

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Remoción de los iones metálicos de plomo (Pb^{2+}) y mercurio (Hg^{2+}) de aguas ácidas empleando la dolomita natural

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Flor Flores Paja

Yoel Edson Huanca Coila

Asesor:

Msc. Rose Adeline Callata Chura

Juliaca, octubre de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

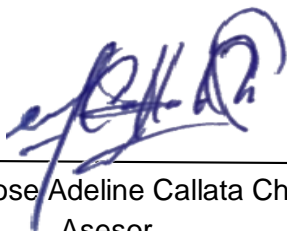
Rose Adeline Callata Chura, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: **“REMOCIÓN DE LOS IONES METÁLICOS DE PLOMO (PB²⁺) Y MERCURIO (HG²⁺) DE AGUAS ÁCIDAS EMPLEANDO LA DOLOMITA NATURAL”** constituye la memoria que presentan los Bachilleres **Flor Flores Paja** y **Yoel Edson Huanca Coila** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 03 días del mes de noviembre del año 2022



Msc. Rose Adeline Callata Chura
Asesor



181

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 11 día(s) del mes de octubre del año 2022, siendo las 12:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Nancy Lurasí Rafael, el secretario: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera y los demás miembros: Msc. Jael Galla Galla y el asesor: Msc. Rose Adeline Gallata Churá

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Remoción de los iones metálicos de plomo (Pb2+) y mercurio (Hg2+) de aguas ácidas empleando la dolomita natural

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Yoel Edson Huanca Loila b) Flor Flores Caja conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental (Nombre del Título Profesional)

con mención en:

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Yoel Edson Huanca Loila

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	19	A	Excelente	Excelencia

Candidato (b): Flor Flores Caja

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	19	A	Excelente	Excelencia

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente

Asesor

Candidato/a (a)

Miembro

Secretario

Miembro
Candidato/a (b)

Remoción de los iones metálicos de plomo (Pb^{2+}) y mercurio (Hg^{2+}) de aguas ácidas empleando la dolomita natural

Removal of lead (Pb^{b+}) and mercury (Hg^{2+}) metal ions from acidic waters using natural dolomite

Flor Flores Paja ^{a*}, Yoel Edson Huanca Coila^b, Rose Adeline Callata Chura^c

^aBachiller en Ingeniería Ambiental de la E.P. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruna Unión-Filial Juliaca

^bBachiller en Ingeniería Ambiental de la E.P. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruna Unión-Filial Juliaca

^cMaestra de la E.P. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruna Unión-Filial Juliaca

Resumen

La presencia de metales pesados en los recursos hídricos, provoca impactos negativos a la salud humana y al ambiente; el uso de la dolomita es un método alternativo de neutralización, adsorción y precipitación de los iones metálicos. El objetivo de esta investigación es evaluar la eficiencia de remoción de los iones metálicos de Pb^{2+} y Hg^{2+} de aguas ácidas empleando la dolomita natural. Las concentraciones de los iones metálicos se analizaron por el método de ICP-MS. Los factores experimentales que se estudiaron en el proceso de remoción de Pb^{2+} y Hg^{2+} fueron la dolomita como adsorbente a 2.5, 5, 10 g y tiempo de agitación a 30, 45, 60 min. Los resultados mostraron que la dolomita natural es eficiente en la adsorción de Pb^{2+} y Hg^{2+} , cuyas concentraciones iniciales de 227 mg/L y 2.9 mg/L con un pH 3, fueron reducidas a 0.1637 mg/L y 0.0263 mg/L con pH 7. Alcanzando una remoción máxima del 99.93 % de Pb^{2+} y 99.09 % de Hg^{2+} con un adsorbente óptimo de 10 g y tiempos óptimos de 30 min y 60 min, respectivamente. Para validación de los resultados se aplicó el Diseño Arreglo Factorial 3AX3B al 95 % IC ($p < 0.05$) determinando que el adsorbente y tiempo de agitación son significativos en la remoción de Pb^{2+} y Hg^{2+} . La dolomita tiene un gran potencial para la remoción de iones metálicos presentes en aguas contaminadas, presentándose como una alternativa económica para la mejora de la calidad del agua y la no afectación al ambiente.

Palabras clave: Dolomita, adsorción, plomo, mercurio, remoción.

Abstract

The presence of heavy metals in water resources causes negative impacts on human health and the environment; the use of dolomite is an alternative method of neutralisation, adsorption and precipitation of metal ions. The objective of this research is to evaluate the removal efficiency of Pb^{2+} and Hg^{2+} metal ions from acidic waters using natural dolomite. The concentrations of the metal ions were analysed by ICP-MS method. The experimental factors studied in the Pb^{2+} and Hg^{2+} removal process were dolomite as adsorbent at 2.5, 5, 10 g and agitation time at 30, 45, 60 min. The results showed that natural dolomite is efficient in the adsorption of Pb^{2+} and Hg^{2+} , whose initial concentrations of 227 mg/L and 2.9 mg/L at pH 3 were reduced to 0.1637 mg/L and 0.0263 mg/L at pH 7, reaching a maximum removal of 99.93 % of Pb^{2+} and 99.09 % of Hg^{2+} with an optimum adsorbent of 10 g and optimum times of 30 min and 60 min, respectively. For validation of the results, the 3AX3B Factorial Array Design was applied at 95 % CI ($p < 0.05$) determining that the adsorbent and agitation time are significant in the removal of Pb^{2+} and Hg^{2+} . Dolomite has a great potential for the removal of metal ions present in contaminated water, presenting itself as an economic alternative for improving water quality and not affecting the environment.

Keywords: Dolomite, adsorption, lead, mercury, removal.

*Autor de correspondencia: ^a Flor Flores Paja, ^b Yoel E. Huanca Coila

Km. 6 Carretera interoceánica, Chullunquiani, Juliaca

Cel: ^a989115418-^b926520208

E-mail: ^aflor.fp@upeu.edu.pe, ^byoel.hc@upeu.edu.pe

1 Introducción

Actualmente el panorama ambiental en las actividades mineras se ha convertido de interés a nivel mundial, debido a su alto impacto ocasionado por los procesos metalúrgicos y la presencia de pasivos ambientales mineros (PAM), que han generado problemas ambientales al medio físico, químico, biótico, abiótico, social y daños a la salud humana (Ayala et al., 2019; Fuerte & Ramírez, 2021).

A nivel internacional el Perú es reconocido como un país megadiverso (MINAM, 2021) y con importantes yacimientos mineros, posee una de las principales reservas mundiales de plata, cobre, plomo, zinc y oro (Chappuis, 2019). Sin embargo, la explotación de yacimientos mineros impacta al ambiente, generando emisiones, relaves y daños en: la tierra, el suelo, el agua (contaminación de aguas superficiales y subterráneas), el aire, la flora y fauna, la salud humana (Menéndez & Muñoz, 2021), así como también el aumento de conflictos sociales y el establecimiento de centros mineros formales e informales de extracción de oro, por ello la Defensoría del Pueblo del Perú (DP) a través de la recopilación de datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y Ministerio de Salud (MINSa) menciona que en el Perú las regiones con más riesgo de exposición de metales pesados son: Lambayeque (100%), Ucayali (99 %), Cusco (96 %), Moquegua (90 %), Madre de Dios (86 %), Callao (76 %), Amazonas (64 %), Puno (58%), Pasco (51 %), representando más de 10 millones de personas expuestas a metales pesados y que estos se encuentran en sus organismo principalmente sustancias tóxicas como el plomo, mercurio, cadmio y arsénico generando muertes en las personas. Desde la década de los años 80 en Puno, los habitantes de la provincia de San Antonio de Putina establecieron en la localidad de Rinconada un centro minero informal de extracción de oro (Goyzueta & Trigos, 2009; Ocola & Laqui, 2017 & Mina, 2017), representando un riesgo para la salud pública del centro poblado y generando serios problemas ambientales y desde el año 2000, familias enteras se dedican a la minería informal sin medidas de protección, estando expuestos a la ingesta de alimentos contaminados, exposición a suelos contaminados, inhalación de polvo y el agua contaminada con metales pesados, los cuales han sido identificados por el Ministerio de Salud como importantes factores de exposición, al mismo tiempo más del 31.15 % de la población nacional se encuentra en esta situación al año 2020 (MINSa, 2018; DP, 2021 & Mercado, 2021).

Esta problemática ha generado en los últimos años un incremento considerable de estudios relacionados con la remoción de estos metales pesados presentes en aguas ácidas, desde tecnologías de filtración por membrana, electrodeposición, precipitación química, ósmosis inversa, (Shah et al., 2019); así como también métodos de tratamiento, mediante el uso de adsorbentes como: adsorbentes modificados y magnetizados, siendo estos menos eficientes y

tienen un costo alto de fabricación. Sin embargo, la dolomita es muy eficiente, de bajo costo y puede emplearse como adsorbentes debido a sus características fisicoquímicas únicas, así como a sus efectos no tóxicos para el medio ambiente. Por lo tanto, el tratamiento con dolomita natural es un método alternativo de neutralización, adsorción y precipitación de los iones metálicos de Pb^{2+} y Hg^{2+} que se encuentran presentes en los efluentes mineros, los cuales son descargados de manera informal sin ningún tipo de tratamiento a las aguas superficiales como aguas ácidas, acidificando, contaminando el medio ambiente y la afectación de la salud de la población, siendo la laguna de la Rinconada un claro ejemplo del impacto ambiental que causa los efluentes mineros contenidos con metales pesados, producto de los procesos de extracción del oro (Mamani, 2018; Aycachi, 2019). La dolomita es un mineral no metálico de carbonato doble de calcio y magnesio ($CaMg(CO_3)_2$), principalmente se compone de óxido de magnesio (MgO) y calcio (CaO) su formación se da por la acción del agua rica en magnesio sobre depósitos calcáreos y posee propiedades fisicoquímicas que neutraliza, adsorbe y precipita, ello conduce a la reducción de la concentración de iones metálicos presentes en las aguas ácidas, procedentes de las actividades mineras y procesos metalúrgicos (Romero et al., 2010; Haldar & Tišljarić, 2014 & Shah et al., 2019).

En base a lo mencionado, esta investigación tiene como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de los iones metálicos de Pb^{2+} y Hg^{2+} de aguas ácidas empleando la dolomita natural.

2 Materiales y métodos

2.2. Lugar de estudio y toma de muestra

La laguna de aguas ácidas está ubicada en la ciudad Rinconada, de la provincia San Antonio de Putina del departamento de Puno. Con coordenadas UTM correspondientes de 443,309.0 de latitud y 8,377,218.0 de longitud con una altitud 4407 m.s.n.m. La toma y recolección de muestra se realizó en base al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficial. Se aplicó el método compuesto, en el cual se tomaron muestras en tres puntos estratégicos a criterio tal como muestra la Figura 1. El volumen del agua superficial (muestra inicial) recolectado fue de 20 L con su respectivo rótulo, conservación (ácido nítrico) y preservación (paquetes refrigerantes chillers) (ANA, 2016).

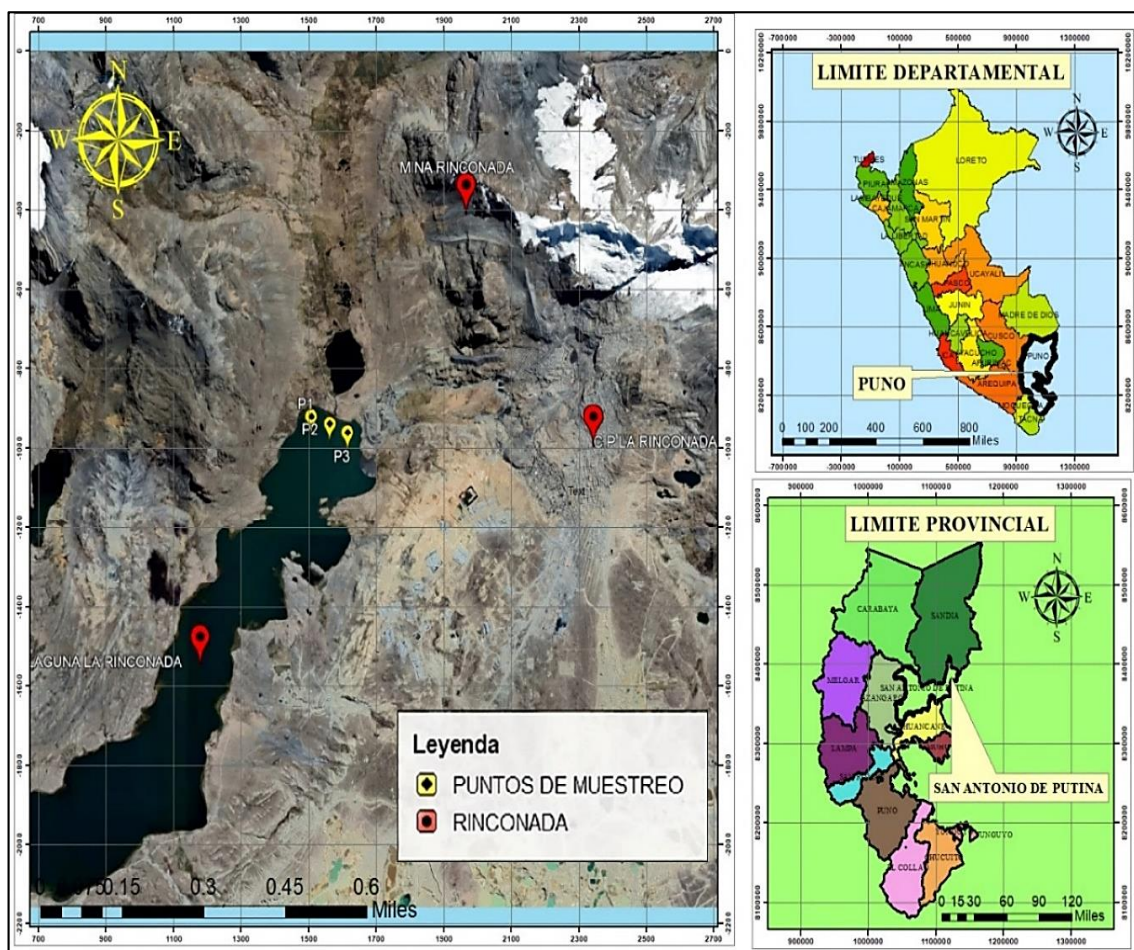


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo.

2.3. Obtención y preparación del adsorbente (dolomita natural)

La dolomita natural fue adquirida de la compañía minera AGREGADOS CALCAREOS S.A. (COMACSA), el cual ha sido empleado en las pruebas experimentales de la remoción de iones metálicos de Pb^{2+} y Hg^{2+} de las aguas ácidas de la laguna Rinconada. Previamente se desarrolló un análisis de fluorescencia de rayos X (ARL-BASE SECA) en el laboratorio de la compañía minera (COMACSA) para la determinación de la composición química de los elementos que compone la dolomita, en seguidamente paso por tres tamices Núm. 125 μm , 63 μm , 45 μm , para lo cual se utilizó el equipo tamizador vibratorio AS 200 control, con el fin de obtener una partícula definida y homogénea del adsorbente (dolomita natural) (Diwan et al., 2020).

2.4. Análisis fisicoquímico de la muestra inicial de las aguas ácidas

El análisis de los parámetros fisicoquímicos de la muestra inicial obtenida se realizó en el Laboratorio Ambiental de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ)-Puno y el laboratorio de Certificaciones del Perú S.A (CERPER)-Arequipa. Se realizaron los análisis de los siguientes parámetros: Pb^{2+} , Hg^{2+} , potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica ($\mu S/cm$), aplicando

los métodos de: Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), 4500-H+pH Laboratory Standard Method y 2510B-Conductivity laboratory Method (Rice et al., 2017).

2.5. Proceso de adsorción del plomo (Pb^{2+}) y mercurio (Hg^{2+}) empleando la dolomita natural como agente adsorbente

La remoción de los iones metálicos de Pb^{2+} y Hg^{2+} de las aguas ácidas de la laguna Rinconada se realizó según la metodología de Ruiz (2018), utilizándose un equipo agitador magnético de calentamiento AREC F20500011 para la agitación magnética y homogenización de la muestra inicial con la aplicación de la dolomita natural. Los experimentos de adsorción de Pb^{2+} y Hg^{2+} , se llevaron a cabo en 9 vasos precipitados, en cada vaso se introdujo 500 mL de la muestra inicial, posterior a ello en cada vaso se agregó el adsorbente (dolomita natural) en diferentes gramos (2.5 g, 5 g y 10 g). Los vasos precipitados se colocaron en los agitadores magnéticos a una velocidad de agitación constante de 400 rpm a temperatura ambiente y durante un tiempo de agitación de 30, 45, y 60 min, seguidamente las muestras se retiraron y se dejó a decantar por un período de 10 min, transcurrido el tiempo determinado las muestras se filtraron utilizando papel de filtro, con la finalidad de separar las partículas de dolomita del agua tratada, y se extrajo 250 mL para su respectivo análisis de los parámetros de Pb^{2+} y Hg^{2+} por el método de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivo (ICP-MS), con la finalidad de determinar la concentración final de los iones metálicos de Pb^{2+} y Hg^{2+} . Los ensayos experimentales se realizaron por triplicado. La figura 2 muestra el esquema de los procesos de tratamiento empleando la dolomita natural.



Figura 2. Esquema del proceso de tratamiento empleando la dolomita como adsorbente en la remoción de Pb^{2+} y Hg^{2+} .

2.6. Determinación del porcentaje de remoción

La eficiencia del porcentaje de remoción (%) de los iones metálicos estudiados Pb^{2+} y Hg^{2+} se calculó a partir de la ecuación (1), donde: C_0 y C_f representan la concentración inicial y final de los iones metálicos Pb^{2+} y Hg^{2+} (Shah, et al., 2019).

$$\%R = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100 \quad (1)$$

2.7. Diseño estadístico

Para validar los resultados, se aplicó el Diseño Arreglo Factorial 3AX3B, donde el factor (A) (variable independiente) dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (g) como agente adsorbente de metales pesados de Pb^{2+} y Hg^{2+} con 3 niveles (2.5 g, 5 g, 10 g) y el factor (B) (variable independiente) tiempo de agitación con 3 niveles (30 min, 45 min, 60 min). La variable dependiente o de respuesta fue la remoción de los iones metálicos de Pb^{2+} y Hg^{2+} presente en el agua ácida de la laguna Rinconada. Se realizó 9 tratamientos con 3 réplicas por cada una de ellas ($3 \times 3 \times 3 = 27$ tratamientos). El cual, se explica en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1.

Factorial variable para la obtención de los resultados de adsorción y remoción de Pb^{2+} y Hg^{2+} .

Tratamiento	Réplica	Variable Independiente		Variable Dependiente
		Adsorbente Dolomita (g)	Tiempo de Agitación (min)	Remoción (%) / Adsorción de (mg/L) de plomo y mercurio
T-1	3	2.5	30	-
T-2	3	5	30	-
T-3	3	10	30	-
T-4	3	2.5	45	-
T-5	3	5	45	-
T-6	3	10	45	-
T-7	3	2.5	60	-
T-8	3	5	60	-
T-9	3	10	60	-

2.8. Análisis estadístico

La corrida de datos fue evaluada mediante un análisis de varianza (ANOVA), en donde se realizó la distribución de las variables estadísticas y los tratamientos de acuerdo al diseño experimental, se utilizó el Software InfoStat, versión 2020, con un nivel de significancia de 95 % ($p < 0.05$) (Gutiérrez & Vara de la, 2012). La Tabla 2, representa el diseño para los ensayos de laboratorio y el total de tratamientos realizados, para los metales pesados de Pb^{2+} y Hg^{2+} .

Tabla 2.*Diseño Arreglo Factorial 3AX3B*

Réplica	Tiempo de agitación (min)								
	30'			45'			60'		
	Adsorbente (Dolomita natural) (g)								
	2.5g.	5g.	10g.	2.5g.	5g.	10g.	2.5g.	5g.	10g.
I	MCT- 1.1	MCT- 1.2	MCT- 1.3	MCT- 2.1	MCT- 2.2	MCT- 2.3	MCT- 3.1	MCT- 3.2	MCT- 3.3
II	MCT- 1.4	MCT- 1.5	MCT- 1.6	MCT- 2.4	MCT- 2.5	MCT- 2.6	MCT- 3.4	MCT- 3.5	MCT- 3.6
III	MCT- 1.7	MCT- 1.8	MCT- 1.9	MCT- 2.7	MCT- 2.8	MCT- 2.9	MCT- 3.7	MCT- 3.8	MCT- 3.9

Nota: Donde: MCT: Muestra con Tratamiento.

3 Resultados

3.2. Composición química de la dolomita natural

Con el fin de evaluar la composición química de la dolomita natural se realizó el análisis de fluorescencia de rayos X (ARL-BASE SECA) de la dolomita natural. La figura 3 muestra los resultados obtenidos de la composición química en porcentaje (%), el cual, indica que la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) tiene una pureza del 99.9 % y contiene principalmente óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO), con un porcentaje alto de 29.56 % y 20.37 % respectivamente, lo que indica una dolomita de alta pureza, también contiene una cantidad muy baja de dióxido de silicio (SiO_2) con un valor porcentual de 3.71 % en su composición química. Así mismo, la dolomita obtuvo un potencial de hidrógeno con un valor de 9.2 pH. A de resaltar que el pH de la dolomita es un factor importante que controla la repulsión electrostática entre el grupo de borde de cargas positivas en la superficie y los aniones metálicos (Yamkate et al., 2017).

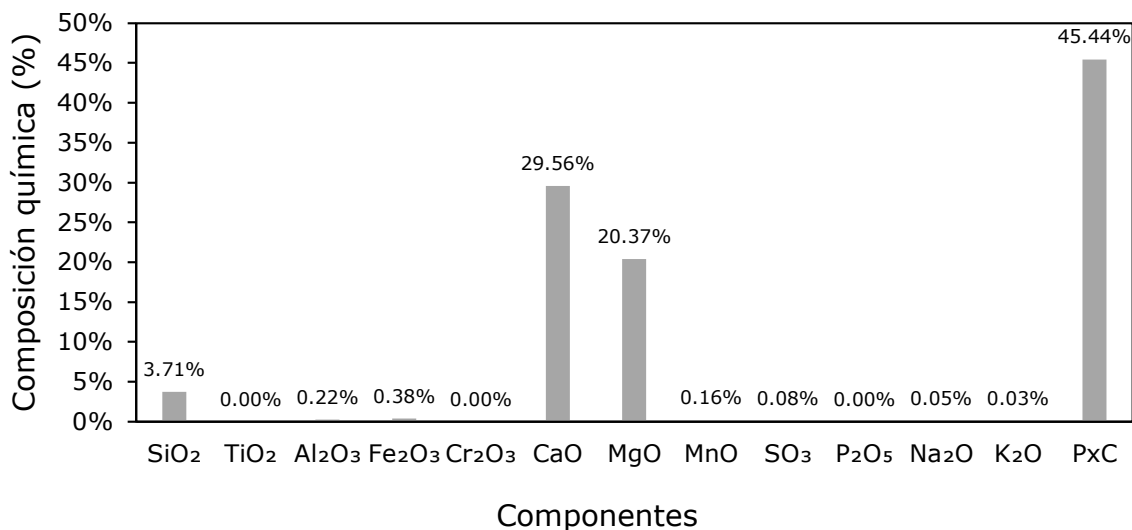


Figura 3. Composición química de la dolomita natural.

3.3. Análisis inicial de la muestra de agua ácida sin tratamiento

La Tabla 3 muestra los resultados de análisis de la muestra inicial del agua ácida antes de su tratamiento, con la finalidad de conocer las concentraciones iniciales de Pb^{2+} , Hg^{2+} , potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica ($\mu S/cm$).

Tabla 3.

Análisis inicial del agua ácida sin tratamiento

Parámetros	Unidad	Resultado	ECA-DS N° 004-2017- MINAM-
Plomo	mg/L	227	0.0025
Mercurio	mg/L	2.9	0.0001
Potencial de hidrógeno	-	3	6.5 a 9.0
Conductividad eléctrica	$\mu S/cm$	42.5	1000

La Tabla 3 presenta que los parámetros de Pb^{2+} , Hg^{2+} y pH se encuentran por encima de los valores establecidos en la normativa de Estándares de Calidad Ambiental (ECA)-Categoría 4: Conservación del ambiente acuático (E1: Lagunas y lagos) del Decreto Supremo N°004-2017-MINAM, Anexo 06. Por lo tanto, no cumplen con la normativa nacional de los ECA-Categoría 4.

En base a los resultados del pH de agua de la laguna Rinconada son aguas ácidas no aptas para ningún tipo de consumo y no se encuentra conservada su calidad natural. Sin embargo, el valor de conductividad eléctrica inicial fue de $42.5 \mu\text{S}/\text{cm} < 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$, siendo este menor a lo establecido en la normativa y se encuentra dentro de los ECA-Categoría 4.

3.4. Efecto de la dolomita natural en la adsorción de iones de plomo

De acuerdo a la figura 4 se observa que la concentración promedio de adsorción mínima de Pb^{2+} (0.7750 mg/L) se encuentra con un adsorbente de 5 g y un tiempo de agitación de 60 minutos (T-8) y la concentración promedio de adsorción máxima de Pb^{2+} se encuentra con un adsorbente de 10 g y un tiempo de agitación de 30 minutos (T-3), disminuyendo significativamente la concentración inicial de 227 mg/L con $\text{pH } 3$ hasta un valor promedio de 0.1637 mg/L con un $\text{pH } 7$. Los valores obtenidos reflejan que la disminución de la concentración de iones de Pb^{2+} se debe al aumento del adsorbente y a la mezcla de la solución a tiempos de agitación de 30 minutos (Figura 4). De ello se deduce que a una mayor cantidad de adsorbente (10 g) y a un menor tiempo de agitación (30 min) se presentara una mayor adsorción de iones de Pb^{2+} en una muestra de 500 mL de agua ácida.

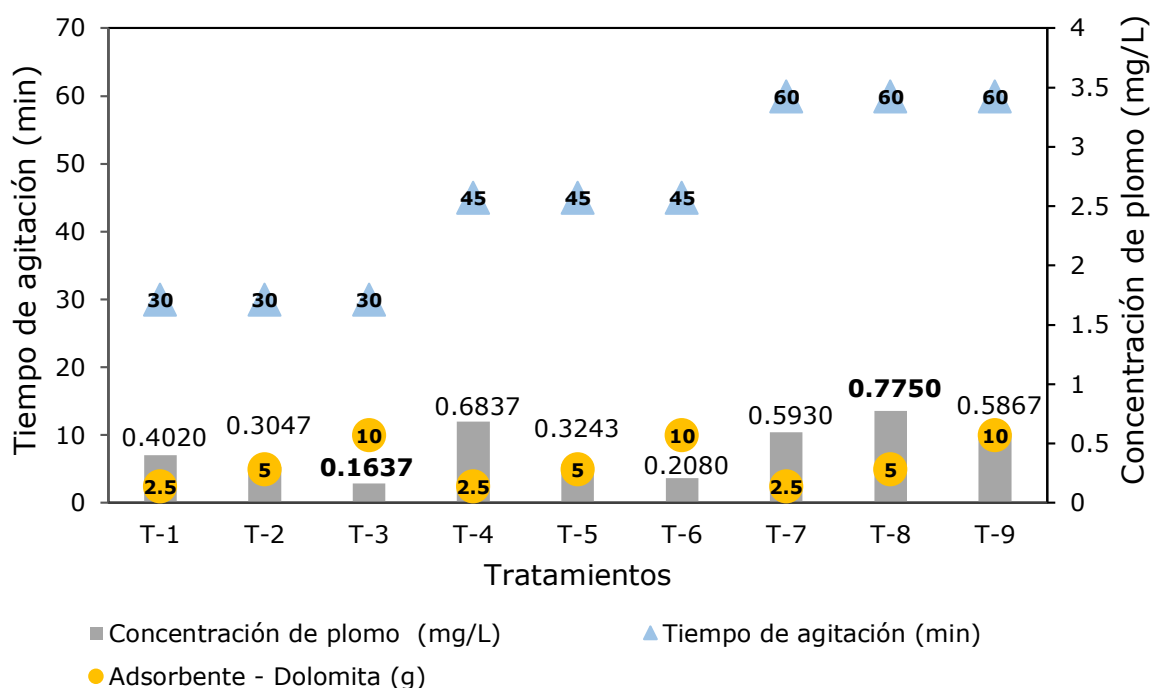


Figura 4. Concentración de Pb^{2+} en relación a la dolomita como adsorbente y tiempo de agitación.

3.5. Efecto de la dolomita natural en la adsorción de iones de mercurio

La figura 5 representa, que el Hg^{2+} es adsorbido por la dolomita y existe una reducción significativa de la concentración de Hg^{2+} , cuyos valores se encuentran diferenciados por decimales atribuyendo a una igual en casi todos los tratamientos. Sin embargo, se puede apreciar que los tratamientos T-7, T-8, T-9 existe una notable reducción del Hg^{2+} de 2.9 mg/L a 0.0337, 0.0302, 0.0263 mg/L mediante la aplicación del adsorbente de 2.5 g, 5 g, 10 g respectivamente y someter la mezcla de la solución a un mayor tiempo de agitación de 60 minutos.

Este aumento de la capacidad de adsorción del adsorbente se puede ver reflejado en el aumento de la cantidad del adsorbente y del tiempo de agitación (Figura 5), donde la concentración promedio de adsorción mínima de Hg^{2+} (0.0429 mg/L) se encuentra con un adsorbente de 2.5 g y un tiempo de agitación de 30 minutos (T-1) y la concentración promedio de adsorción máxima de Hg^{2+} se encuentra con un adsorbente de 10 g y un tiempo de agitación de 60 minutos (T-9) reduciéndose significativamente de la concentración inicial de 2.9 mg/L con pH 3 hasta un valor promedio de 0.0263 mg/L con un pH 7. Los valores obtenidos reflejan que la disminución de la concentración de iones de Pb^{2+} se debe al aumento del adsorbente y a la mezcla de la solución a tiempos de agitación de 60 minutos, tal como muestra la figura 5. De ello se deduce que a una mayor cantidad de adsorbente (10 g) y a un mayor tiempo de agitación (60 min) se presenta una mayor adsorción de iones de Hg^{2+} en una muestra de 500 mL de agua ácida.

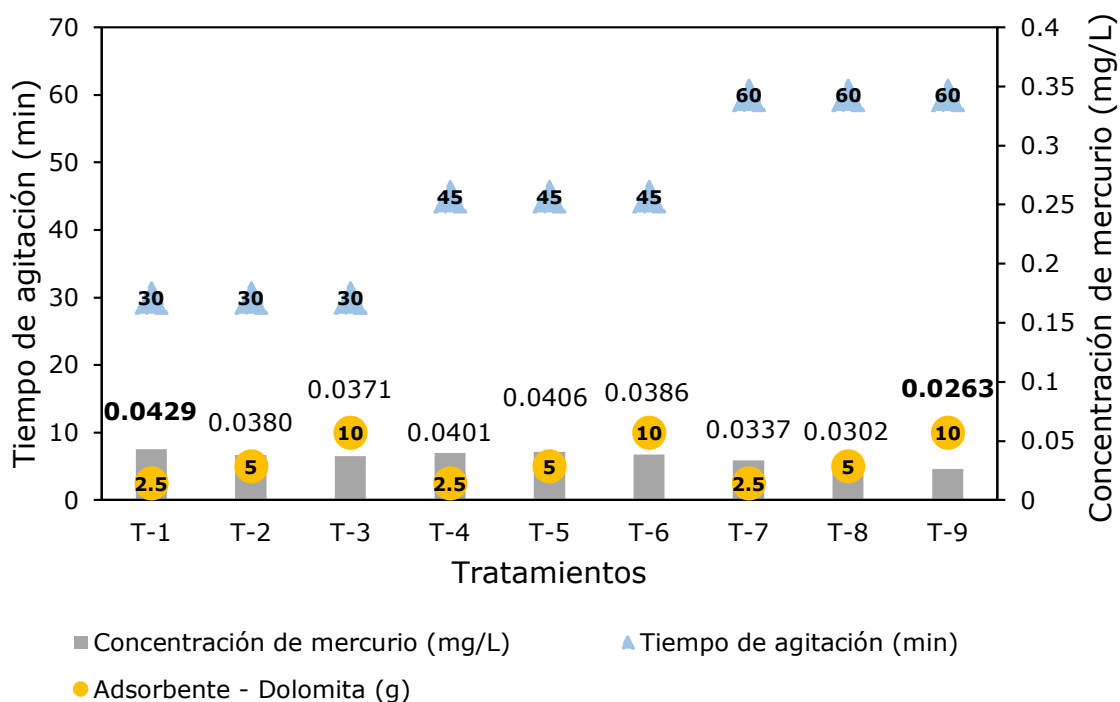


Figura 5. Concentración de Hg^{2+} en relación a la dolomita con adsorbente y el tiempo de agitación.

3.6. Eficiencia de la dolomita natural en la remoción de plomo

De acuerdo a la figura 6 se observa los resultados del porcentaje de remoción de Pb^{2+} a partir del cálculo de la ecuación 1, donde el porcentaje mínimo de remoción de Pb^{2+} del 99.66 % se encuentra con un adsorbente de 5 g y un tiempo de agitación de 60 minutos (T-8) y el porcentaje máximo de remoción de Pb^{2+} del 99.93 % se encuentra con un adsorbente de 10 g y un tiempo de agitación de 30 minutos (T-3). De igual manera, se puede apreciar que la concentración inicial de Pb^{2+} cuyo valor es de 227 mg/L con pH 3 fue adsorbido por la dolomita natural y tuvo una reducción de 0.1637 mg/L con un pH 7, el cual, representa una remoción promedio de Pb^{2+} del 99.93 %.

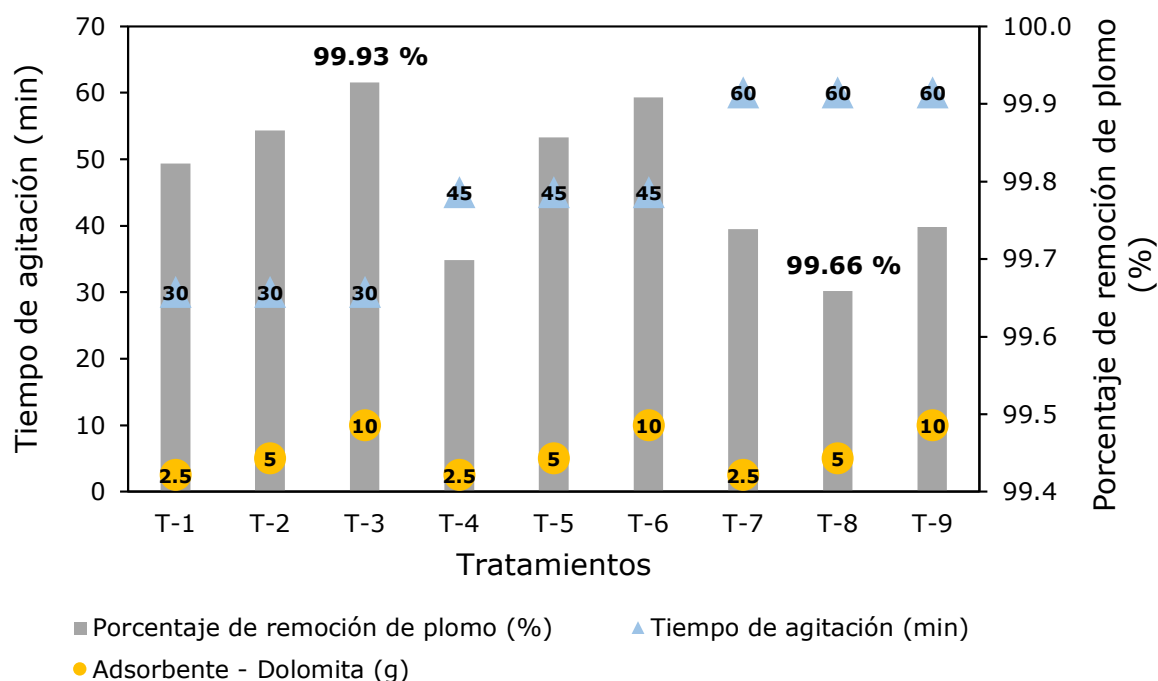


Figura 6. Porcentaje de remoción de Pb^{2+}

3.7. Eficiencia de la dolomita natural en la remoción del mercurio

De acuerdo a la figura 7 se observa los resultados del porcentaje de remoción de Hg^{2+} a partir del cálculo de la ecuación 1, como se puede apreciar la remoción mínima de Hg^{2+} del 98.52 % se encuentra con un adsorbente de 2.5 g y un tiempo de agitación de 30 minutos y la remoción máxima de Hg^{2+} del 99.09 % se encuentra con un adsorbente de 10 g y un tiempo de agitación de 60 minutos. De igual manera, se puede apreciar que la concentración inicial de Hg^{2+} cuyo valor es de 2.9 mg/L con pH 3 fue adsorbido por la dolomita natural notablemente y reducido a 0.0263 mg/L con un pH 7, el cual, representa una remoción promedio de Hg^{2+} del 99.09 %.

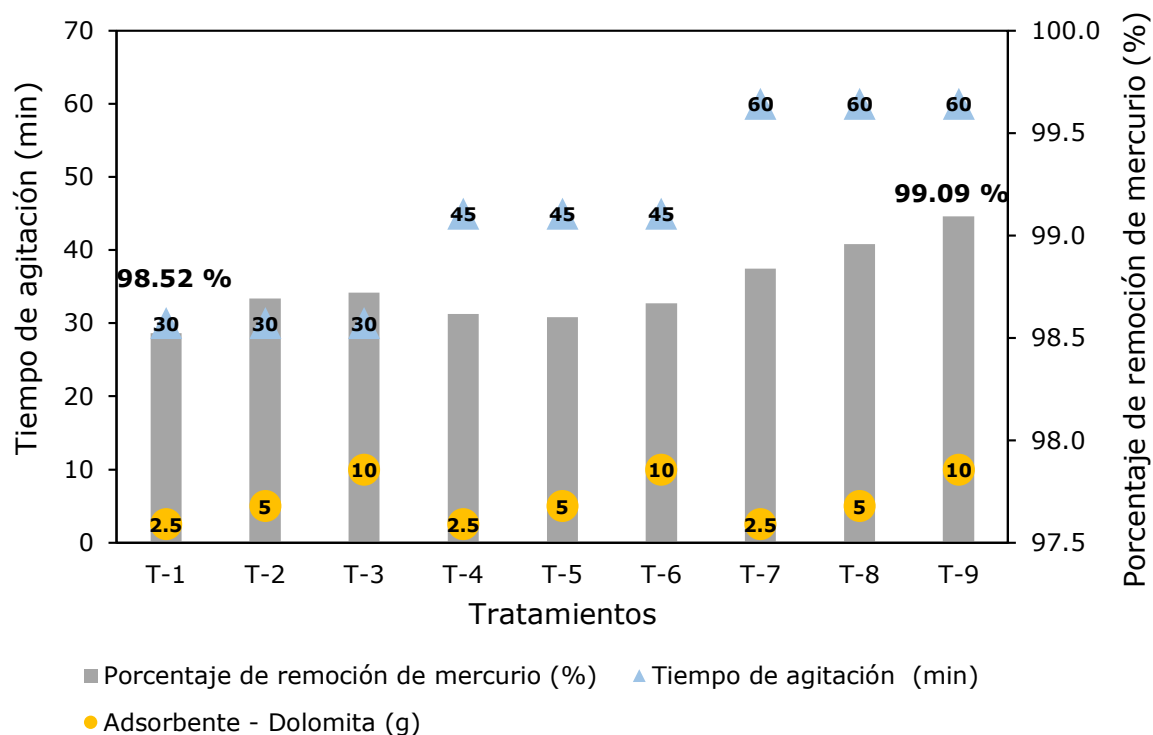


Figura 7. Porcentaje de remoción de Hg^{2+}

3.8. Análisis estadístico

Los factores de estudio se analizaron mediante Análisis de varianza (ANOVA) y la prueba Tukey (5% de significancia), para identificar diferencias significativas y determinar los valores óptimos de dolomita como adsorbente para la remoción de Pb^{2+} y Hg^{2+} utilizando el software InfoStat, versión 2020. Los resultados de estos análisis se presentan a continuación.

Tabla 4.

Análisis de varianza del factor adsorbente y tiempo de agitación en la adsorción de iones de Pb^{2+} .

Fuente	SC	GL	CM	F	p-valor
Adsorbente (g)	0.2643	2	0.1321	29247.8	<0.0001
Tiempo de agitación (min)	0.6136	2	0.3068	67901.7	<0.0001
Tiempo (min)*Adsorbente (g)	0.2593	4	0.0648	14351.5	<0.0001
Error	0.0000	18	0.0000		
Total	1.1374	26			
$R^2 = 0.999$					
$R^2_{Aj} = 0.999$					

Nota. Dónde: SC: Suma de Cuadrados, GL: Grados de Libertad, CM: Cuadrados Medios, F: Estadístico F

La Tabla 4, representa un P-valor por debajo a 0.05 para cada factor (adsorbente, tiempo de agitación), y su interacción (adsorbente y tiempo de agitación), lo que demuestra que el factor adsorbente, tiempo de agitación y su interacción son significativos en la adsorción de los iones de Pb^{2+} , por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_a). De esta manera se deduce que el tiempo y el adsorbente, así como su interacción influye en la adsorción de iones de Pb^{2+} con un nivel de significancia 0.05 al 95 % de confianza. Para la validación del ANOVA se realizó la Prueba de supuestos de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad (Prueba-Levene), en el cual se obtuvo valores de 0.7170 y 0.3639 respectivamente, siendo estos valores mayores a 0.05, por lo tanto, existe una distribución normal y una distribución de varianza homogénea.

Tabla 5.

Prueba de Tukey con $p < 0.05$ para los efectos del factor adsorbente y tiempo de agitación en la adsorción de iones de Pb^{2+}

Adsorbente-Dolomita (g)	Tiempo de agitación (min)	Medias	n	E.E.	
10	30	0.1637	3	0.0012	A
10	45	0.2080	3	0.0012	B
5	30	0.3047	3	0.0012	C
5	45	0.3243	3	0.0012	D
2.5	30	0.4020	3	0.0012	E
10	60	0.5867	3	0.0012	F
2.5	60	0.5930	3	0.0012	G
2.5	45	0.6837	3	0.0012	H
5	60	0.7750	3	0.0012	I

Nota. Dónde: E.E.: Error Estándar, n: 3 niveles de cada factor.

Considerando que el p-valor de la tabla ANOVA para el factor adsorbente, tiempo de agitación y su interacción es $0.0001 < 0.05$, se puede concluir que existen diferencias significativas en la adsorción de iones de Pb^{2+} evaluados en los diferentes tratamientos, rechazando así la hipótesis nula del ANOVA. La tabla 5 representa la prueba de Tukey, en el cual, se observa que la máxima adsorción de iones de Pb^{2+} con una media de 0.1637 mg/L se desarrolló con 10 g de adsorbente y un tiempo agitación de 30 minutos y la mínima adsorción de iones de Pb^{2+} con una media de 0.7750 mg/L se da con un adsorbente de 5 g y un tiempo de agitación de 60 minutos, que se obtuvo entre los tratamientos, asignado con letra A y I. En tanto se puede concluir que, el adsorbente (2.5, 5, 10 g) y tiempo de agitación (30, 45 y 60 min) poseen una media significativa diferente en la adsorción de iones de Pb^{2+} , destacando que presentan letras distintas y no comparten letras dentro de los grupos de tratamiento.

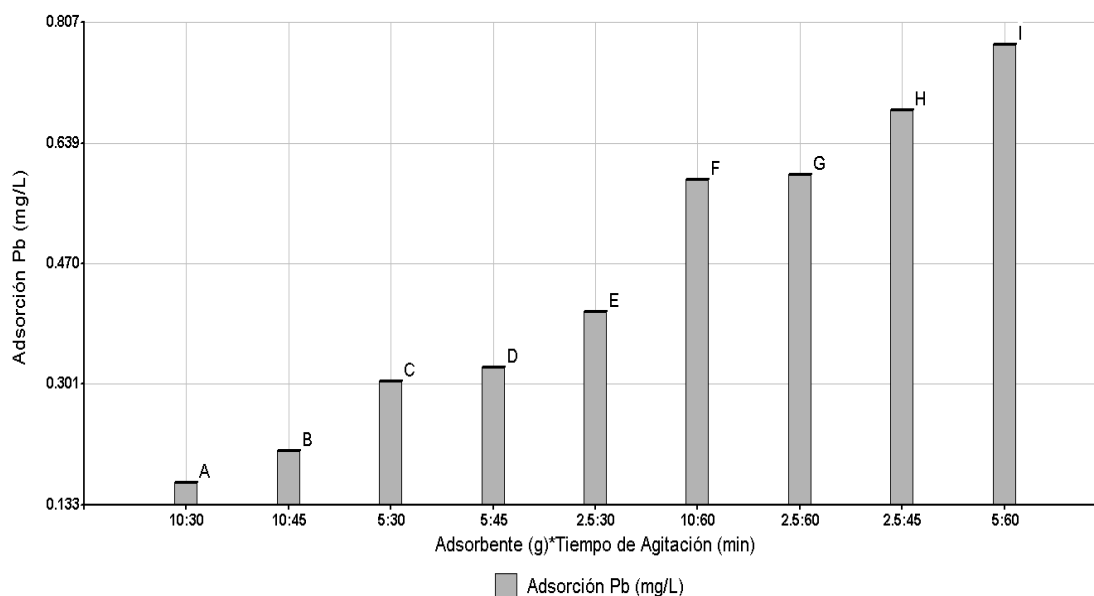


Figura 8. Gráfica de interacción del factor dolomita como adsorbente y tiempo de agitación en la adsorción de iones de Pb^{2+} .

La Figura 8 muestra la mayor adsorción de iones de Pb^{2+} se efectúa con 10 g de adsorbente y un tiempo de 30 minutos, reduciendo la concentración inicial de Pb^{2+} cuyo valor es de 227 mg/L a 0.1637 mg/L alcanzando una remoción del 99.93 %.

Tabla 6.

Análisis de varianza del factor adsorbente y tiempo de agitación en la adsorción de iones de Hg^{2+} .

Fuente	SC	GL	CM	F	p-valor
Adsorbente (g)	0.00010	2	0.00005	174.321	<0.0001
Tiempo de agitación (min)	0.00053	2	0.00026	859.647	<0.0001
Adsorbente (g) *Tiempo de agitación (min)	0.00003	4	0.00000	31.4334	<0.0001
Error	0.00000	18	0.00000		
Total	0.00068	26			
$R^2 = 0.992$					
$R^2_{Aj} = 0.988$					

Nota. Dónde: SC: Suma de Cuadrados, GL: Grados de Libertad, CM: Cuadrados Medios, F: Estadístico F.

La tabla 6, Muestra un P-valor por debajo a 0.05 para cada factor (adsorbente, tiempo de agitación), y su interacción (adsorbente y tiempo de agitación), lo que demuestra que el factor adsorbente, tiempo de agitación y su interacción son significativos en la adsorción de los iones de Hg^{2+} , por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_a). De esta

manera se deduce que el tiempo y el adsorbente, así como su interacción influye en la adsorción de iones de Hg^{2+} con un nivel de significancia 0.05 al 95 % de confianza. Para la validación del ANOVA se realizó la prueba de supuestos de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad (Prueba-Levene), en el cual se obtuvo valores de 0.1869 y 0.2335 respectivamente, siendo estos valores mayores a 0.05, por lo tanto, existe una distribución normal y una distribución de varianza homogénea.

Tabla 7.

Prueba de Tukey con $p < 0.05$ para los efectos del factor adsorbente y tiempo de agitación en la adsorción de iones de Hg^{2+}

Adsorbente-Dolomita (g)	Tiempo de agitación (min)	Medias	n	E.E.	
10	60	0.0263	3	0.0003	A
5	60	0.0302	3	0.0003	B
2.5	60	0.0337	3	0.0003	C
10	30	0.0371	3	0.0003	D
5	30	0.0380	3	0.0003	D
10	45	0.0386	3	0.0003	D E
2.5	45	0.0401	3	0.0003	E F
5	45	0.0406	3	0.0003	F
2.5	30	0.0429	3	0.0003	G

Nota. Dónde: E.E.: Error Estándar, n: 3 niveles de cada factor.

Considerando que el p-valor de la tabla ANOVA para el factor adsorbente, tiempo de agitación y su interacción es $0.0001 < 0.05$, se puede concluir que existen diferencias significativas en la adsorción de iones de Hg^{2+} evaluados en los diferentes tratamientos, rechazando así la hipótesis nula del ANOVA. La tabla 7, presenta la prueba de Tukey, en el cual, muestra que con 10 g de adsorbente y un tiempo de 60 minutos se observa una máxima adsorción de Hg^{2+} (0.0263 mg/L) y la mínima adsorción de iones de Hg^{2+} (0.0429 mg/L) se da con un adsorbente de 2.5 g y un tiempo de agitación de 30 minutos que se obtuvo entre los tratamientos, asignado con letra A y G.

Así mismo, las medias ordenadas en forma ascendente muestran que Los adsorbentes y los tiempos de agitación con las letras A, B y C, muestran letras distintas y no comparten letras en los resultados promedios de adsorción de iones Hg^{2+} , en comparación con los adsorbentes y tiempos de agitación, asignado con la letra D, E y F, siendo diferentes a la letra G, por lo que los adsorbentes y tiempos de agitación que comparten una misma letra no son significativamente diferentes. Por ende, el adsorbente de 10 g y tiempo de agitación de 60 minutos poseen una media

significativa diferente y de mayor adsorción de iones de Hg^{2+} a las medias de los adsorbentes y tiempos de agitación que comparten letra D, E y F.

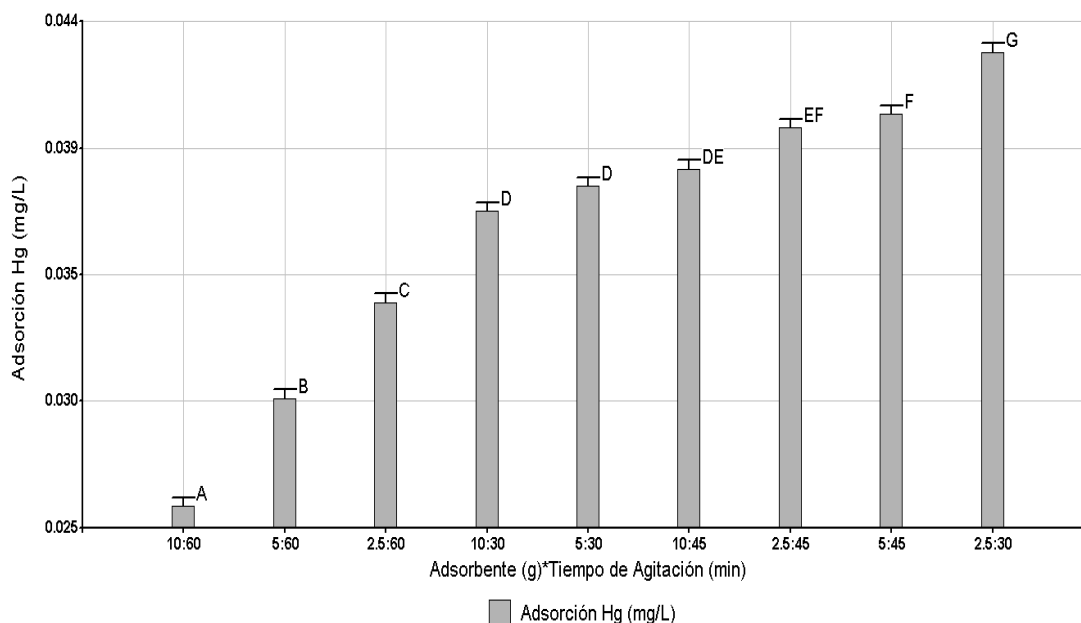


Figura 9. Gráfica de interacción del factor adsorbente y tiempo de agitación en la adsorción de iones de Hg^{2+} .

La figura 9 presenta la máxima adsorción de iones de Hg^{2+} con un adsorbente de 10 g y un tiempo 60 minutos, reduciendo significativamente la concentración inicial de Hg^{2+} cuyo valor es de 2.9 mg/L a 0.0263 mg/L, con un porcentaje de remoción al 99.09 %.

Discusión

Los resultados obtenidos de la presente investigación muestran que el agua de la laguna Rinconada son aguas ácidas, puesto que concentran un pH de 3 siendo un nivel alto de acidez y así mismo la alta carga tóxica de iones de Pb^{2+} 227 mg/L y Hg^{2+} 2.9 mg/L son considerados como una fuente potencial de contaminación de aguas superficiales y subterráneas cambiando la calidad del agua debido a su toxicidad, corrosión, que afecta en gran medida a los recursos hídricos, hidrobiológicos y al ecosistema (Basilio, 2015; Aduvire, 2018 & Mercado, 2021).

La aplicación de la dolomita natural como un adsorbente de iones de Pb^{2+} y Hg^{2+} disueltos en el agua ácida de las pruebas experimentales realizadas han demostrado que su composición

química como el óxido de calcio (CaO) al 29.56 %, óxido de magnesio (MgO) al 20.37 %, silicio (SiO₂) al 3.71 %, entre otros y sus propiedades químicas puede neutralizar, adsorber y precipitar los iones metálicos disueltos en las muestras de agua ácida (Berrospi, 2019; Cai et al., 2021).

De acuerdo a la figura 4 y 5 se observa que el factor adsorbente, tiempo de agitación y su interacción son significativos en la obtención de valores máximos y mínimos de adsorción de Pb²⁺ y Hg²⁺. Los cuales son corroborados y validados por las tablas 4 y 6 del análisis de varianza ANOVA a un Índice Confianza del 95 %, respectivamente para cada ion metálico.

De igual modo, se puede apreciar para Pb²⁺ la tabla 5 de la Prueba de Tukey con p<0.05, que el aumento de la cantidad de adsorbente y la mezcla de la solución a tiempos de agitación mínimos se obtiene valores de adsorción significativos en la adsorción de iones de Pb²⁺. Debido a ello, la máxima adsorción de iones de Pb²⁺ se da en la mezcla de la solución con 10 g de adsorbente y tiempo de agitación de 30 min, sometido a una velocidad constante de 400 rpm, tal como muestra la figura 4 y 6, reduciendo significativamente la concentración de iones de Pb²⁺ de una muestra inicial de 227 mg/L con pH 3 a 0.1637 mg/L con pH 7 en el T-3 y alcanzando una remoción máxima del 99.93 %.

Por otro lado, en la adsorción de los iones de Hg²⁺ (Figura 5), se observa que el aumento de la capacidad de adsorción del adsorbente se ve reflejado en el aumento de la cantidad del adsorbente y del tiempo de agitación, esto se refleja en los resultados obtenidos de la Prueba de Tukey con p<0.05 (Tabla 7), donde la concentración promedio de adsorción máxima de Hg²⁺ (0.0429 mg/L) se encuentra con un adsorbente de 10 g y un tiempo de agitación de 60 minutos, sometido a una velocidad constante de 400 rpm, tal como muestra la figura 5, reduciendo significativamente la concentración inicial de 2.9 mg/L con pH 3 hasta un valor promedio de 0.0263 mg/L con un pH 7 en el T-9 y alcanzando una remoción máxima del 99.09 % (Figura 7). De ello se deduce que a una mayor cantidad de adsorbente (10 g) y a un mayor tiempo de agitación (60 min) se obtuvo una mayor adsorción de iones de Hg²⁺ en una muestra de 500 mL de agua ácida.

Los resultados obtenidos muestran que para una mayor adsorción de iones de Pb²⁺ y Hg²⁺ presentes en una muestra de agua ácida de 500 mL, es significativo, un adsorbente óptimo de 10 g de dolomita con un tiempo de agitación de 30 minutos para Pb²⁺ y un adsorbente óptimo de 10 g de dolomita con un tiempo de agitación de 60 minutos para Hg²⁺, de lo mencionado, la variación del tiempo de agitación en la adsorción de iones de Pb²⁺ con respecto al Hg²⁺, se debe a que los

iones de Pb^{2+} presenta una mayor afinidad con el adsorbente (Sdiri, 2018), ya que las cargas que presenta el Pb^{2+} interactúan de manera rápida a diferencia de los iones de Hg^{2+} (Degs et al., 2006; Shah et al., 2019), concordando con lo reportado por Berrospi (2019) quien también trabajó con el Pb^{2+} y Hg^{2+} indicando que al aumentar de 10 g a 25 g de dolomita natural con un tiempo de agitación de 30 minutos (mayor) y someter la mezcla de la solución de 500 mL de agua ácida a una velocidad constante de 160 rpm, contenido con concentraciones de 0.6537 mg/L de Pb^{2+} y 0.00142 mg/L de Hg^{2+} con un pH 1.96, obtuvo como resultado final una máxima adsorción de 0.0021 mg/L para Pb^{2+} con pH 7.35 y 0.00009 mg/L para Hg^{2+} con pH 6.88, logrando alcanzar una remoción del 99.68 % y 93.66 % respectivamente. Presentando una reducción significativa de la concentración de iones de Pb^{2+} y Hg^{2+} respecto a la muestra inicial.

La eficiencia de la dolomita en la adsorción de Pb^{2+} y Hg^{2+} alcanzadas en este estudio se encuentran por encima de los valores reportados por Berrospi (2019), aunque las condiciones experimentales no son equiparables, ya que la investigación de Berrospi (2019) realizaron la experimentación con concentraciones iniciales de Pb^{2+} (0.6537 mg/L) y Hg^{2+} (0.00142 mg/L) menores a las concentraciones iniciales de Pb^{2+} (227 mg/L) y Hg^{2+} (2.9 mg/L) de la presente investigación, además de que trabajó con un solo tiempo de agitación (30 min) para sus tratamientos. Por lo cual, los resultados obtenidos en la presente investigación en comparación con la investigación de Berrospi (2019) ha demostrado que el factor adsorbente y tiempo de agitación son determinantes en la adsorción de iones de Pb^{2+} y Hg^{2+} . Por otra parte, la velocidad de agitación también fue un factor influyente en la adsorción de iones de Pb^{2+} y Hg^{2+} , puesto que trabajar con una velocidad de agitación de 400 rpm en la presente investigación se obtuvo una mayor adsorción de iones de Pb^{2+} y Hg^{2+} en comparación con la investigación de Berrospi (2019) quien trabajó con una velocidad de agitación de 160 rpm, obteniendo valores de adsorción y remoción menores a los obtenidos en la presente investigación. Esto se puede atribuir al aumento de la movilidad del sistema y la disminución de la resistencia de película para transferencia de masa que rodea la partícula adsorbente, tal como lo ha demostrado Ruiz (2018), Todo ello ocurre por qué, la velocidad de agitación de 400 rpm se encuentra en el rango promedio de las tasas de agitación.

El aumento de la cantidad de dolomita como adsorbente en la muestra de agua ácida de 500 mL intensifica la eficiencia de adsorción de los iones metálicos (Ca^{2+} y Mg^{2+}), esto se debe a que la partícula de la dolomita tiene una superficie rugosa y porosa, permitiendo tener una mayor área superficial de sitios activos en la parte superficial del adsorbente, por lo que aumenta

significativamente la adsorción de iones de Pb^{2+} y Hg^{2+} (Qiu et al., 2015; Shah et al., 2019), El adsorbente de dolomita, está compuesto principalmente de MgCO_3 y CaCO_3 y está cargado positivamente, por lo que atrae a los iones con cargas negativas, esto aumenta la posibilidad de contacto resultante en quimisorción de iones de Pb^{2+} y Hg^{2+} , posibilitando a una mayor adsorción por reacciones de intercambio iónico (Ca^{2+} y Mg^{2+}), todo ello, se da gracias a la atracción electrostática y la formación de complejos (Yamkate et al., 2017; Algoufi et al., 2017 & Cai et al., 2021).

Así mismo, se observó el potencial de hidrogeno concentrado en la muestra 500mL, durante el proceso experimental, se incrementó de un pH 3 a un pH 7. Esto se atribuye a la disolución de los componentes de la dolomita, formando carbonatos libres y liberación de iones de calcio (Ca^{2+}) e iones de magnesio (Mg^{2+}), formando hidróxidos (Ayoub et al., 2019; Shah et al., 2019). Presentando de esta forma, una mayor capacidad de neutralización de iones de Pb^{2+} y Hg^{2+} que precipitan como carbonatos cuando el pH asciende y forman los complejos de hidroxilos, esto nos indica que el incremento del pH, de ácido a alcalino conduce a la reducción eficiente de iones de plomo y mercurio (Berrospi, 2019; Shah et al., 2019), lo que sugiere que los iones metálicos superan a los iones de hidrogeno en condiciones ácidas y se adsorben en el adsorbente (Imen et al., 2019) de igual forma esto se contrasta con las investigaciones de (Pehlivan et al., 2009; Cai et al., 2021) quienes afirman que la dolomita muestra un mejor rendimiento de adsorción de metales pesados en condiciones de pH ácido en un rango de 3.0 – 6.0.

Por lo consiguiente, cabe señalar que la dolomita es eficiente en la adsorción de otros metales como: Cd^{2+} , Pb^{2+} , Ag, As, B, Ba, Co, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, Sn, Sr, Ti y V (Calugaru et al., 2016; Sdiri, 2018). Sin embargo, la dolomita no afecta el medio ambiente y es muy eficaz en la adsorción de los iones metálicos presentes en aguas contaminadas, en aguas residuales y entre otras fuentes contaminados por metales pesados (Shah et al., 2019; Calugaru et al., 2021).

Conclusión

De acuerdo a las pruebas experimentales, la dolomita natural es eficiente en la adsorción de Pb^{2+} y Hg^{2+} , cuyas concentraciones iniciales de 227 mg/L y 2.9 mg/L con un pH 3, fueron reducidas a 0.1637 mg/L y 0.0263 mg/L con pH 7. Alcanzando una remoción máxima del 99.93 % de Pb^{2+} y 99.09 % de Hg^{2+} con un adsorbente óptimo de 10 g y tiempos óptimos de 30 min y 60 min, respectivamente. Los valores obtenidos son significados, tal como lo demuestra el análisis

de varianza ANOVA y la prueba Tukey. Por lo tanto, la dolomita natural tiene un gran potencial para neutralización, adsorción, precipitación y se presenta como una alternativa económica para la remoción de los iones metálicos de Pb^{2+} y Hg^{2+} presentes en aguas contaminadas con metales pesados, mejorando la calidad del agua y la no afectación al ambiente.

Referencias

- Aduvire, O. (2018). Dimensionado de sistemas de tratamiento de aguas ácidas de mina. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5, 1-11.
- Algoufi, Y. T., Kabir, G., & Hameed, B. H. (2017). Synthesis of glycerol carbonate from biodiesel by-product glycerol over calcined dolomite. *Journal of the Taiwan institute of chemical engineers*, 70, 179-187. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.10.039>
- ANA. (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA)*. Lima-Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- Ayala, H. J., Cabrera, M., Cadena, A. J., Cataño, C., & Contreras, S. M. (2019). *Documento de investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano*. IPBES, Colombia.
- Aycachi, C. (2019). *Contaminación del agua por las actividades minero metalúrgicas en el Centro Minero la Rinconada*. Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú.
- Ayoub, G. M., Kalinian, H., & Zayyat, R. (2019). Efficient phosphate removal from contaminated water using functional raw dolomite powder. *SN Applied Sciences*, 1(7), 1-15. doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-019-0833-5>
- Basilio, J. C. (2015). *Influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb^{2+}) utilizando dolomita como adsorbente*. Tesis de grado, Tingo Maria - Peru.
- Berrospi, L. Y. (2019). *Remoción de metales pesados presentes en las aguas ácidas de la laguna Yanamate mediante la aplicación de la dolomita como agente remediante a escala experimental*. Tesis de grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco-Perú.
- Cai, W. K., Liu, J. H., Zhou, C. H., Keeling, J., & Glasmacher, U. A. (2021). Structure, genesis and resources efficiency of dolomite: New insights and remaining enigmas. *Chemical Geology*, 573(5), 120191.

- Calugaru, I. L., Genty, T., & Neculita, C. M. (2021). Treatment of manganese, in the presence or absence of iron, in acid and neutral mine drainage using raw vs half-calcined dolomite. *Minerals Engineering*, *160*, 106666.
- Calugaru, I. L., Neculita, C. M., Genty, T., Bussi re, B., & Potvin, R. (2016). Performance of thermally activated dolomite for the treatment of Ni and Zn in contaminated neutral drainage. *Journal of hazardous materials*, *310*, 48-55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.069>
- Chappuis, M. (2019). *Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú*. CEPAL, Perú.
- Cuentas, M. S. (2009). *Evaluación cualitativa del impacto ambiental generado por la actividad minera en La Rinconada Puno*. Tesis de maestría, Universidad de Piura, Piura-Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11042/1482>
- Degs, Y., Barghouthi, M., Issa, A., Khraisheh, M., & Walker, G. (2006). Sorption of Zn(II), Pb(II), and Co(II) using natural sorbents: Equilibrium and kinetic studies. *Water research*, *40*(14), 2645-2658. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.05.018>
- Diwan, V., Sar, S. K., Biswas, S., & Lalwani, R. (2020). Adsorptive extraction of uranium(VI) from aqueous phase by dolomite. *Groundwater for sustainable Development*, *11*, 100424. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100424>
- DP. (2021). *En defensa de las personas expuestas a metales pesados, metaloides y otras sustancias químicas: Los impactos de la contaminación ambiental*. Lima-Perú: Defensoría del Pueblo.
- Fuerte, J. K., & Ramírez, E. R. (2021). *Pasivos ambientales mineros generados por actividades extractivas en Colombia: Marco jurídico, conflictos socioambientales y lineamientos para una gestión sostenible*. Tesis de maestría, Universidad Santo Tomas, Colombia.
- Goyzueta, G., & Trigos, C. (2009). Riesgos de salud pública en el centro poblado minero artesanal la Rinconada (5200 msnm). *Redalyc*, *26*(1), 41-44.
- Gutiérrez, H., & Vara de la, R. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos* (3rd ed. ed.). México.
- Haldar, S. K., & Ti sljar, J. (2014). Introduction to mineralogy and petrology. *Elsevier*, 1-37. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408133-8.00001-8>
- Imen, Z., Hassani, A. H., & Borghaee, S. M. (2019). Comparison of the effectiveness of natural dolomite and modified dolomite in the removal of heavy metals from aqueous solutions. *J Adv Environ Health Res*, *7*(1), 61-74.

- INEI. (2019). *Perú anuario de estadísticas ambientales*. Instituto Nacional de Estadística Informática, Lima-Perú. Obtenido de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1704/libro.pdf
- Mamani, W. (2018). *Caracterización y tratamiento de efluentes de aguas ácidas en la mina la Rinconada – Puno*. Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/11993>
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. *Paideia XXI*, 11(1), 141-154. doi:<https://doi.org/10.31381/paideia%20xxi.v11i1.3622>
- Mercado, N. O. (2021). *Caracterización físico química de materiales tóxicos en el canal gavilán de oro y en el efluente de la laguna Sillacunca en Ananea - Puno*. Grado de magíster, Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/17679>
- Mina, O. R. (2017). *Propuesta de mitigación de la contaminación por el uso minero del mercurio de la laguna La Rinconada*. Tesis de grado, Tacna-Perú.
- MINAM. (2017). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM-Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. Ministerio del Ambiente, Lima-Perú.
- MINAM. (2021). *Informe nacional sobre el estado del ambiente 2014-2019*. Perú: ©Ministerio del Ambiente. Obtenido de https://sinia.minam.gob.pe/inea/wp-content/uploads/2021/07/INEA-2014-2019_red.pdf
- MINSA. (2018). *Lineamientos de Política Sectorial para la Atención Integral de la Salud de las Personas Expuestas a Metales Pesados, Metaloides y otras Sustancias Químicas*. Lima: Ministerio de Salud.
- Ocola, J. J., & Laqui, W. F. (Jueves de Agosto de 2017). *Fuentes contaminantes en la cuenca del lago Titicaca: Un aporte al conocimiento de las causas que amenazan la calidad del agua del maravilloso lago Titicaca* (1° Edi. ed.). Lima-Perú: ANA.
- Pehlivan, E., Özkan, A. M., Dinc, S., & Parlayici, S. (2009). Adsorption of Cu²⁺ and Pb²⁺ ion on dolomite powder. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1-3), 1044-1049.
- Qiu, G., Xie, Q., Liu, H., Chen, T., Xie, J., & Li, H. (2015). Removal of Cu(II) from aqueous solutions using dolomite-palygorskite clay: Performance and mechanisms. *Applied clay science*, 118, 107-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.008>
- Ribeiro, C., Bisinella, F., Espinoza, F. R., Módenes, A. N., Adeodato, M. G., Alexander, D., & Borba, C. E. (2018). A comprehensive evaluation of heavy metals removal from

- battery industry wastewaters by applying bioresidue, mineral and commercial adsorbent materials. *Journal of Materials Science*, 53(11), 7976–7995. doi:10.1007/s10853-018-2150-6
- Rice, E. W., Baird, R. B., & Eaton, A. D. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd Edition ed.). (A. W. American Public Health Association, Ed.) YaBeSH.ir.
- Romero, A. A., Flores, S. L., & Arévalo, W. (2010). Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita. *Redalyc*, 13(1), 85-90.
- Ruiz, E., Natalia, M., Saralegui, A., Caracciolo, N., & Boeykens, S. (2018). Remoción de iones metálicos de mezclas binarias usando dolomita. *KnE Engineering*, 3(1), 679–689. doi:10.18502/barril.v3i1.1471
- Ruiz, J. A. (2018). *Tratamiento de aguas ácidas con dolomita para disminuir la concentración de Cu y Zn en efluentes de la Planta Concentradora Victoria en la Provincia de Yauli – La Oroya*. Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo-Perú.
- Sdiri, A. (2018). Physicochemical characterization of natural dolomite for efficient removal of lead and cadmium in aqueous systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(6), 2034-2041.
- Shah, K. H., Ayub, M., Fahad, M., Bilal, M., Zafar, B. A., & Hussain, Z. (2019). Natural dolomite as a low-cost adsorbent for efficient removal of As(III) from aqueous solutions. *Materials Research Express*, 6(8), 085535.
- Yamkate, N., Chotpantararat, S., & Sutthirat, C. (2017). Removal of d^{2+} , Pb^{2+} , and Zn^{2+} from contaminated water using dolomite powder. *Human and Ecological Risk Assessment*, 23(5), 1178-1192. doi:10.1080/10807039.2017.1309264