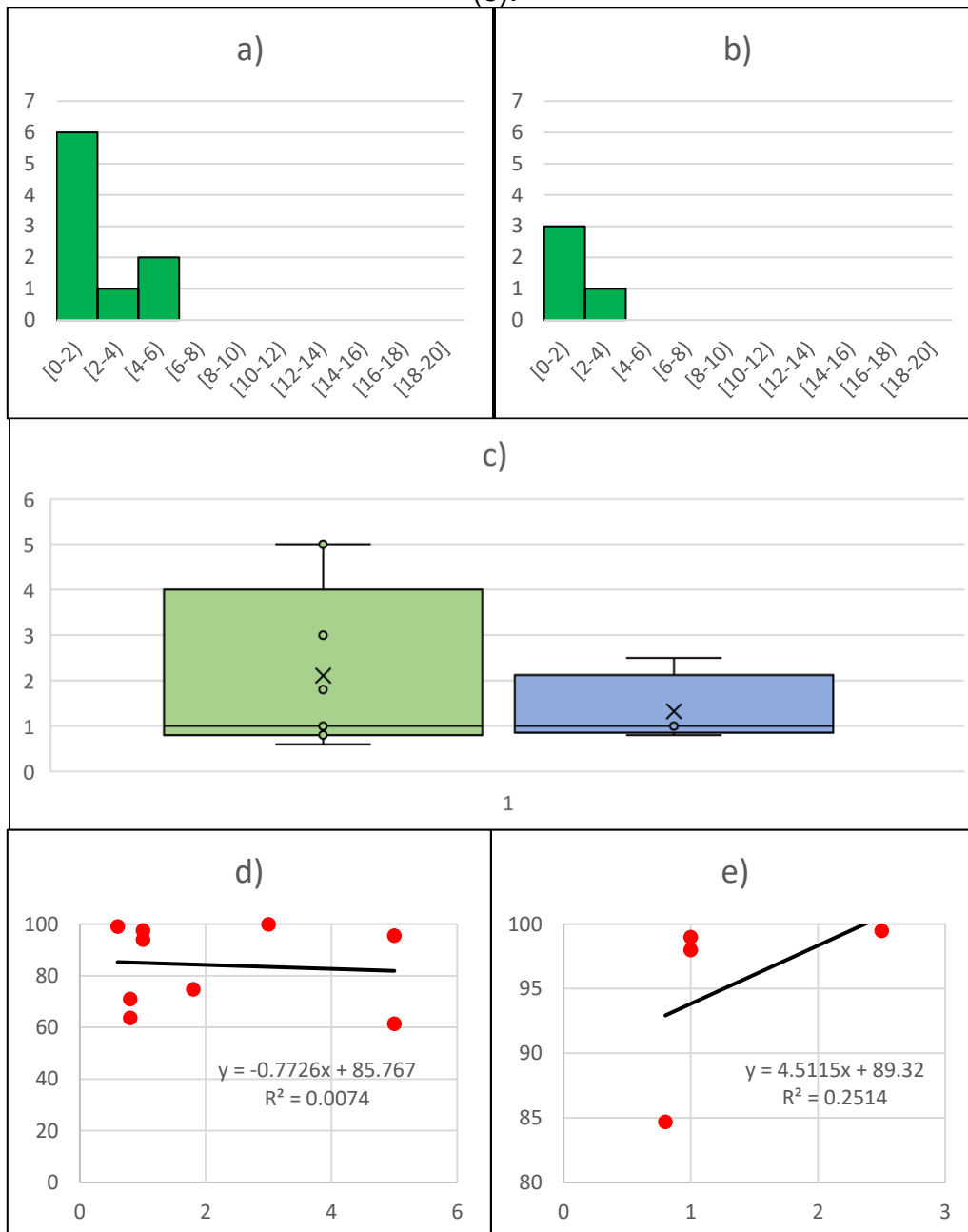
Figura 6: Distribución de la concentración inicial para arsenito (a) y arsenato (b); caja de bigotes (c); y correlación entre la eficiencia de remoción y arsenito (d) y arsenato (e).



Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo una predominancia considerable en valores óptimos de 0 – 2 g/L de adsorbente para arsenito. La muestra en relación al arsenito presenta mayor amplitud de datos en relación al del arsenato. Por último, se observan bajos coeficientes de determinación.

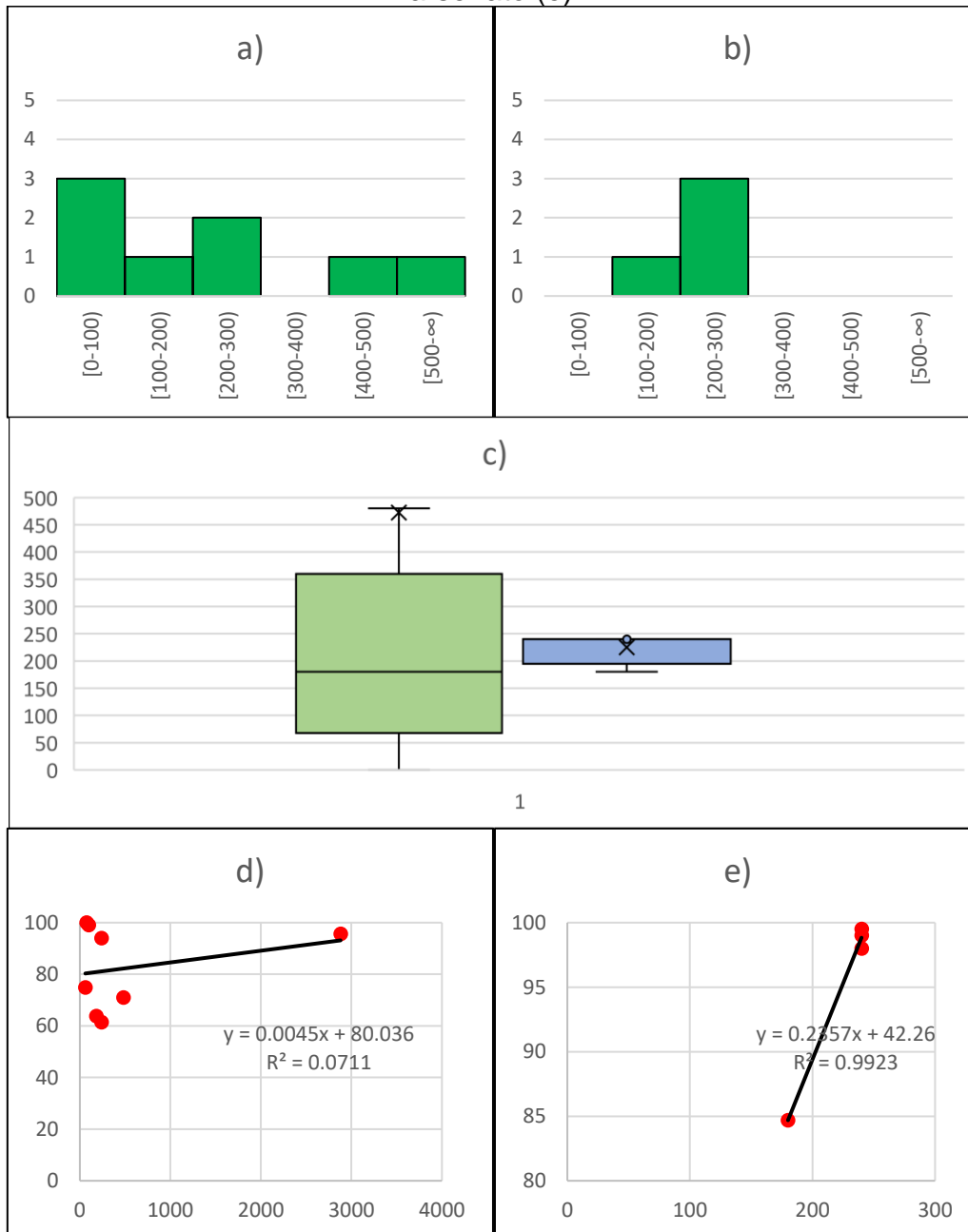
Figura 7: Distribución de la dosis para arsenito (a) y arsenato (b); gráfico de cajas (c); y correlación entre la eficiencia de remoción y arsenito (d), y arsenato (e).



Fuente: Elaboración propia.

Los histogramas indican frecuencias máximas para valores de tiempo de contacto entre los primeros 100 minutos para arsenito y de 200-300 minutos para arsenato. Los tiempos óptimos de remoción presentan mayor varianza en los estudios de arsenito que para arsenato. Finalmente, las correlaciones de determinación para arsenito y arsenato fueron de 0.071 y 0.992 respectivamente.

Figura 8: Distribución del tiempo de contacto para arsenito (a) y arsenato (b); gráfico de cajas (c); y correlación entre la eficiencia de remoción y arsenito (d) y arsenato (e).



Fuente: Elaboración propia.

V. Discusiones

5.1. Cinética e isothermas

Los resultados muestran que los modelos de mejor ajuste con los datos experimentales fueron la cinética de PSO y la isoterma de Langmuir. Por lo que debe esperarse que las interacciones entre adsorbente y adsorbato sigan las suposiciones predefinidas por los autores de ambos modelos matemáticos.

Estudios como los de Wang y Guo (2020) muestran los mismos resultados en relación al mejor ajuste de la isoterma de Langmuir con diferentes tipos de nanoadsorbentes para la remoción de diferentes contaminantes además del arsénico. En síntesis, la isoterma de Freundlich asume una fisisorción y Langmuir una quimisorción (Prabhakar y Samadder, 2020). Entre los mecanismos que suponen ambos modelos están la interacción electrostática, intercambio iónico y formación de complejos (Sherlala et al., 2018).

Al igual que Langmuir, la cinética de PSO supone una quimisorción (Hao et al., 2018). Resulta interesante que investigaciones donde se compilaron diferentes tipos de adsorbentes y contaminantes también tengan como el modelo de mejor ajuste a la cinética de PSO (Sherlala et al., 2018; Ho y Mckay, 1998). Sin embargo, antes de suponer que lo anterior aplica para todo nanoadsorbente a base de hierro, se debe tener en cuenta 2 aspectos fundamentales: un posible error metodológico que favorece el ajuste del PSO (Simonin, 2016) y la poca cantidad de estudios analizados ($n = 10$).

Por último, es un error afirmar, sin lugar a dudas, la ocurrencia específica de mecanismos de adsorción (química o física) ya que la tecnología actual aún no permite llegar a esas conclusiones. Por el contrario, lo que permiten los modelos analizados es suponer, de manera empírica, la ocurrencia de un mecanismo en mayor grado que otros en un tipo de adsorbente. Lo mencionado se refleja mejor en la tabla 5, donde el 33% y 50% (para remover arsenito y arsenato respectivamente) de los casos suponen mecanismos de naturaleza física y química al mismo tiempo.

5.2. Influencia de los parámetros

Los histogramas muestran que los valores óptimos de pH, en el medio acuoso, más frecuentes para remover arsenito y arsenato se encuentran en los rangos de 6 a 8 y de 3 a 4, respectivamente. Al respecto, investigaciones experimentales como las de Yu et al. (2019) y Saif et al. (2019) apoyan esos resultados, puesto que obtuvieron remociones >90% en un rango de pH 2 – 4 para arsenato, y del 99.9% (Jain y Agarwal 2017) y 57% (Lin et al., 2020) a un pH \approx 7 para arsenito en medio acuoso.

Esto puede deberse a la atracción electrostática entre el adsorbato y el adsorbente (Hao et al., 2018). El punto isoeléctrico (pH_{iso}) y el punto de carga cero (pH_{zpc}) son indicadores muy utilizados por los investigadores para el análisis del proceso de adsorción (Villa y Anaguano, 2013). Disoluciones con un pH mayor al pH_{zpc} presentan adsorbentes con carga superficial negativa (De Oliveira et al., 2020; Lihare et al., 2021) y viceversa cuando el pH es menor.

Por otro lado, la especie característica del arsénico se ve influenciado por el pH del medio (Sarkar y Paul, 2016). Para As(III), la especie que se encuentra en mayor grado de abundancia a $\text{pH} < 8$ es la forma no iónica. Aproximadamente a $\text{pH} \geq 9$ las formas aniónicas empiezan a aumentar (Lihare et al., 2021; Song et al. 2021). En contraste, Prabhakar y Samadder (2019) encontraron que el As(V) en sus formas H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} se encuentran en rangos de pH 3 – 6 y 8 – 10, respectivamente. En el rango de 6 – 8 se encuentran de forma simultánea ambas especies.

Entonces, al tener valores críticos de 5 a 8 (As(III)) y 2 a 7 (As(V)) supondría la ocurrencia de interacciones electrostáticas. Es decir, fuerzas de atracción entre los iones contaminantes y la superficie de los nanoadsorbentes que presentan cargas superficiales de signo contrario.

Entrando en otra materia, de las figuras 6a) y 6b) encontramos que las concentraciones iniciales óptimas más frecuentes en los nanoadsorbentes a base de hierro estuvieron en el rango de 0 mg/L – 10 mg/L (también son los de menor magnitud) tanto para arsenito como para arsenato. Esto significa que los nanoadsorbentes estudiados son más afines a concentraciones de arsénico por debajo de 10 mg/L.

Al respecto, diversos artículos complementan lo mencionado líneas arriba, es decir, que los sitios activos disponibles para la adsorción disminuyen con el aumento del número de iones arsénico en concentraciones elevadas. (Lilhare et al., 2021; Mahmood et al., 2018).

Sin embargo, a muy bajas concentraciones los iones arsénico tienen poca probabilidad de contacto con las superficies de los nanoadsorbentes. Por ello, Song et al. (2021) encontraron que la eficiencia de remoción aumentaba con el incremento de la concentración inicial (hasta llegar a 30 mg/L) para luego disminuir sin indicios de una pendiente positiva.

La figura 6c) muestra valores óptimos de hasta 100 mg/L con un rango intercuartil de 59.5 mg/L y 76.5 mg/L para arsenito y arsenato, lo que indica una alta varianza entre datos de concentración inicial, explicado posiblemente por una diferencia en la composición química de los nanoadsorbentes y sus características físicas (Kundu y Naskar, 2021).

El análisis del tiempo de contacto es necesario para conocer con mejor precisión las capacidades de adsorción de los nanoadsorbentes. En esa misma línea, los resultados muestran mayores frecuencias para el rango de 0 a 100 y de 200 a 300 minutos para arsenito y arsenato respectivamente. Es decir que, pasando esos rangos de tiempo, los nanoadsorbentes ya no remueven As(III) y As(V).

Prabhakar y Samadder (2020) explican que mientras más pasa el tiempo, los sitios activos de adsorción se empiezan a saturar hasta llegar al punto de equilibrio. Esto se ve reflejado en las gráficas de adsorción vs tiempo donde la curva luego del equilibrio llega a ser aplanada.

Del mismo modo que el parámetro anterior, la considerable amplitud en los datos muestrales del arsenito puede explicarse por los diferentes nanoadsorbentes que, a pesar de ser a base de hierro, pueden presentar características únicas complementarias. En contraste, el rango intercuartil considerablemente menor del tiempo óptimo para remover arsenato indicaría una tendencia considerable de equilibrios mayores a 100 minutos, sin embargo, es necesario una mayor investigación que confirme o anule esas ideas.

De la figura 7c) se observan valores de dosis óptimas de 0.6 g/L y 5 g/L para arsenito, y de 0.8 g/L y 2.5 g/L para arsenato (en el orden de mínimos y máximos

respectivamente). Asimismo, se puede observar una mayor variación en las dosis óptimas para arsenito respecto al arsenato (Q3-Q1 =3.2 g/L y 1.28 g/L respectivamente). El histograma indica mayores frecuencias para el rango de dosis entre 0 – 2 g/L para ambos casos.

A una mayor dosis de adsorbente supone una mayor cantidad de contaminante adsorbido debido al aumento de sitios activos (Kundu y Naskar, 2021) y luego de una cierta cantidad se logra la estabilización de la remoción (Kundu y Naskar, 2021; Lihare et al., 2021; Prabhakar y Samadder, 2020). Sin embargo, en la literatura también existen resultados donde la eficiencia de remoción logra disminuir luego de llegar a una cierta cantidad de adsorbente en la muestra experimental, como fue en la investigación de Wojciechowska y Bielun (2020).

5.3. Meta-análisis

De los resultados del meta-análisis entre cada parámetro de adsorción y la eficiencia de remoción, solo poseen significancia estadística el coeficiente de correlación de concentración inicial y tiempo de contacto (ambos para arsenato). Entre los factores por los cuales puede deberse estos resultados se encuentran: muestra sin distribución normal, tamaño de muestra pequeño, heterogeneidad considerable entre los datos de cada artículo (Antúnez, Camacho y Kleinn 2021).

Considerando dos aspectos que el coeficiente de correlación me indica la intensidad de relación entre variables y que la significancia estadística hace factible la extrapolación de datos muestrales a una población con un margen de error predefinido, se puede asegurar que en lo que respecta a la muestra, los parámetros que más relación tienen con la eficiencia de remoción son el tiempo de contacto > concentración inicial > pH > dosis del adsorbente para arsenito y tiempo de contacto > concentración inicial > dosis del adsorbente > pH para arsenato, siendo el tiempo de contacto el de mayor importancia.

VI. Conclusiones

En base a los objetivos planteados y los resultados obtenidos se concluye que:

1. Los modelos cinéticos y de equilibrio que mayor ajuste presentaron a los nanoadsorbentes a base de hierro fueron los de pseudo segundo orden y Langmuir respectivamente, tanto para arsenito como para arsenato por igual. Ambos modelos presentan como suposición una adsorción química, sin embargo, se obtuvo que un 30% de los nanoadsorbentes presentaban modelos de quimisorción y fisisorción a la vez, lo que supondría la presencia de mecanismos de ambas naturalezas.
2. Los valores óptimos más frecuentes del pH, concentración inicial, tiempo de contacto y dosis se encontraron en rangos de 6 – 8, 0 – 10 mg/L, 0 – 100 minutos, 0 – 2 g/L para el arsenito y de 3 – 4, 0 – 10 mg/L, 200 – 300 minutos, 0 – 2 g/L para arsenato, respectivamente. Asimismo, se determinó que cada parámetro de adsorción que fue estudiado en el presente documento tiene implicancias diferencias en la remoción de arsénico.
3. Los coeficientes de correlación obtenidos del meta-análisis presentan el siguiente orden jerárquico: tiempo de contacto > concentración inicial > pH > dosis del adsorbente para arsenito y tiempo de contacto > concentración inicial > dosis del adsorbente > pH para arsenato. De entre ellas, los coeficientes que presentaron una significancia estadística fueron los de tiempo de contacto y concentración inicial.

VII. Recomendaciones

Debido al pequeño tamaño de muestra es que no se vio factible el análisis bajo una clasificación de los nanoadsorbentes, sin embargo, se recomienda aplicar una clasificación con un mayor número de muestra, que permia comprender, de manera más diferenciada sus mecanismos, características y desempeño al momento de utilizarlos para la remoción de arsénico (III) y (V) en medio acuoso. Dicha clasificación debe estar en función de los diferentes óxidos de hierro (en caso el adsorbente sea completamente de dicho mineral), nano-compuestos a base de óxidos de hierro o hibridación entre nanoadsorbentes minerales.

En la práctica, las investigaciones a escala laboratorio no tienen mucha relevancia en comparación con las investigaciones In Situ, principalmente porque el análisis experimental involucra las condiciones externas reales del medio contaminado. Uno de esos factores es la presencia de iones coexistentes. Debido a eso, es fundamental analizar el comportamiento de estos nanoadsorbentes en presencia de otros iones metálicos, así como su capacidad para ser reutilizado.

VIII. Bibliografía

- AHMAD, S.A. y KHAN, M.H., 2015. *Ground Water Arsenic Contamination and Its Health Effects in Bangladesh* [en línea]. S.l.: Elsevier Inc. ISBN 9780124199552. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-418688-0.00002-2>.
- AMEN, R., BASHIR, H., BIBI, I., SHAHEEN, S.M., NIAZI, N.K., SHAHID, M., HUSSAIN, M.M., ANTONIADIS, V., SHAKOOR, M.B., AL-SOLAIMANI, S.G., WANG, H., BUNDSCHUH, J. y RINKLEBE, J., 2020. A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: The significance of modification and redox reactions. *Chemical Engineering Journal*, vol. 396, no. November 2019. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2020.125195.
- CHEN, H., SHARMA, S.K., SHARMA, P.R., YEH, H., JHONSON, K. y HSIAO, B.S., 2019. Arsenic(III) Removal by Nanostructured Dialdehyde Cellulose–Cysteine Microscale and Nanoscale Fibers. *ACS OMEGA*, pp. 13. DOI <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>.
- Cortés, M. y Iglesias, M. (2004). Generalidades sobre Metodología de la Investigación. Recuperado de http://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf
- DE MEYER, C.M.C., RODRÍGUEZ, J.M., CARPIO, E.A., GARCÍA, P.A., STENGEL, C. y BERG, M., 2017. Arsenic, manganese and aluminum contamination in groundwater resources of Western Amazonia (Peru). *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 607–608, pp. 1437–1450. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.07.059. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.059>.
- GUO, Xiaojuan, CHEN, X., WANG, J., LIU, Z., GAILE, D., WU, H., YU, G., MAO, G., YANG, Z., DI, Z., GUO, Xiuqing, CAO, L., CHANG, P., KANG, B., CHEN, J., GAO, W. y REN, X., 2018. Multi-generational impacts of arsenic exposure on genome-wide DNA methylation and the implications for arsenic-induced skin lesions. *Environment International* [en línea], vol. 119, no. July, pp. 250–263. ISSN 18736750. DOI 10.1016/j.envint.2018.06.024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.06.024>.

- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2010). Metodología de la investigación. Recuperado de https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigaci%C3%B3n%205ta%20Edici%C3%B3n.pdf
- JAIN, N. y CHANDRAMANI, S., 2018. Arsenic poisoning- An overview. *Indian Journal of Medical Specialities* [en línea], vol. 9, no. 3, pp. 143–145. ISSN 09762884. DOI 10.1016/j.injms.2018.04.006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.injms.2018.04.006>.
- KAMEI-ISHIKAWA, N., SEGAWA, N., YAMAZAKI, D., ITO, A. y UMITA, T., 2017. Arsenic removal from arsenic-contaminated water by biological arsenite oxidation and chemical ferrous iron oxidation using a down-flow hanging sponge reactor. *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 17, no. 5, pp. 1249–1259. ISSN 16069749. DOI 10.2166/ws.2017.025.
- KUMAR, R., PATEL, M., SINGH, P., BUNDSCHUH, J., PITTMAN, C.U., TRAKAL, L. y MOHAN, D., 2019. Emerging technologies for arsenic removal from drinking water in rural and peri-urban areas: Methods, experience from, and options for Latin America. *Science of the Total Environment*, vol. 694. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.07.233.
- LEMONTE, J.J., STUCKEY, J.W., SANCHEZ, J.Z., TAPPERO, R., RINKLEBE, J. y SPARKS, D.L., 2017. Sea Level Rise Induced Arsenic Release from Historically Contaminated Coastal Soils. *Environmental Science and Technology*, vol. 51, no. 11, pp. 5913–5922. ISSN 15205851. DOI 10.1021/acs.est.6b06152.
- LITTER, M.I., INGALLINELLA, A.M., OLMOS, V., SAVIO, M., DIFEO, G., BOTTO, L., FARFÁN TORRES, E.M., TAYLOR, S., FRANGIE, S., HERKOVITS, J., SCHALAMUK, I., GONZÁLEZ, M.J., BERARDOZZI, E., GARCÍA EINSCHLAG, F.S., BHATTACHARYA, P. y AHMAD, A., 2019. Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation and determination. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 676, pp. 756–766. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.04.262. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.262>.
- LOBO, C., COLMAN, J., BERTOLA, N. y ZARITZKY, N., 2019. CINÉTICA DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN PARTÍCULAS DE QUITOSANO CON

IONES FÉRRICO EN MODELO DE AGUA DE CONSUMO Y AGUA SUBTERRÁNEA DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES. *Universidad Nacional de La Plata*, vol. 5, pp. 577–582.

- MONDAL, D., PERICHE, R., TINEO, B., BERMEJO, L.A., RAHMAN, M.M., SIDDIQUE, A.B., RAHMAN, M.A., SOLIS, J.L. y CRUZ, G.J.F., 2020. Arsenic in Peruvian rice cultivated in the major rice growing region of Tumbes river basin. *Chemosphere* [en línea], vol. 241, pp. 125070. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.125070. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125070>.
- NIAZI, N.K. y BURTON, E.D., 2016. Arsenic sorption to nanoparticulate mackinawite (FeS): An examination of phosphate competition. *Environmental Pollution* [en línea], vol. 218, pp. 111–117. ISSN 18736424. DOI 10.1016/j.envpol.2016.08.031. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.031>.
- PODGORSKI, J.E., EQANI, S.A.M.A.S., KHANAM, T., ULLAH, R., SHEN, H. y BERG, M., 2017. Extensive arsenic contamination in high-pH unconfined aquifers in the Indus Valley. *Science Advances*, vol. 3, no. 8. ISSN 23752548. DOI 10.1126/sciadv.1700935.
- SHAHID, M., NIAZI, N.K., DUMAT, C., NAIDU, R., KHALID, S., RAHMAN, M.M. y BIBI, I., 2018. A meta-analysis of the distribution, sources and health risks of arsenic-contaminated groundwater in Pakistan. *Environmental Pollution* [en línea], vol. 242, pp. 307–319. ISSN 18736424. DOI 10.1016/j.envpol.2018.06.083. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.083>.
- SMITH, K., LI, Zhenyu, CHEN, B., LIANG, H., ZHANG, X., XU, R., LI, Zhilin, DAI, H., WEI, C. y LIU, S., 2017. Comparison of sand-based water filters for point-of-use arsenic removal in China. *Chemosphere* [en línea], vol. 168, pp. 155–162. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2016.10.021. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.021>.
- TAPIA, J., MURRAY, J., ORMACHEA, M., TIRADO, N. y NORDSTROM, D.K., 2019. Origin, distribution, and geochemistry of arsenic in the Altiplano-Puna plateau of Argentina, Bolivia, Chile, and Perú. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 678, pp. 309–325. ISSN 18791026. DOI

- 10.1016/j.scitotenv.2019.04.084. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.084>.
- Tam, J., Vera, G. y Oliveros, R. (2008). Tipos, métodos y estrategias de investigación científica. Universidad Ricardo Palma (5). Recuperado de http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/articulos/imarpe/oceanografia/adj_modela_pa-5-145-tam-2008-investig.pdf
- UPPAL, J.S., ZHENG, Q. y LE, X.C., 2019. Arsenic in drinking water—recent examples and updates from Southeast Asia. *Current Opinion in Environmental Science and Health* [en línea], vol. 7, pp. 126–135. ISSN 24685844. DOI 10.1016/j.coesh.2019.01.004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.01.004>.
- YANG, X., HUANG, G., AN, C., CHEN, X., SHEN, J., YIN, J., SONG, P., XU, Z. y LI, Y., 2020. Removal of arsenic from water through ceramic filter modified by nano-CeO₂: A cost-effective approach for remote areas. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 750, pp. 141510. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.141510. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141510>.
- Rodríguez Pineda J. Alfredo Reyes Cortes. Hernández Ramírez I, Cruz Medina Rodybeth y Muñoz. Robles C. Caracterización hidrogeoquímica de la contaminación de agua subterránea por arsénico en Aldama. Chihuahua Instituto de ecología y universidad Autónoma de Chihuahua, 2004.
- AHOULÉ, D.G., LALANNE, F., MENDRET, J., BROSILLON, S. y MAÏGA, A.H., 2015. Arsenic in African Waters: A Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 226, no. 9. ISSN 15732932. DOI 10.1007/s11270-015-2558-4.
- ANTÚNEZ, P., CAMACHO, E. y KLEINN, C., 2021. Prueba de hipótesis en la investigación forestal, agropecuaria y en la ecología: retos y malentendidos sobre el uso de los niveles de significancia de 0.05 y 0.01. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6. DOI 10.19136/era.a8n1.2616.
- ASHRAF, S., SIDDIQA, A., SHAHIDA, S. y QAISAR, S., 2019. Titanium-based nanocomposite materials for arsenic removal from water: A review. *Heliyon* [en línea], vol. 5, no. 5, pp. e01577. ISSN 24058440. DOI 10.1016/j.heliyon.2019.e01577. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01577>.

- AZARI, A., NABIZADEH, R., NASSERI, S., MAHVI, A.H. y MESDAGHINIA, A.R., 2020. Comprehensive systematic review and meta-analysis of dyes adsorption by carbon-based adsorbent materials: Classification and analysis of last decade studies. *Chemosphere* [en línea], vol. 250, no. 5, pp. 126238. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.126238. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126238>.
- ÇERMİKLİ, E., ŞEN, F., ALTIOK, E., WOLSKA, J., CYGANOWSKI, P., KABAY, N., BRYJAK, M., ARDA, M. y YÜKSEL, M., 2020. Performances of novel chelating ion exchange resins for boron and arsenic removal from saline geothermal water using adsorption-membrane filtration hybrid process. *Desalination*, vol. 491, no. May, pp. 114504. ISSN 00119164. DOI 10.1016/j.desal.2020.114504.
- DAS, T.K., SAKTHIVEL, T.S., JEYARANJAN, A., SEAL, S. y BEZBARUAH, A.N., 2020. Ultra-high arsenic adsorption by graphene oxide iron nanohybrid: Removal mechanisms and potential applications. *Chemosphere*, vol. 253, pp. 126702. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.126702.
- DE OLIVEIRA, H.A.L., CAMPOS, A.F.C., GOMIDE, G., ZHANG, Y. y GHOSHAL, S., 2020. Elaboration of a core@shell bimagnetic nanoadsorbent (CoFe₂O₄@ γ -Fe₂O₃) for the removal of As(V) from water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [en línea], vol. 600, no. April, pp. 125002. ISSN 18734359. DOI 10.1016/j.colsurfa.2020.125002. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125002>.
- DHOBLE, R.M., MADDIGAPU, P.R., RAYALU, S.S., BHOLE, A.G., DHOBLE, A.S. y DHOBLE, S.R., 2017. Removal of arsenic(III) from water by magnetic binary oxide particles (MBOP): Experimental studies on fixed bed column. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 322, pp. 469–478. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2016.09.075. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.075>.
- DI GIOVANNI, P., DI MARTINO, G., SCAMPOLI, P., CEDRONE, F., MEO, F., LUCISANO, G., ROMANO, F. y STANISCIA, T., 2020. Arsenic exposure and risk of urothelial cancer: Systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17,

- no. 9, pp. 1–11. ISSN 16604601. DOI 10.3390/ijerph17093105.
- GAO, Z., GUO, H., ZHAO, B., WANG, A., HAN, S. y DONG, H., 2020. Experiment-based geochemical modeling of Arsenic(V) and Arsenic(III) adsorption onto aquifer sediments from an inland basin. *Journal of Hydrology*, vol. 588, no. May, pp. 125094. ISSN 00221694. DOI 10.1016/j.jhydrol.2020.125094.
- GHOSH (NATH), S., DEBSARKAR, A. y DUTTA, A., 2019. Technology alternatives for decontamination of arsenic-rich groundwater—A critical review. *Environmental Technology and Innovation*, vol. 13, pp. 277–303. ISSN 23521864. DOI 10.1016/j.eti.2018.12.003.
- GUILLEN, A., BADI, M.H. y ZEPEDA, M.S., 2014. Aplicación de Correlación en la Investigación Correlation Application in Research. *International Journal of Good Conscience Agosto*, vol. 9, no. 18, pp. 18–23.
- STANIĆ, M. y NUJIĆ, M., 2015. Arsenic removal by nanoparticles: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, no. 11, pp. 8094–8123. ISSN 16147499. DOI 10.1007/s11356-015-4307-z.
- HAO, L., LIU, M., WANG, N. y LI, G., 2018. A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents. *RSC Advances*, vol. 8, no. 69, pp. 39545–39560. ISSN 20462069. DOI 10.1039/c8ra08512a.
- HASSAN, M., LIU, Y., NAIDU, R., PARIKH, S.J., DU, J., QI, F. y WILLETT, I.R., 2020. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 744, pp. 140714. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.140714. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140714>.
- JAIN, A. y AGARWAL, M., 2017. Kinetic equilibrium and thermodynamic study of arsenic removal from water using alumina supported iron nano particles. *Journal of Water Process Engineering* [en línea], vol. 19, no. July, pp. 51–59. ISSN 22147144. DOI 10.1016/j.jwpe.2017.07.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.07.001>.
- JAIN, C.K. y ALI, I., 2000. Arsenic: Occurrence, toxicity and speciation techniques. *Water Research*, vol. 34, no. 17, pp. 4304–4312. ISSN 00431354. DOI 10.1016/S0043-1354(00)00182-2.

- KUNDU, S. y NASKAR, M.K., 2021. Carbon-layered double hydroxide nanocomposite for efficient removal of inorganic and organic based water contaminants-unravelling the adsorption mechanism. *Materials Advances*, vol. 2, no. 11, pp. 3600–3612. ISSN 26335409. DOI 10.1039/d1ma00064k.
- LILHARE, S., MATHEW, S.B., SINGH, A.K. y CARABINEIRO, S.A.C., 2021. Calcium alginate beads with entrapped iron oxide magnetic nanoparticles functionalized with methionine—a versatile adsorbent for arsenic removal. *Nanomaterials*, vol. 11, no. 5. ISSN 20794991. DOI 10.3390/nano11051345.
- LIN, Sen, JIN, J., SUN, S. y YU, J., 2020. Removal of arsenic contaminants using a novel porous nanoadsorbent with superior magnetic recovery. *Chemical Engineering Science: X* [en línea], vol. 8, pp. 100069. ISSN 25901400. DOI 10.1016/j.cesx.2020.100069. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cesx.2020.100069>.
- LIN, S., LU, D. y LIU, Z., 2012. Removal of arsenic contaminants with magnetic γ -Fe₂O₃ nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, vol. 211–212, pp. 46–52.
- LIN, Zeyu, LI, J., LUAN, Y. y DAI, W., 2020. Application of algae for heavy metal adsorption: A 20-year meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea], vol. 190, no. December 2019, pp. 110089. ISSN 10902414. DOI 10.1016/j.ecoenv.2019.110089. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110089>.
- LIU, B., KIM, K.H., KUMAR, V. y KIM, S., 2020. A review of functional sorbents for adsorptive removal of arsenic ions in aqueous systems. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 388, pp. 121815. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2019.121815.
- LIU, Z., CHEN, J., WU, Y., LI, Y., ZHAO, J. y NA, P., 2018. Synthesis of magnetic orderly mesoporous A-Fe₂O₃ nanocluster derived from MIL-100(Fe) for rapid and efficient arsenic(III,V) removal. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 343, pp. 304–314. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2017.09.047. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.047>.
- MAHMOOD, T., ASLAM, M., NAEEM, A., SIDDIQUE, T. y DIN, S.U., 2018. Adsorption of As(III) from aqueous solution onto iron impregnated used tea

- activated carbon: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study. *Journal of the Chilean Chemical Society*, vol. 63, no. 1, pp. 3855–3866. ISSN 07179707. DOI 10.4067/s0717-97072018000103855.
- MAITI, A., MISHRA, S. y CHAUDHARY, M., 2018. *Nanoscale Materials for Arsenic Removal From Water* [en línea]. S.I.: Elsevier Inc. ISBN 9780128139271. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813926-4.00032-X>.
- MANYANGADZE, M., CHIKURUWO, N.H.M., NARSAIAH, T.B., CHAKRA, C.S., RADHAKUMARI, M. y DANHA, G., 2020. Enhancing adsorption capacity of nano-adsorbents via surface modification: A review. *South African Journal of Chemical Engineering* [en línea], vol. 31, no. May 2019, pp. 25–32. ISSN 10269185. DOI 10.1016/j.sajce.2019.11.003. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.11.003>.
- MUISA, N., NHAPI, I., RUZIWA, W. y MANYUCHI, M.M., 2020. Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering* [en línea], vol. 35, no. October 2019, pp. 101187. ISSN 22147144. DOI 10.1016/j.jwpe.2020.101187. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101187>.
- NASSAR, M.Y., MOHAMED, T.Y., AHMED, I.S. y SAMIR, I., 2017. MgO nanostructure via a sol-gel combustion synthesis method using different fuels: An efficient nano-adsorbent for the removal of some anionic textile dyes. *Journal of Molecular Liquids* [en línea], vol. 225, no. November, pp. 730–740. ISSN 01677322. DOI 10.1016/j.molliq.2016.10.135. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.135>.
- OCHEDI, F.O., LIU, Y. y HUSSAIN, A., 2020. A review on coal fly ash-based adsorbents for mercury and arsenic removal. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 267, pp. 122143. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.122143. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122143>.
- ONYANGO, M.S., KOJIMA, Y., AOYI, O., BERNARDO, E.C. y MATSUDA, H., 2004. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 279, no. 2, pp. 341–350.

- ISSN 00219797. DOI 10.1016/j.jcis.2004.06.038.
- PAL, P., 2015. *Adsorption Method of Arsenic Separation from Water*. S.I.: s.n. ISBN 9780128012819.
- PRABHAKAR, R. y SAMADDER, S.R., 2020. Use of adsorption-influencing parameters for designing the batch adsorber and neural network–based prediction modelling for the aqueous arsenate removal using combustion synthesised nano-alumina. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 21, pp. 26367–26384. ISSN 16147499. DOI 10.1007/s11356-020-08975-y.
- PREDOI, D., ICONARU, S.L., PREDOI, M.V. y MOTELICA-HEINO, M., 2020. Removal and oxidation of as(III) from water using iron oxide coated CTAB as adsorbent. *Polymers*, vol. 12, no. 8. ISSN 20734360. DOI 10.3390/POLYM12081687.
- PULLELLA, K. y KOTSOPOULOS, J., 2020. Arsenic exposure and breast cancer risk: A re-evaluation of the literature. *Nutrients*, vol. 12, no. 11, pp. 1–17. ISSN 20726643. DOI 10.3390/nu12113305.
- RASOOL, A., FAROOQI, A., XIAO, T., MASOOD, S., KAMRAN, M.A. y BIBI, S., 2016. Elevated levels of arsenic and trace metals in drinking water of Tehsil Mailsi, Punjab, Pakistan. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 169, pp. 89–99. ISSN 03756742. DOI 10.1016/j.gexplo.2016.07.013.
- REID, M.S., HOY, K.S., SCHOFIELD, J.R.M., UPPAL, J.S., LIN, Y., LU, X., PENG, H. y LE, X.C., 2020. Arsenic speciation analysis: A review with an emphasis on chromatographic separations. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* [en línea], vol. 123, pp. 115770. ISSN 18793142. DOI 10.1016/j.trac.2019.115770. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115770>.
- RENTERIA, V.H., ALMANZA, J.M., TORRES, J.T. y B, D.A.C.J.C.E., 2010. Eliminación de arsénico (V) utilizando: equilibrio, cinética y estudios termodinámicos. *Iberomet Xi X Conamet/Sam*, no. V, pp. 10.
- ROBINSON, M.R., COUSTEL, R., ABDELMOULA, M. y MALLETT, M., 2020. As(V) and As(III) sequestration by starch functionalized magnetite nanoparticles: influence of the synthesis route onto the trapping efficiency. *Science and Technology of Advanced Materials* [en línea], vol. 21, no. 1, pp. 524–539. ISSN 18785514. DOI 10.1080/14686996.2020.1782714.

- Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1782714>.
- ROJAS-CHAVES, P., VARGAS-BENAVIDES, M.J., ARAYA-OBANDO, A., VALVERDE-CERDAS, J. y ROMERO-ESQUIVEL, L.G., 2015. Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación. *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 28, no. 4, pp. 53–65. ISSN 0379-3982. DOI 10.18845/tm.v28i4.2443.
- SAIF, S., TAHIR, A., ASIM, T., CHEN, Y. y ADIL, S.F., 2019. Polymeric nanocomposites of iron–oxide nanoparticles (lonps) synthesized using terminalia chebula leaf extract for enhanced adsorption of arsenic(v) from water. *Colloids and Interfaces*, vol. 3, no. 1, pp. 1–20. DOI 10.3390/colloids3010017.
- SALEEM, H. y ZAIDI, S.J., 2020. *Developments in the application of nanomaterials for water treatment and their impact on the environment*. S.I.: s.n. ISBN 9744403772.
- SARKAR, A. y PAUL, B., 2016. The global menace of arsenic and its conventional remediation - A critical review. *Chemosphere* [en línea], vol. 158, pp. 37–49. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2016.05.043. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.043>.
- SHERLALA, A.I.A., RAMAN, A.A.A., BELLO, M.M. y ASGHAR, A., 2018. A review of the applications of organo-functionalized magnetic graphene oxide nanocomposites for heavy metal adsorption. *Chemosphere* [en línea], vol. 193, pp. 1004–1017. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.11.093. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.093>.
- SIDDIQUI, S.I. y CHAUDHRY, S.A., 2017. Iron oxide and its modified forms as an adsorbent for arsenic removal: A comprehensive recent advancement. *Process Safety and Environmental Protection* [en línea], vol. 111, pp. 592–626. ISSN 09575820. DOI 10.1016/j.psep.2017.08.009. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.009>.
- SONG, X., WANG, Y., ZHOU, L., LUO, X. y LIU, J., 2021. Halloysite nanotubes stabilized polyurethane foam carbon coupled with iron oxide for high-efficient and fast treatment of arsenic(III/V) wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 165, pp. 298–307. DOI

- 10.1016/j.cherd.2020.11.001.
- RIED, C., BUSTAMANTE, E., CAGLEVIC, C., ROLFO, C., SIRERA, R. y MARSIGLIA, H., 2019. Oncogenic role of arsenic exposure in lung cancer: A forgotten risk factor. *Critical Reviews in Oncology/Hematology* [en línea], vol. 139, no. January, pp. 128–133. ISSN 18790461. DOI 10.1016/j.critrevonc.2019.01.012. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2019.01.012>.
- TAHOON, M.A., SIDDEEG, S.M., ALSAIARI, N.S., MNIF, W. y BEN REBAH, F., 2020. Effective heavy metals removal from water using nanomaterials: A review. *Processes*, vol. 8, no. 6, pp. 1–24. ISSN 22279717. DOI 10.3390/PR8060645.
- TAMAYO, R., ESPINOZA-GONZÁLEZ, R., GRACIA, F., RODRIGUES-FILHO, U.P., FLORES, M. y SACARI, E., 2019. As(III) removal from aqueous solution by calcium titanate nanoparticles prepared by the sol gel method. *Nanomaterials*, vol. 9, no. 5. ISSN 20794991. DOI 10.3390/nano9050733.
- TANG, W., LI, Q., GAO, S. y SHANG, J.K., 2011. Arsenic (III,V) removal from aqueous solution by ultrafine α -Fe₂O₃ nanoparticles synthesized from solvent thermal method. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 192, no. 1, pp. 131–138. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2011.04.111.
- THY, L.T.M., THUONG, N.H., TU, T.H., MY, N.H.T., TUONG, H.H.P., NAM, H.M., PHONG, M.T. y HIEU, N.H., 2020. Fabrication and adsorption properties of magnetic graphene oxide nanocomposites for removal of arsenic (V) from water. *Adsorption Science and Technology*, vol. 38, no. 7–8, pp. 240–253. ISSN 20484038. DOI 10.1177/0263617420942710.
- VILLA, F. y ANAGUANO, A., 2013. Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 4, no. 2, pp. 27. ISSN 2145-6097. DOI 10.22490/21456453.982.
- WANG, J. y GUO, X., 2020. Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. *Chemosphere* [en línea], vol. 258, pp. 127279. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.127279. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>.
- WANG, T., YANG, W., SONG, T., LI, C., ZHANG, L., WANG, H. y CHAI, L.,

2015. Cu doped Fe₃O₄ magnetic adsorbent for arsenic: Synthesis, property, and sorption application. *RSC Advances*, vol. 5, no. 62, pp. 50011–50018. ISSN 20462069. DOI 10.1039/c5ra03951g.
- WOJCIECHOWSKA, A. y BIELUN, Z., 2020. Synthesis and characterization of magnetic nanomaterials with adsorptive properties of arsenic ions. *Molecules*, vol. 25, no. 18. ISSN 14203049. DOI 10.3390/molecules25184117.
- YU, X., WEI, Y., LIU, C., MA, J., LIU, H., WEI, S., DENG, W., XIANG, J. y LUO, S., 2019. Ultrafast and deep removal of arsenic in high-concentration wastewater: A superior bulk adsorbent of porous Fe₂O₃ nanocubes-impregnated graphene aerogel. *Chemosphere* [en línea], vol. 222, pp. 258–266. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.01.130. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.130>.
- ZHU, J., LOU, Z., LIU, Y., FU, R., BAIG, S.A. y XU, X., 2015. Adsorption behavior and removal mechanism of arsenic on graphene modified by iron-manganese binary oxide (FeMnO_x/RGO) from aqueous solutions. *RSC Advances*, vol. 5, no. 83, pp. 67951–67961. ISSN 20462069. DOI 10.1039/c5ra11601e.

IX. Anexo

Anexo 1: Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicador
Parámetros de rendimiento	Conjunto de valores necesarios para comprender el comportamiento de un adsorbente en el proceso de adsorción (Das et al., 2020).	Eficiencia de remoción	Concentración final en función de la concentración inicial
Indicadores	Conjunto de datos imprescindibles, cuyos efectos permiten controlar ciertas características del adsorbente (Liu, Kim, Kumar y Kim, 2019).	Dosis del adsorbente	Cantidad de adsorbente utilizado por unidad de volumen de solución
		pH del medio	Cantidad de iones hidrógeno dispersos en un medio
		Temperatura	Grados Kelvin
		Tiempo de contacto	Medida en minutos

Anexo 2: Instrumento de recolección de datos

Tipo de Adsorbente	Especie de arsénico	pH	Concentración de arsénico (mg/L)	Tiempo de contacto (min.)	Dosis del adsorbente (g/L)	Eficiencia de remoción (%)	Cinética	Isoterma	Autor	Data base	DOI

Anexo 3: Resultados de las pruebas estadísticas

Parámetros (As ³⁺)	<i>r</i>	I.C. 95%	<i>p</i>	Significancia
pH	+0.122	(-0.590, 0.727)	0.755	No significativo
Ci	-0.161	(-0.746, 0.563)	0.678	No significativo
T. contacto	+0.267	(-0.539, 0.818)	0.523	No significativo
Dosis	-0.086	(-0.710, 0.613)	0.826	No significativo
Parámetros (As ⁵⁺)	<i>r</i>	I.C. 95%	<i>p</i>	Significancia
pH	+0.225	(-0.939, 0.975)	0.775	No significativo
Ci	-0.986	(-1.00, -0.487)	0.014	Significativo
T. contacto	+0.996	(0.822, 1.000)	0.004	Significativo
Dosis	+0.501	(-0.887, 0.987)	0.499	No significativo



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, VALDIVIEZO GONZALES LORGIO GILBERTO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis titulada: "EVALUACIÓN MEDIANTE META-ANÁLISIS DEL USO DE NANOADSORBENTES PARA REMOVER ARSÉNICO (III Y V) EN MEDIO ACUOSO", cuyo autor es HUARCAYA SANCHEZ LIMBER LUIS, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 7.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 13 de Julio del 2021

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
VALDIVIEZO GONZALES LORGIO GILBERTO DNI: 40323063 ORCID: 0000-0002-8200-4640	Firmado electrónicamente por: LVALDIVIEZOG el 21-07-2021 20:36:17

Código documento Trilce: TRI - 0129239