



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCVELICA



EFICIENCIA DE BIOADSORCIÓN DE VEGETALES SILVESTRES

SOMETIDOS A METALES Y METALOIDES CONTENIDOS
EN AGUA SUPERFICIAL

Luz Acharte
Amadeo Enríquez
Luis Quispealaya
Jeny Asto

DOI: 10.35622/inudi.b.120

Eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres sometidos a metales y metaloides contenidos en agua superficial

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.120>

Luz Acharte

<https://orcid.org/0000-0001-7717-6408>
Universidad Nacional de Huancavelica
luz.acharte@unh.edu.pe

Amadeo Enríquez

<https://orcid.org/0000-0002-8241-0091>
Universidad Nacional de Huancavelica
amadeo.enriquez@unh.edu.pe

Luis Quispealaya

<https://orcid.org/0000-0001-5770-2538>
Universidad Nacional de Huancavelica
luis.quispealaya@unh.edu.pe

Jeny Asto

<https://orcid.org/0000-0003-4176-6558>
Universidad Nacional de Huancavelica
jeny.asto@unh.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCABELICA



Eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres sometidos a metales y metaloides contenidos en agua superficial

Autores:

Luz Marina Acharte Lume
Amadeo Enríquez Donaires
Luis Quispealaya Armas
Jeny Maribel Asto Gonzales

Primera edición digital
Publicado en Puno, noviembre del 2023

ISBN: 978-612-5130-10-5 (PDF)
Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2023-11576

Registro de Proyecto Editorial: N° 32101012400019
DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.120>
Categoría: Libro de resultado de investigación científica

CONSEJO EDITORIAL

Director: Lic. Sergio Antonio Flores Vargas
Editor Jefe: Eddy Rodrigo Gonzales Huaman

Editores:

Dra. Bethzabe Cotrado Mendoza / Dra. Manuela Daishy Casa Coila / Dr. Edgar Estanislao Mancha Pineda / Dra. Luz Wilfreda Cusi Zamata / MSc. Rebeca Alanoca Gutiérrez / Dr. Wilson Gregorio Sucari Turpo / Dra. Yolanda Lujano Ortega / Dra. Sheyla Lenna Cervantes Alagón / Dra. Dometila Mamani Jilaja / Dr. Peregrino Melinton Lopez Paz / Dra. Nina Eleonor Vizcarra Herles / Mg. Lourdes Antonieta López Cueva / Dr. Carlos Alfredo Castro Quispe / Dr. Edgar Darío Callohuanca Avalos / Dra. Diana Águeda Vargas Velásquez / MSc. Yésica Dominga Díaz Vilcanqui / Dra. Tania Carola Padilla Cáceres / Patty Samanta Aza Suaña / Lic. Leydi Gabriela Ramos Ramos.

Edición de:

Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C.

Urb. Ciudad Jardín Mz. B3 Lt. 2, Puno - Perú

RUC: 20608044818

Email: editorial@inudi.edu.pe / info@inudi.edu.pe

Teléfono: +51 973668341

Sitio web: <https://editorial.inudi.edu.pe>

Universidad Nacional de Huancavelica
Av. Agricultura N° 319 - 321. Sector - Paturpampa,
Huancavelica - Perú

RUC: 20168014962

Email: tramitedocumentario@unh.edu.pe

Teléfono: 067- 451551

Sitio web: <https://www.unh.edu.pe/>

Financiamiento: Universidad Nacional de Huancavelica

Publicado en Perú / Posted in Peru



*Esta obra está bajo una licencia CC BY-NC-SA
4.0 DEED Atribución-NoComercial-
CompartirIgual 4.0 Internacional*

Evaluación de contenido: Esta obra ha sido evaluada por pares doble ciego, aprobada por el Consejo Editorial del Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú y editada bajo procedimientos que garantizan su normalización.

Los autores son moral y legalmente responsables de la información expresada en este libro, así como del respeto a los derechos de autor; por lo tanto, no comprometen en ningún sentido a la editorial.

Declaración conflictos de interés:

Los autores de esta publicación declaran la inexistencia de conflictos de interés de cualquier índole con instituciones o asociaciones comerciales.

Financiamiento:

Publicación financiada por la Universidad Nacional de Huancavelica como resultado de un concurso promovido por el Vicerrectorado de Investigación, durante el año fiscal 2023.

Información adicional:

Este libro es resultado de una investigación original (inérita) promovida por el Fondo de Apoyo Económico a los Docentes Investigadores (FAEDI) de la Universidad Nacional de Huancavelica.



Director Ejecutivo

Dr. Wilson Gregorio Sucari Turpo

Director Académico

Lic. Sergio Antonio Flores Vargas

Director de Investigación

Dr. Pedro Carlos Huayanca Medina

Director de Innovación y Transferencia Tecnológica

Ing. Erika Romero Santisteban

Revisores Pares Externos

Se encuentra en el siguiente enlace:

<https://editorial.inudi.edu.pe/index.php/editorialinudi/about/editorialTeam>



EDITORIAL INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INNOVACIÓN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA INUDI PERÚ S.A.C.

— INDEXADA EN DOAB, DIALNET, WORLDCAT, JISC, REDIB, SCILIT, OPENDOAR, SHERPA/ROME—
CÓD. DE SELLO EDITORIAL.: 978-612-48813

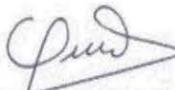
DECLARACIÓN JURADA

Nosotros, los abajo firmantes, en calidad de autores de la investigación científica titulada "**Eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres sometidos a metales y metaloides contenidos en agua superficial**", que será publicada en la Editorial Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, hacemos constar mediante la presente declaración jurada lo siguiente:

- Declaramos que el libro es el resultado de una investigación científica realizada bajo nuestra dirección y supervisión, y que todo el contenido del mismo es fruto de nuestro trabajo original y creativo.
- Afirmamos que todas las ideas, teorías, conceptos, metodologías, resultados, conclusiones y cualquier otro contenido expresado en el libro son producto de nuestra autoría y están respaldados por los hallazgos obtenidos en la investigación, así como por la rigurosidad científica empleada en el proceso.
- Dejamos constancia que no hemos incurrido en plagio, es decir, no hemos copiado ni utilizado sin atribución adecuada ninguna obra, trabajo o investigación de terceros que pudiera comprometer la originalidad de los contenidos aquí presentados.
- Garantizamos que cualquier cita, referencia o mención a trabajos, publicaciones o aportes de otros autores ha sido adecuadamente reconocida y citada en el texto y en la bibliografía del libro, siguiendo las normas y prácticas aceptadas en el ámbito académico y científico.
- Nos comprometemos a asumir la responsabilidad de cualquier controversia que pudiera surgir relacionada con la originalidad del contenido presentado en este libro y a colaborar con el Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú para resolver cualquier inquietud al respecto.
- Autorizamos al Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú a publicar y distribuir el libro bajo los términos y condiciones que se acuerden, manteniendo siempre los créditos y reconocimientos a nuestra autoría.
- Reconocemos que cualquier incumplimiento de estas declaraciones o de los principios éticos y académicos en la elaboración de este libro puede acarrear consecuencias legales y afectar nuestra reputación como investigadores.

Lircay 13 de noviembre del 2023


Luis Mariano Alvarado Luján
DNI: 21836979


Luis Quispe Alaya Armas
D.N.I. 20099116


Amadeo Enriquez D.
D.N.I. 20096647


Jenny M. Asto Gonzales
DNI: 47791060

Contribución de autores

Nombre del autor	Rol	Descripción
Luz Marina Acharte Lume (Autor Principal)	Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, supervisión, administración del proyecto.	Lideró el equipo de investigación, definió los objetivos del estudio, diseñó el método de investigación, recopiló los datos, analizó los resultados y redactó el manuscrito.
Amadeo Enríquez Donaires (Coautor)	Conceptualización, metodología, recursos, escritura - borrador original.	Proporcionó los materiales de laboratorio necesarios para las pruebas, diseñó el método de la investigación, contribuyó en la redacción y preparación del manuscrito.
Luis Quispealaya Armas (Coautor)	Conceptualización, Escritura - Borrador original, Escritura - Revisión y edición, investigación	Contribución y generación de ideas inéditas, lógicas encuadradas a las variables del tema en consideración; toma de datos en campo; revisiones bibliográficas y adaptación de consolidados del marco teórico, generación de liderazgo inter y multidisciplinario con inquietud de desarrollo de bienestar a la suma de conocimientos.
Jeny Maribel Asto Gonzales (Coautor)	Análisis formal, investigación, recursos, visualización.	Participó en los análisis estadísticos y las pruebas diferenciales de las hipótesis, proporcionó los materiales necesarios para la síntesis de datos, generó la presentación de tablas y figuras.

EDITORIAL INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INNOVACIÓN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA INUDI PERÚ S.A.C.

— INDEXADA EN DOAB, DIALNET, WORLDCAT, JISC, REDIB, SCILIT, OPENDOAR, SHERPA/ROMEO—
CÓD. DE SELLO EDITORIAL.: 978-612-48813

CONSTANCIA

de revisión por el Comité de Ética

Yo, **Lic. Leydi Gabriela Ramos Ramos** en calidad de Presidente del Comité de Ética del Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, hago constar que el Comité de Ética de Publicación de Libros resultado de investigación científica, ha evaluado el proceso de publicación del libro titulado **"Eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres sometidos a metales y metaloides contenidos en agua superficial"**, con ISBN **978-612-5130-10-5** presentado por los autores **Luz Marina Acharte Lume, Amadeo Enríquez Donaires, Luis Quispealaya Armas, Jeny Maribel Asto Gonzales** y ha determinado que dicho proceso cumple con los principios éticos y las normas establecidas para la publicación de investigaciones científicas.

Del mismo modo, el informe de similitud generado por el software Turnitin arrojó los siguientes resultados:

El porcentaje total de similitud del libro es de **18%** el cual está dentro de los límites establecidos por las políticas de originalidad de nuestra institución para trabajos de investigación.

Se expide la presente para fines que los autores crean por conveniente.

Dado en Puno – Perú, 28/12/2023 15:20:59



Firmado digitalmente por RAMOS RAMOS
LEYDI GABRIELA FIR 70940654 hard
Fecha: 2023.12.28 15:49:42 -05'00'
Versión de Adobe Acrobat Reader:
2023.006.20380

Lic. LEYDI GABRIELA RAMOS RAMOS
Presidente del Comité de Ética

Agradecimientos

Es importante reconocer y expresar gratitud a las instituciones académicas y a las personas que han apoyado el proceso de investigación, redacción, edición y publicación de este trabajo. En este caso, la Universidad Nacional de Huancavelica y su Vicerrectoría de Investigación merecen un agradecimiento especial por su contribución a la formación y capacitación en estas áreas. También se agradece al doctor Wilson Gregorio Sucari Turpo por su valiosa contribución en la capacitación, revisión y aprobación del texto.

Contenido

SINOPSIS	14
ABSTRACT	15
PRÓLOGO	16
INTRODUCCIÓN	18

CAPÍTULO I

BIOADSORBENTES DE METALES Y METALOIDE EN AGUA

1.1. Bioadsorbentes	22
1.2 Contaminantes químicos	32
1.3 Metales pesados	37
1.3.1 Metales pesados en plantas.....	38
1.4 Especies vegetales altoandinas	40
1.4.1. Taraxacum officinale (diente de león)	40
1.4.2 Baccharis salicifolia (chilca)	42
1.4.3 Opuntia ficus-indica (cáscara de tuna).....	43
1.5 Biosorción	44
1.6 Bioadsorción	45
1.6.1 Metales de interés en el proceso de bioadsorción	47
1.7 Aguas superficiales	58
1.8 Espectrofotómetro de absorción atómica de flama.....	60

CAPÍTULO II

EFICIENCIA DE BIOADSORCIÓN DE VEGETALES SILVESTRES SOMETIDOS A METALES Y METALOIDE CONTENIDO EN AGUA SUPERFICIAL

3.1 Razones de la investigación	63
3.2 Objetivo de la investigación	66
3.3 Método, diseño y tipo de investigación	67
3.3.1 Método de investigación	67
3.3.2 Diseño de investigación.....	67
3.3.3 Tipo de investigación.....	68
3.3.4 Procedimiento metodológico.....	68

3.3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	78
3.4. Consideraciones éticas	79
3.5. Resultados de la investigación.....	80
3.5.1 Resultado de parámetro medico	80
3.5.2 Resultado del grupo de control N° 1: Aguas de efluentes	81
3.5.3 Resultado del grupo de control N° 2: Vegetales bioadsorbentes	85
3.5.4 Resultado del grupo experimental	88
3.5.5 Resultado de eficiencia en el agua y vegetales.....	93
3.6. Discusión de resultados de investigación.....	96

CAPÍTULO III

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFLEXIONES

4.1. Conclusiones	102
4.2. Recomendaciones	103
4.3. Reflexiones.....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
ANEXOS	119

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación taxonómica de <i>Taraxacum officinale</i>	41
Tabla 2 Clasificación taxonómica de <i>Baccharis salicifolia</i>	42
Tabla 3 Clasificación taxonómica de <i>Opuntia ficus-indica</i>	44
Tabla 4 Factores metabólicos asociados con la ingestión de arsénico, cadmio y plomo	56
Tabla 5 Ubicación de los puntos de muestreo de aguas y plantas silvestres.....	69
Tabla 6 Medición de los parámetros pH, conductividad, temperatura y demanda de oxígeno.....	72
Tabla 7 Equipos utilizados en la preparación de las muestras.....	78
Tabla 8 Materiales utilizados en la preparación de muestras	79
Tabla 9 Reactivos usados para la preparación de muestras	79
Tabla 10 Evaluación de parámetros fisicoquímicos de muestras de agua in situ.	80
Tabla 11 Límites Máximos Permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.....	81
Tabla 12 Estándares ambiental ECA para agua, Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.	81
Tabla 13 Resultados de análisis de As en agua procedente de bocamina Ocopa y riachuelo San pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción.....	82
Tabla 14 Resultados de análisis de Cd en agua procedente de bocamina Ocopa y riachuelo San pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción.....	83
Tabla 15 Resultados de análisis de Pb en agua procedente de bocamina Ocopa y riachuelo San pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción.....	84
Tabla 16 Resultados de análisis de As en vegetales silvestres (chila, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción	85
Tabla 17 Resultados de análisis de Cd en vegetales silvestres (chila, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción	86
Tabla 18 Resultados de análisis de Pb en vegetales silvestres (chila, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción	87
Tabla 19 Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en agua de bocamina Ocopa.....	89

Tabla 20 Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en vegetales silvestres bioadsorbentes chilca, diente de león y cáscara de tuna, bocamina Ocopa	90
Tabla 21 Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en agua del riachuelo San Pedro de Mimosa	91
Tabla 22 Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en vegetales silvestres bioadsorbentes chilca, diente de león y cáscara de tuna del riachuelo San Pedro de Mimosa	92
Tabla 23 Resultados de eficiencia de adsorción de los vegetales chilca, diente de león, cáscara de tuna en muestras de aguas de bocatoma Ocopa	93
Tabla 24 Resultados de eficiencia en adsorción de los vegetales chilca, diente de león, cáscara de tuna después del proceso de adsorción en muestras de agua subterránea de bocamina Ocopa.....	94
Tabla 25 Resultados de eficiencia en adsorción de los vegetales chilca, diente de león, cáscara de tuna en muestras de agua del riachuelo San Pedro de Mimosa.....	95
Tabla 26 Resultados de eficiencia en adsorción de los vegetales chilca, diente de león, cáscara de tuna después del proceso de adsorción en agua del, riachuelo San Pedro de Mimosa	96

Índice de figuras

Figura 1 <i>Diente de león</i>	42
Figura 2 <i>Chilca (Baccharis salicifolia)</i>	43
Figura 3 <i>Tuna (Opuntia ficus-indica)</i>	44
Figura 4 <i>Proceso de adsorción</i>	47
Figura 5 <i>Órganos y sistemas del organismo afectados por la toxicidad de plomo, según la OMS, 2016</i>	50
Figura 6 <i>Distribución del cadmio en la naturaleza</i>	52
Figura 7 <i>Factores metabólicos asociados con la ingestión de arsénico, cadmio y plomo</i>	56
Figura 8 <i>Recolección de muestra de aguas superficial del Riachuelo del anexo San Pedro de Mimoso Ccochaccasa</i>	70
Figura 9 <i>Recolección de muestra de agua subterránea de bocamina Ocopa- Lircay</i>	71
Figura 10 <i>Medición de los parámetros pH, conductividad, temperatura y demanda de oxígeno</i>	72
Figura 11 <i>Proceso de digestión de agua obtenidas de riachuelo y bocamina antes del proceso de bioadsorción</i>	73
Figura 12 <i>Proceso de selección, secado, molienda, de muestras de chilca, diente de león y cáscara de tuna</i>	74
Figura 13 <i>Incineración de muestras de chilca, diente de león y cáscara de tuna</i>	75
Figura 14 <i>Proceso digestión y filtrado de muestras de chilca, diente de león y cáscara de tuna</i>	76
Figura 15 <i>Análisis con el equipo espectrómetro de absorción atómica</i>	76
Figura 16 <i>Cabina bioadsorbente y muestras de agua del proceso de bioadsorción con las plantas chilca, diente de león y cáscara de tuna</i>	77
Figura 17 <i>Contenido de As en agua procedente de bocamina de Ocopa y riachuelo San Pedro de Mimoso antes del proceso de bioadsorción</i>	82
Figura 18 <i>Contenido de Cd en agua procedente de bocamina de Ocopa y riachuelo San Pedro de Mimoso antes del proceso de bioadsorción</i>	83
Figura 19 <i>Contenido de Pb en agua procedente de bocamina de Ocopa y riachuelo San Pedro de</i>	84

Figura 20 <i>Contenido de As en vegetales silvestres (chilca, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción.....</i>	86
Figura 21 <i>Contenido de Cd en vegetales silvestres (chilca, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción.....</i>	87
Figura 22 <i>Contenido de Pb en vegetales silvestres (chilca, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción.....</i>	88
Figura 23 <i>Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en agua de bocamina Ocopa.....</i>	89
Figura 24 <i>Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en vegetales silvestres bioadsorbentes chilca, diente de león y cáscara de tuna, bocamina Ocopa.</i>	90
Figura 25 <i>Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en agua del riachuelo San Pedro de Mimosa</i>	91
Figura 26 <i>Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en vegetales silvestres bioadsorbentes chilca, diente de león y cáscara de tuna del riachuelo San Pedro de Mimosa</i>	92

SINOPSIS

La contaminación de aguas superficiales procedentes de cabeceras de cuenca de zonas mineras con metales y metaloides, es un problema ambiental que debe ser abordado, a través de la investigación científica, para minimizar sus impactos y sus efectos. El objetivo de este estudio fue determinar y evaluar la eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres en la eliminación de metales y metaloides presentes en agua superficial proveniente de cabeceras de cuencas del centro poblado de San Pedro de Mimosa Ccochaccasa en la provincia de Angaraes, Huancavelica - Perú. Esto implica utilizar plantas silvestres como agentes de absorción para reducir la concentración de contaminantes en el agua, en este caso, metales y metaloides provenientes de la actividad minera. El estudio se llevó a cabo de manera experimental, prospectiva, transversal y analítica, lo que corresponde al nivel de investigación aplicada. El muestreo se realizó de manera intencional a criterio de los investigadores. La eficiencia de adsorción para la planta chilca fue 16.28% de As, 28.60% de Cd y 27.31% de Pb, para diente de león 28.70% de As, 79.33% de Cd y 28.75% de Pb y a cáscara de tuna 48.39% en As, 46.38% de Cd y 45.23% de Pb. El resultado es significativo, el diente de león con 45.59% supera a la cáscara de tuna en 39.44% y chilca en 33.44%. Se llevó a cabo un análisis estadístico con método Tukey y se determinó que no existe una diferencia significativa en las eficiencias de bioadsorción entre las plantas. Los resultados podrían ser aprovechados para diseñar sistemas de tratamiento de aguas basados en la bioadsorción utilizando estas plantas, ofreciendo una alternativa sostenible y económica a los métodos convencionales de remoción de contaminantes.

Palabras clave: aguas superficiales, bioadsorción, metales, metaloides, remoción de contaminantes.

ABSTRACT

The pollution of surface waters from headwaters of mining areas with metals and metalloids is an environmental problem that needs addressing through scientific research to minimize its impacts and effects. The objective of this study was to determine and assess the bioadsorption efficiency of wild plants in removing metals and metalloids present in superficial water from the headwaters of San Pedro de Mimosa Ccochaccasa in the province of Angaraes, Huancavelica - Peru. This involves using wild plants as absorption agents to decrease the concentration of contaminants in water, specifically metals and metalloids from mining activities. The study was conducted experimentally, prospectively, transversally, and analytically, corresponding to the level of applied research. Sampling was intentionally carried out at the researchers' discretion. The adsorption efficiency for the chilca plant was 16.28% for As, 28.60% for Cd, and 27.31% for Pb; for dandelion, it was 28.70% for As, 79.33% for Cd, and 28.75% for Pb; and for prickly pear peel, it was 48.39% for As, 46.38% for Cd, and 45.23% for Pb. The result is significant: dandelion with 45.59% surpasses prickly pear peel by 39.44% and chilca by 33.44%. A statistical analysis using the Tukey method was conducted, determining no significant difference in the bioadsorption efficiencies among the plants. The findings could be utilized to design water treatment systems based on bioadsorption using these plants, providing a sustainable and economical alternative to conventional methods of contaminant removal.

Keywords: surface waters, bioadsorption, metals, metalloids, contaminant removal.

PRÓLOGO

El trabajo de investigación es un ejemplo de un estudio aplicado que aborda una problemática ambiental importante: la mitigación de contaminantes metálicos y metaloides en el agua utilizada para riego y bebida de animales. Este tipo de investigación es crucial para encontrar soluciones sostenibles a los desafíos ambientales y de salud pública.

El equipo interdisciplinario compuesto por un ingeniero químico e ingenieros de minas es un enfoque valioso, ya que combina la experiencia en química y minería para abordar la problemática de los contaminantes en el agua. La elección de plantas silvestres y desechos locales como bioadsorbentes es una estrategia eficiente y respetuosa con el medio ambiente, ya que aprovecha los recursos naturales disponibles en la región.

Los resultados del estudio, indican que las plantas chilca, diente de león y cáscara de tuna son efectivas como bioadsorbentes, tienen implicaciones prácticas significativas para la gestión de la contaminación. Pueden proporcionar una solución económica y sostenible para reducir la presencia de metales y metaloides en el agua utilizada para riego y consumo animal.

En general, este tipo de investigación demuestra la importancia de la colaboración interdisciplinaria y la aplicación de conocimientos científicos para abordar problemas ambientales y encontrar soluciones que beneficien a la sociedad y al medio ambiente.

Es alentador ver que los investigadores están adoptando estrategias para abordar la contaminación de fuentes hídricas naturales en su región mediante el uso de recursos vegetales silvestres locales. Esta aproximación, conocida como bioadsorbentes, implica el uso de plantas y sus propiedades naturales para eliminar, degradar o absorber contaminantes presentes en el agua superficial.

La bioadsorción es una alternativa prometedora para abordar la contaminación del agua, ya que puede ser una solución de bajo costo y sostenible. Las plantas

tienen la capacidad de absorber y acumular contaminantes en sus tejidos, lo que ayuda a limpiar el agua de manera efectiva. Además, este enfoque puede contribuir a prevenir la propagación de enfermedades relacionadas con la contaminación del agua y proteger la salud de las comunidades locales y la vida silvestre

Es esencial que los investigadores continúen desarrollando y perfeccionando estas tecnologías remediativas basadas en vegetación silvestre para adaptarlas a las necesidades específicas de su región. Esto podría incluir la identificación de plantas nativas con propiedades de limpieza de agua, la optimización de las condiciones de crecimiento y la supervisión de los resultados a lo largo del tiempo.

Además, es importante que se realicen esfuerzos para concientizar a la comunidad sobre la importancia de la conservación de fuentes hídricas naturales y la adopción de prácticas de gestión ambiental sostenibles. La combinación de tecnologías remediativas y cambios en el comportamiento humano puede tener un impacto significativo en la preservación de estos recursos vitales y la protección de la salud pública.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, el cambio climático, las sequías severas, el crecimiento demográfico, la urbanización, las prácticas agrícolas intensivas y extensivas, la creciente demanda y la mala gestión los han dejado sin acceso a agua potable (Blanco et al., 2023). Estos factores convierten el agua limpia en agua residual contaminándola y envenenándola con metales pesados, durante las últimas décadas el recurso de agua es cada vez más escaso en todo el mundo (Singh et al., 2020; Salehi, 2022). Las condiciones del ecosistema están influenciadas por la calidad del agua en la naturaleza (García Pérez, 2020). Los seres vivos dependen del agua, tanto en cantidad como en calidad, para sobrevivir, sin embargo, el consumo directo de agua proveniente de fuentes naturales superficiales es inseguro en zonas mineras, por lo que es necesario conocer su comportamiento y respuesta ante diversas intervenciones antropogénicas (Marín et al., 2018).

En la actividad minera, liberan una gran cantidad de metales pesados tóxicos al agua y suelo, dañando la calidad del agua (Moreno-Rivas et al., 2018). En la agricultura los metales tóxicos se descargan al medio ambiente en diferentes formas, como fertilizantes y pesticidas (Coelho et al., 2018). Los metales pesados en su naturaleza no biodegradable, se prolonga a través de transferencia bioacumulable (Boraah et al., 2022). Los metales pesados y los metaloides son contaminantes potencialmente mortales que generalmente se encuentran en las aguas residuales y pueden afectar la salud humana y el medio ambiente (Prasad et al., 2021; Belmer & Wright, 2020; Gupta et al., 2021).

Los metales tóxicos, como el Plomo (Pb), cuando son desechados incorrectamente en las aguas subterráneas y en la superficie del suelo, tienden a producir serios problemas ambientales, ya que presentan una difícil degradación, afectan los procesos de autolimpieza del medio ambiente y se bioacumulan en la cadena de los seres vivos, promoviendo toxicidad para los organismos vivos, dañando el sistema inmunológico, sistema nervioso, digestivo y respiratorio, sistema reproductivo; el cerebro, el hígado, los riñones (Awual, 2019; Sahmoune, 2019;

Lovaković, 2020; Coelho et al., 2018) el límite permisible de Pb es 0,05 mg/L (Pal et al., 2022). El arsénico (As) es un elemento ampliamente distribuido en el medio ambiente, con concentraciones en aguas naturales por debajo de 1-2 $\mu\text{g L}^{-1}$ (de la Salud, 2002). En países donde los minerales de arsénico se encuentran en los suelos, la concentración de arsénico en el agua subterránea puede ser de hasta 2000 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Lovaković, 2020). La minería y la fundición de metales no ferrosos como cobre, zinc, plomo, mercurio y oro son las fuentes antropogénicas más importantes de arsénico (Álvarez-Legorreta, 2009, Maia-Elkhoury et al., 2021). El cadmio (Cd) es un metal que se biomagnifica y representa una grave amenaza para los humanos y otros organismos donde la exposición al Cd causa insuficiencia renal (Maia-Elkhoury et al., 2021).

Rahman et al. (2022), encontró que la contaminación por metales pesados de las aguas superficiales en la Bahía de Bengala, clasifican en orden descendente de Pb (0,3 mg/L) > Cd (0,11 mg/L), analizado mediante espectroscopía de absorción atómica.

En la actualidad, la adsorción es una técnica de remediación de la contaminación del agua eficiente, económica y respetuosa con el medio ambiente que se utiliza para tratar con éxito los contaminantes (Prasad et al., 2021). Los adsorbentes más utilizados son carbón vegetal, arcillas, minerales arcillosos, zeolitas, carbón activado, aerogeles (James & Yadav, 2021) (Gupta et al., 2021) (Xu et al., 2016). Estudios recientes han destacado la biosorción como una técnica de tratamiento prometedora para la eliminación de metales tóxicos de efluentes líquidos, ya que este proceso utiliza materiales biológicos naturales con propiedades secuestrantes de metales, capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos tóxicos del rango de mg/L a $\mu\text{g/L}$ (Coelho et al., 2018). Esta tecnología de biosorción se ha generalizado porque es muy económica en el procesamiento de biosorbentes (Pal et al., 2022). En las últimas décadas, la tecnología de adsorción se ha considerado el proceso más económico y potente, la bioadsorción emplea biomateriales ecológicos, sostenibles y rentables, de remediar los metales pesados y los contaminantes emergentes del agua (Singh et al., 2020a). La

biosorción es un proceso fisicoquímico que incluye la adsorción y absorción de moléculas e iones, consistente en la transferencia selectiva de solutos (Pal et al., 2022). Los biosorbentes son materiales naturales ampliamente disponibles, incluidos subproductos industriales o agrícolas, que pueden usarse para capturar contaminantes debido a su bajo costo (Singh et al., 2020a). Las paredes celulares de los materiales bioadsorbentes, como algunos tipos de microorganismos, algas, hongos y plantas están compuestas principalmente por polisacáridos, proteínas y lípidos. Estos componentes contienen grupos funcionales, como carboxilos, hidroxilos, aminos y fosfatos que poseen la capacidad de formar enlaces químicos con iones metálicos, incluyendo metales pesados (Vizcaíno Mendoza & Fuentes Molina, 2015).

La investigación sobre la contaminación del agua en Huancavelica, relacionada con la minería, destaca la importancia de la bioadsorción mediante vegetales silvestres para mitigar la contaminación por metales y metaloides como apartado teórico en el Capítulo I. En el Capítulo II se abordó el procedimiento metodológico junto con los resultados y discusiones. Finalmente, en el Capítulo III se concluye que los resultados no solo benefician a las comunidades locales al prevenir enfermedades y mejorar la calidad de vida, sino que también promueven la conservación de la flora autóctona, esencial para la biodiversidad y la sostenibilidad ecológica. Estos hallazgos, relevantes a nivel global, ofrecen una solución sostenible y de bajo costo para la problemática, crucial para áreas similares afectadas por la minería, contribuyendo así a la preservación ambiental y la sostenibilidad a largo plazo.

CAPÍTULO I

BIOADSORBENTES DE METALES Y METALOIDE EN AGUA

1.1. Bioadsorbentes

Para Dey et al. (2022) el uso de materiales orgánicos naturales o modificados para eliminar contaminantes del agua o del aire a través de un proceso conocido como adsorción. Los bioadsorbentes son sustancias biodegradables y, a menudo, son subproductos o desechos de actividades agrícolas, industriales o biológicas. La adsorción implica la atracción y adhesión de los contaminantes a la superficie del bioadsorbente. Este proceso puede ser físico o químico, dependiendo de la naturaleza de los contaminantes y las características del material adsorbente. Los sitios activos en la superficie del bioadsorbente interactúan con los contaminantes, atrayéndolos y reteniéndolos.

La eficacia de un bioadsorbente se evalúa mediante varios parámetros, como la capacidad de adsorción, la cinética de adsorción, la selectividad y la regeneración del material. La capacidad de adsorción se refiere a la cantidad máxima de contaminantes que puede retener el bioadsorbente. La cinética de adsorción describe la velocidad a la que los contaminantes son eliminados. La selectividad se refiere a la preferencia del material por ciertos contaminantes sobre otros. La elección del bioadsorbente adecuado depende del tipo de contaminante a eliminar, las condiciones del medio ambiente y las propiedades del material adsorbente, como su disponibilidad, costo, estabilidad, capacidad de regeneración y capacidad de eliminación del contaminante (Duany-Timosthe, 2022).

Los bioadsorbentes tienen diversas aplicaciones en la remediación ambiental, incluyendo la purificación de aguas contaminadas con metales pesados, compuestos orgánicos, colorantes y otros contaminantes (Dusi et al., 2022). También se utilizan en la industria para el tratamiento de efluentes y en la agricultura para la mejora de la calidad del suelo.

Singh et al. (2020) refieren que los bioadsorbentes para biorremediación son procedimientos atractivos debido a su capacidad para utilizar biomateriales ecológicos, sostenibles y rentables en el proceso de eliminación de contaminantes, especialmente metales pesados, de diversas fuentes de agua y

suelos contaminados. Así mismo, se precisa que los bioadsorbentes tienen la capacidad de atrapar contaminantes, utilizando biomateriales tales como la arcilla, quitina, turba, biomasa microbiana y los desechos agrícolas como bioadsorbentes de uso doméstico, utilizados ampliamente para eliminar metales pesados.

La bioadsorción es un proceso que utiliza biomasa, ya sea viva o muerta, para eliminar contaminantes de soluciones acuosas, demostrando ser económica y eficaz en la descontaminación de metales pesados en el agua, convirtiéndose en una opción atractiva para abordar problemas de contaminación, permitiendo atrapar partículas, átomos o iones de metales pesados de manera efectiva, lo que acelera la velocidad de adsorción, alta disponibilidad, ausencia de daño al medio ambiente y la obtención a bajo costo, siendo fundamental para garantizar que sean prácticos y sostenibles. Los residuos agrícolas como bioadsorbentes no convencionales tales como bagazo de caña, la cáscara de plátano, la cáscara de yuca y otros mencionados, son ejemplos de bioadsorbentes no convencionales que se pueden utilizar para la remoción de metales pesados como el plomo (Pb) y el cobre (Cu), demostrando una capacidad significativa para eliminar estos metales siendo una alternativa sostenible en la gestión de la calidad del agua (Duany et al., 2022).

Maia et al. (2021) demostraron, por ejemplo, que el adsorbente lignocelulósico y sus propiedades químicas e interacciones relacionadas con la adsorción de arsénico son una fuente prometedora de nuevos adsorbentes porque es un material renovable y económico. La modificación estructural de la biomasa lignocelulósica para mejorar su capacidad de adsorción y selectividad ha demostrado ser una estrategia adecuada, siendo el tiempo de servicio y la selectividad del bioadsorbente, en presencia de iones coexistentes, los aspectos más críticos a perseguir. La mejora de la tecnología de biosorción para la eliminación de arsénico sólo será posible mediante estudios que investiguen, las interacciones involucradas en el proceso de adsorción, la transferencia de experimentos a escala piloto con agua contaminada con baja concentración de

arsénico y la evaluación del ciclo de vida de biosorbentes producidos a partir de biomasa lignocelulósica.

Bioadsorción en especies vegetales

Elgarahy et al. (2021) manifiestan que la bioadsorción empleando especies vegetales no solo se limita a la remoción de contaminantes en aguas y suelos, sino que también abarca una gama de plantas con propiedades adsorbentes significativas. Estas especies, como la chilca, diente de león, cáscara de tuna y otros vegetales silvestres, han demostrado capacidad para adsorber metales y metaloides presentes en fuentes de agua contaminadas, como aguas superficiales procedentes de áreas mineras.

La capacidad de las plantas para adsorber estos elementos tóxicos varía según la especie y el metal o metaloide específico (Gupta, 2021). Por ejemplo, algunos estudios han destacado la eficacia de la chilca en la adsorción de arsénico, cadmio y plomo, mientras que el diente de león ha demostrado ser altamente efectivo en la eliminación de cadmio en particular.

Las especies vegetales utilizadas como bioadsorbentes pueden no solo adsorber estos elementos sino también concentrarlos en sus tejidos, lo que las convierte en una herramienta potencial para la fitorremediación, un proceso que implica el uso de plantas para descontaminar suelos y aguas. Esta técnica es prometedora para reducir la presencia de metales pesados y metaloides en el entorno, contribuyendo así a la restauración de ecosistemas afectados por la contaminación (Karim et al., 2023).

Estos bioadsorbentes vegetales, junto con los materiales inorgánicos y otros biomateriales, conforman una gama diversa de herramientas en la bioadsorción, brindando enfoques naturales y efectivos para la remediación ambiental y la purificación de fuentes de agua y suelo contaminadas.

Menezes et al. (2020) investigaron el uso de la corteza de *Caryocar coriaceum Wittm* como bioabsorbente para eliminar plomo (II) de soluciones acuosas. Recolectaron, lavaron y prepararon los residuos de esta corteza para realizar ensayos cinéticos, isotérmicos y termodinámicos de adsorción de iones de plomo (II). Encontraron que el aumento de temperatura redujo la velocidad de adsorción, disminuyendo de 15.6 a 13.5 mg/L a 5 °C y 35 °C, respectivamente. El modelo cinético de pseudo segundo orden mostró mejor ajuste, con un coeficiente de regresión lineal de 0.9997, indicando adsorción por quimisorción con difusión intrapelícula. El modelo isotérmico de Langmuir ($R^2 = 0.99$) representó mejor la adsorción. Concluyeron que la corteza de *Caryocar coriaceum Wittm* es una opción efectiva como bioabsorbente para soluciones con plomo (II) disuelto.

Huayllani Enriquez (2016) evaluó seis especies vegetales para descontaminar suelos con plomo en diferentes concentraciones, encontrando que *Nicotiana tabacum* destacó en acumulación de plomo a 500 mg/kg, mientras que a 1000 mg/kg, *Ricinus communis* mostró mayor capacidad. Ninguna planta fue considerada hiperacumuladora. Por su parte, Torres Saavedra (2018) identificó al *Stipa ichu* como planta fitoextractora en suelos con metales. Mientras que, Hernández Domínguez (2021) validó el potencial acumulador de metales pesados de especies de la familia *Brassicaceae* como *Brassica juncea*, *Brassica nigra*, *Brassica campestris*, *Brassica napus* y *Brassica oleracea* para fitorremediación.

Nathan et al. (2022) compararon el rendimiento de la biosorción de cáscaras de kiwi, manzana, plátano, pepino, naranja y patata inmovilizadas en perlas de alginato de sodio, usando plasma acoplado inductivamente y espectroscopía de masas para medir la concentración de iones metálicos en solución antes y después de la biosorción. Aplicaron modelos cinéticos que revelaron diferentes porcentajes de biosorción en las perlas; por ejemplo, la biosorción más alta por la perla de kiwi fue para $Cd > Cu > Hg > Ni > Pb > Cr > As$, con eliminaciones simultáneas aproximadas del 92%, 84%, 80%, 75%, 67%, 34% y 17%, respectivamente. Cd y Pb mostraron la biosorción más rápida, alcanzando el

equilibrio en 24 horas. Igualmente, Karim et al. (2023) investigaron la aplicabilidad del uso de desechos alimentarios fibrosos de origen vegetal, que comprenden diferentes componentes como pectina, hemicelulosa, celulosa y lignina, para eliminar metales pesados de las aguas residuales. Esta contribución confirma que los residuos de alimentos a base de fibras vegetales tienen el potencial de unir metales pesados de aguas residuales y soluciones acuosas. Las capacidades de unión de estos biosorbentes varían según la fuente, la estructura química, el tipo de metal, la tecnología de modificación aplicada y las condiciones del proceso utilizadas para mejorar las funcionalidades.

Pacheco Peña (2021) evaluó el uso de *Scirpus californicus* (Totora) para eliminar plomo (II) de aguas contaminadas de manera ecológica. Encontró que la cantidad de adsorbente y el tamaño de partícula influyeron en la eficiencia de remoción, destacando las dosis de 0,3 g y 0,5 g y el tamaño de partícula N° 200 como más efectivos. Utilizando modelos cinéticos e isotérmicos, determinó que los modelos de pseudoprimer orden y Freundlich describían mejor la adsorción de plomo (II). Concluyó que las hojas de *Scirpus californicus* son una opción eficaz para descontaminar efluentes industriales con plomo (II) disuelto. Del mismo modo, Vega et al. (2018) empleó ceniza de bagazo de caña de azúcar para realizar pruebas de bioadsorción con el propósito de eliminar iones de plomo (Pb) proporciona una serie de resultados interesantes, donde utilizaron varios modelos cinéticos, incluyendo el seudo primer-segundo orden, el modelo de Elovich y la difusión intrapartícula, los resultados indicaron que el modelo de seudo segundo orden fue el que mejor se ajustó a las temperaturas de 25, 40 y 60 °C.

En su estudio, Alcántara (2016) identificó 28 especies vegetales en época húmeda y 20 en época seca para determinar su capacidad de acumular metales tóxicos como arsénico, plomo, mercurio, aluminio y cadmio. Veinte de estas especies demostraron características de tolerancia y/o hiperacumulación de plata, boro, hierro, cromo y cobre, incluyendo *Distichia muscoides*, *Juncus arcticus*, *Juncus bufonius*, *Penicetum clandestinum*, *Calamagrostis ligulata*, *Calamagrostis glacialis* y

Huperzia crassa. Estos hallazgos sugieren que estas plantas podrían usarse en sistemas de remediación para recuperar suelos afectados por metales pesados, extrayendo y acumulando estos metales en sus tejidos para su posterior remoción controlada, una técnica conocida como fitoextracción. Este enfoque contribuye a la restauración ambiental y a la reducción de la contaminación por metales pesados en el suelo.

Bioadsorción en otros materiales orgánicos e inorgánicos

La bioadsorción, si bien suele asociarse con materiales orgánicos, también abarca una gama de materiales inorgánicos altamente efectivos en la eliminación de contaminantes. Entre ellos, se destacan las zeolitas, estructuras cristalinas de aluminosilicatos que presentan porosidad y alta capacidad de adsorción de iones y moléculas. Estas zeolitas pueden ser modificadas para aumentar su selectividad hacia ciertos contaminantes, ampliando su versatilidad en la remoción de una variedad de sustancias indeseadas en el agua y el aire (Lagua López, 2021).

Como mencionan Karim et al. (2023), otro material inorgánico comúnmente empleado es el carbón activado, derivado de materiales carbonosos y tratado para desarrollar una estructura porosa que maximiza su área superficial. Esta característica única incrementa su capacidad de adsorción, volviéndolo efectivo en la eliminación de compuestos orgánicos, gases nocivos y metales pesados.

Además, los óxidos metálicos, como los de hierro, aluminio, manganeso o titanio, ofrecen propiedades de adsorción relevantes para la remediación ambiental. Su capacidad para interactuar con metales pesados y otros contaminantes los convierte en alternativas efectivas para la purificación de aguas y suelos contaminados (Manwani et al., 2023).

Estos materiales inorgánicos, junto con los bioadsorbentes orgánicos, constituyen una gama diversa de herramientas en la bioadsorción, ofreciendo soluciones versátiles y adaptadas para abordar la contaminación ambiental en diferentes contextos y con diversos tipos de contaminantes.

Rana et al. (2021) evaluaron diferentes biosorbentes, como la biomasa microbiana y agrícola, para la inmovilización de metales pesados en el suelo y la eliminación por absorción en las aguas. La biomasa microbiana y agrícola y sus formas modificadas, como los nanocompuestos y los materiales carbonosos, podrían ser útiles para el secuestro de metales pesados en el suelo mediante adsorción, intercambio iónico, complejación, precipitación y mecanismos de transformación enzimática. Los adsorbentes microbianos y los compuestos modificados de biomasa agrícola muestran un mejor rendimiento, estabilidad y reutilización e inmovilizan eficazmente los metales pesados del suelo y el agua.

Dey et al. (2022) investigaron el nitrato como un contaminante grave en áreas rurales y evaluaron cinco biosorbentes distintos, incluyendo cáscaras de naranja, residuos de té, alambre de coco, cáscaras de plátano y maíz, para eliminarlo del agua contaminada. Encontraron que cáscaras de naranja, residuos de té y alambre de coco lograron una eliminación del 100% a dosis específicas, destacando las cáscaras de naranja como el mejor biosorbente. Durante la optimización, identificaron condiciones óptimas como pH 6, 1.9 g de dosis, 60 minutos de contacto, 30°C y 60 rpm de agitación. Además, determinaron el tamaño de partícula y cristalitas de las cáscaras de naranja en 2.34 μm y 3.02 nm, respectivamente.

Por otro lado, Vizcaíno y Fuentes (2015) estudiaron la bioadsorción de iones de cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn) usando biomasa pretratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. Encontraron que la cáscara de naranja tuvo una alta capacidad para adsorber iones Pb^{2+} en soluciones acuosas, siendo eficaz en su eliminación. La tuna mostró mejor eficiencia en la eliminación de iones Zn^{2+} . Se observó una mayor afinidad de los biomateriales por los iones Cd^{2+} debido a diferencias en el radio iónico, mientras que las algas rojas demostraron menor capacidad para eliminar los iones Pb^{2+} y Zn^{2+} .

Tecnologías vinculadas al tratamiento de agua con materiales biosorbentes

Soni et al. (2020), desarrolló varias tecnologías de tratamiento de agua para contaminantes inorgánicos, con el objetivo de encontrar una tecnología

económicamente viable y respetuosa con el medio ambiente para el tratamiento del agua, utilizado varios métodos como la coagulación, la adsorción, los procesos de membrana, la diálisis, la electrocoagulación y la flotación. Adicionalmente, Anastopoulos et al. (2019) analizaron que las biomásas agrícolas son una clase de biosorbentes que ofrecen varias ventajas, incluido su bajo costo, disponibilidad en la naturaleza y simplicidad de obtención y uso como adsorbentes, las formas crudas y modificadas de estos biosorbentes se consideran precursoras para la preparación de otros adsorbentes como el biocarbón. Las biomásas agrícolas que analizaron fueron sandía, papa, pepino, maní, almendra, nuez y avellana, pistacho y biosorbentes a base de residuos de té. El potencial de adsorción de las biomásas se exhibe en las condiciones experimentales óptimas, y también se considera su caracterización y posibilidad de reutilización. Además, se discuten los parámetros isotérmicos y de equilibrio de la adsorción de metales (oides) por las biomásas. Específicamente, se describen estudios termodinámicos con el fin de comprender mejor la naturaleza del proceso de biosorción entre contaminante y biomasa.

Manwani et al. (2023), afirman que, para un crecimiento global sostenible, la seguridad alimentaria es una cuestión de máxima preocupación, tanto cuantitativa como cualitativamente. Los efectos adversos sobre la calidad de los cultivos debido a contaminantes como los metales pesados han afectado la seguridad alimentaria y la salud humana. Las verduras constituyen la parte esencial y nutritiva de la dieta humana, ya que contienen una gran cantidad de minerales y vitaminas que promueven la salud. Sin embargo, la acumulación excesiva inadvertida de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) en los vegetales y su posterior ingesta por parte de los humanos puede afectar su fisiología y metabólica, asociándose con enfermedades como el cáncer, el retraso mental y la inmunosupresión. Muchas fuentes conocidas de metales peligrosos son las erupciones volcánicas, la erosión del suelo, el uso de fertilizantes químicos en la agricultura, el uso de pesticidas y herbicidas y el riego con aguas residuales, efluentes industriales, que contaminan las hortalizas a través del suelo, aire y agua. En contraste, Elgarahy et al. (2021) indican que las aguas residuales que se

producen en diversas industrias contienen una cantidad notable de colorantes y consideran una alternativa ecológica, rentable y eficiente para la descontaminación la tecnología de biosorción, con diferentes biosorbentes, para saber cómo pueden eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos en las aguas residuales a través de un proceso de intercambio iónico, complejación y coordinación.

Campost et al. (2018) abordaron desafíos en comunidades que no tienen acceso a sistemas de tratamiento de agua potable, usando filtro casero con arena, grava cuarzosa y harina de cáscara de plátano *Musa spp* para la adsorción de hierro y manganeso, siendo una solución práctica y efectiva; los resultados obtenidos son alentadores y demuestran una considerable disminución de las concentraciones iniciales de hierro y manganeso en el agua de pozo, por otro lado mencionan que las concentraciones más eficientes de harina de cáscara de plátano *Musa spp*, así como las temperaturas de tratamiento se identificaron de manera sistemática para lograr una adsorción efectiva de estos metales; en particular, el hecho de que se haya logrado una adsorción de hasta el 82.26 % de hierro (Fe) y hasta el 89.1 % de manganeso (Mn) demuestra el éxito de este proceso de filtración en la mejora de la calidad del agua, estos resultados tuvo un impacto significativo en la salud y el bienestar de las familias que dependen del agua de pozo como fuente de consumo.

Castro Pastor (2015) afirma que la eficiencia de la cáscara de plátano como biosorbente demostró ser un biosorbente eficaz para la eliminación del uranio, con la capacidad de eliminar más del 50% de UO_2^{2+} de una solución de nitrato de uranio a una relación específica de uranio a cáscara de plátano (2:0.050 mL:g) en tan solo 40 minutos; la optimización del pH, indicaron que el pH 4 fue el más favorable para la eliminación del uranio. Esto sugiere que el ajuste del pH de las soluciones puede ser una estrategia importante para mejorar la eficiencia del proceso de adsorción; el efecto de la concentración y temperatura del estudio demostró que el aumento de la concentración de uranio en la solución no tuvo un impacto negativo significativo en la capacidad de adsorción de la cáscara de

plátano. Sin embargo, el aumento de la temperatura fue desfavorable, lo que redujo la capacidad máxima de adsorción, aunque el proceso de adsorción solo logró una eliminación del 65%, se destaca que este proceso puede repetirse tantas veces como sea necesario hasta que el agua esté completamente limpia. Así, mismo Medellín et al. (2017), determinaron las propiedades bioadsorbentes de yucca carnerosana y agave lechuguilla para la eliminación de iones de plomo. Atribuyendo estas propiedades a su alto contenido de lignina y sus sitios ácidos en el proceso de bioadsorción del Pb (II), que involucra mecanismos como el intercambio iónico, interacciones π -catión y atracciones electrostáticas, observando el proceso de micro precipitación cuando se utilizó la lechuguilla. Finalmente, Cabrera (2018) empleó biomasa vegetal inerte de tallos de rosas para la bioadsorción de plomo (II) muestra resultados prometedores en la eliminación de este metal tóxico de soluciones acuosas. Las condiciones óptimas de pH 4, tiempo de contacto de 60 minutos y 0.05 g de biomasa de tallo de rosa, alcanzó una capacidad de adsorción máxima (Q_{max}) de 344.8276 mg de Pb (II) por gramo de biomasa.

Díaz Cartagena (2020) comprendió la distribución del arsénico en el suelo y el ecosistema, y su impacto en la salud de los organismos y seres humanos, para esos fines recolectaron 20 muestras de suelo a una profundidad de 30 cm y se evaluaron en un laboratorio mediante el método ICP-masa. Se encontraron niveles de arsénico en suelos de la zona rural, registrando 40.37 mg/kg, en zona urbana, 111.33 mg/kg de arsénico, y en la zona industrial 472.56 mg/kg, procedentes de dos fuentes principales de arsénico la primera se relaciona con la geología y la erosión de la roca madre en el distrito minero de Parcoy, que ha transportado material con arsénico hacia el centro poblado y la segunda fuente está relacionada con actividades humanas, como la minería artesanal, informal, ilegal, la agricultura y la construcción de viviendas.

Cruzado et al. (2023) determinaron el nivel de reducción de la contaminación por plomo y cadmio en el tratamiento de aguas con el uso de *Baccharis latifolia* y *Plantago major*. Para lo cual se diseñó y construyó un sistema de humedal piloto

utilizando el proceso de tipo batch con materiales filtrantes (grava, caliza y sustrato) y las especies vegetales mencionadas. El resultado del estudio se comparó con los ECA aprobado por el D.S. 004-2017 MINAM., el análisis de datos se realizó mediante la prueba T- Student; los resultados del estudio demostraron que no hubo una reducción significativa de la concentración de plomo, pues se logró reducir un promedio de 55% con respecto a la muestra inicial, pero no llega a estar dentro de los ECA para agua; a diferencia del cadmio del cual se obtuvo un porcentaje de remoción de más del 90 %. Concluyendo que el tratamiento fue más eficaz con respecto al cadmio.

1.2 Contaminantes químicos

Rana et al. (2021) menciona que los contaminantes químicos son sustancias, ya sean sólidas, líquidas o gaseosas, introducidas en el ambiente por actividades humanas o procesos naturales que pueden ser perjudiciales para los organismos vivos, el medio ambiente o los recursos naturales. Estos compuestos pueden alterar el equilibrio natural de los ecosistemas, generando impactos negativos en la salud humana, animal, vegetal o en la calidad del agua, aire o suelo.

Las tipologías de contaminantes químicos se clasifican en diversas categorías según Reyes et al. (2016):

- **Orgánicos:** Se derivan de compuestos carbonados y provienen de actividades humanas, como la industria, la agricultura o el uso de productos químicos. Incluyen hidrocarburos, solventes, plaguicidas, herbicidas, compuestos orgánicos volátiles (COV), como benceno y tolueno, y sustancias farmacéuticas.
- **Inorgánicos:** Están compuestos por elementos sin enlaces de carbono y pueden provenir de fuentes naturales o actividades industriales. Comprenden metales pesados (plomo, mercurio, cadmio), compuestos de arsénico, nitratos, sulfatos y otros elementos como el amoníaco.
- **Biológicos:** Proceden de organismos vivos o sus subproductos. Incluyen bacterias, virus, toxinas, hongos y otros microorganismos que pueden

contaminar el agua, el aire o los alimentos, causando enfermedades o desequilibrios en los ecosistemas.

- **Radiactivos:** Producidos por materiales radiactivos, emiten radiación y pueden contaminar el medio ambiente si se liberan en grandes cantidades, generando riesgos para la salud y el entorno.

Veliz Ávila (2022) se enfocó en evaluar la influencia de metales pesados, específicamente arsénico, manganeso y zinc, en los suelos y en dos tipos de forrajes, Rye Grass Italiano y Trébol Rojo, los cuales demostraron contener niveles elevados de arsénico, manganeso y zinc, lo que significa que estas plantas tienen una alta capacidad para absorber y acumular metales pesados de los suelos en sus tejidos. Santa Cruz et al. (2021) demostraron la toxicidad de los metales del suelo se basan convencionalmente en el uso de suelos no contaminados y enriquecidos gradualmente con metales en forma de sales solubles, muchos estudios enfatizan la importancia de utilizar suelos contaminados en el campo para bioensayos de toxicidad, el número de estudios realmente realizados basándose en esta premisa es relativamente pequeño.

Neiva et al. (2019) determinaron que en la mina de uranio abandonada de Mortórios hay vetas de cuarzo que contienen wolframita y sulfuros y diques de roca básica con torbernita y autunita que cortan un granito porfídico. Los diques de roca básica fueron explotados y produjeron alrededor de 27 t de U₃O₈, de 1982 a 1988. Hay un lago a cielo abierto y nueve botaderos. Las aguas superficiales y subterráneas están contaminadas con U, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni y Pb. Los sedimentos de las corrientes están contaminados con U, As, Th y W, que son adsorbidos por esmectita, caolinita y oxihidróxidos de hierro y aluminio. Las concentraciones máximas de U son de 1268 µg/L en el lago a cielo abierto, 100 µg/L en agua superficial, 103 µg/L en agua subterránea y 81,5 mg/kg en los sedimentos de los arroyos, todas aguas abajo del lago a cielo abierto y los vertederos. Más abajo, la concentración de U en el agua disminuye debido a la alta movilidad del U (VI), pero la concentración de U en los sedimentos de la corriente aumenta. Las concentraciones máximas de As son 56,0 µg/L en el lago

a cielo abierto, 63,4 $\mu\text{g/L}$ en el agua superficial y 66,7 $\mu\text{g/L}$ en el agua subterránea, tanto aguas abajo del lago a cielo abierto como en los vertederos.

Pabón et al. (2020) señalaron que los problemas derivados de la contaminación del agua por metales pesados son graves porque puede ser tóxica para la vida acuática, como los peces y otros organismos acuáticos. Estos metales pueden acumularse en los tejidos de los organismos y afectar su salud y supervivencia. Los síntomas de la exposición a estos metales incluyen problemas gastrointestinales, respiratorios, daños en órganos como el hígado y los riñones, y en casos extremos, pueden llevar a enfermedades graves como el cáncer. La contaminación de los ríos con metales pesados puede afectar la calidad de los suelos utilizados para la agricultura, disminuyendo el crecimiento de las plantas y otros efectos adversos, como la clorosis (amarillamiento de las hojas). La presencia de metales pesados en el agua tiene un impacto económico significativo debido a los costos asociados con el tratamiento médico de personas afectadas y la disminución de la productividad de las comunidades afectadas.

De la Cruz et al. (2015) evaluaron la capacidad de bioadsorción de los metales cadmio (Cd) y plomo (Pb) por parte de la biomasa bacteriana inactiva de la cepa silvestre *Serratia marcescens* M8A-2T. Esta cepa demostró una alta resistencia a estos metales, con Concentraciones Mínimas Inhibitorias (CMI) de hasta 16,000 mg/L para el Cd y 800 mg/L para el Pb, según el método del cilindro en placa. En soluciones que contenían solo un metal a la vez, se determinó una eficiencia máxima de bioadsorción del 99.89% para el Cd y del 61.32% para el Pb. Estas eficiencias se lograron a un pH de 9 y tiempos de contacto que variaron entre 15 y 120 minutos. Los resultados sugieren que la biomasa bacteriana tiene un gran potencial para su uso en procesos biotecnológicos de remediación de ambientes contaminados con metales pesados en el futuro.

Salas et al. (2020) se centraron en la acumulación de contaminantes inorgánicos, en particular metales pesados, en el río Crucero ubicado en el departamento de Puno, Perú; el río recibe descargas de aguas residuales de actividades mineras, urbanas y rurales, lo que puede contribuir a la acumulación de contaminantes en

el agua y los sedimentos, para la evaluación se tomaron muestras de agua y sedimentos en cinco estaciones de muestreo a lo largo del río durante la estación seca en mayo de 2017; los resultados del estudio mostraron que el agua del río Crucero no era apta para consumo humano, ya que tenía un pH mayor de 8.5, lo que incumple las regulaciones establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), además, se detectó contaminación con arsénico, cadmio y zinc en los sedimentos, aunque las concentraciones de metales en el agua no superaban los estándares de calidad ambiental nacionales ni los valores de criterios internacionales, lo que sugiere que la acumulación de metales pesados en los sedimentos podría representar un riesgo ambiental y ecológico.

Dótor Almazán et al. (2014) investigaron los procesos que afectan el transporte de metales y elementos en las aguas superficiales del distrito minero de Taxco. Analizaron isótopos y elementos químicos en ríos y arroyos cercanos a los desechos de la minería conocidos como jales. Los valores de isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y δD señalan influencias de evaporación y agua meteórica, especialmente en épocas lluviosas. El azufre en los cuerpos de agua proviene de la oxidación y erosión de minerales sulfuros, reflejado en los valores de $\delta^{34}\text{S}$. Los análisis indican similitudes entre ríos/arroyos y desechos mineros en estaciones secas, sugiriendo que los cambios estacionales impactan los procesos de intemperismo y transporte hacia cuerpos de agua. Se observó variación en la concentración de metales debido a procesos acoplados de descarga, erosión y dilución.

Belizario Quispe et al. (2019) se centraron en la medición de los contenidos de varios elementos entre ellos fósforo, arsénico, aluminio, hierro y manganeso, en las aguas superficiales del río Coata, que es un afluente del lago Titicaca en el departamento de Puno, Perú; las mediciones se realizaron en dos épocas del año, estiaje y avenida, cuyos resultados indican que se encontraron concentraciones máximas de estos elementos, siendo algunas de ellas de alta preocupación, como es el caso de aluminio, hierro, manganeso, arsénico y fósforo, excediendo los límites permitidos según los Estándares de Calidad Ambiental del Ministerio del

Ambiente de Perú, que generaría graves problemas ambientales y de salud. Por su parte

Calero Huamán (2023) evaluó el contenido de varios metales en las aguas superficiales cercanas a la desembocadura del río Chancay, para llevar a cabo este estudio, se siguieron las pautas del Ministerio de Ambiente del Perú y se compararon los resultados con el Valor de Referencia (VR) de riesgo potencial para la salud establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS); los resultados del estudio revelan que se detectó la presencia de aluminio, arsénico, cadmio, cromo, níquel y plomo en las muestras evaluadas, sin embargo, se encontró que, a excepción del plomo, todos estos metales cumplen con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos para la recreación por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y con los valores de referencia de riesgo potencial para la salud de la OMS en las aguas superficiales de un río. Tal y como hicieron Tirado y Valverde (2019), determinando los elementos Arsénico es de 0,0065, Cadmio 0,0027, Cromo 0,0056, Níquel 0,005, Plomo 0,0047 y variaciones en el contenido de Manganeso desde 1,259 a 8,561 (promedio 5,144 mg/L en agua del río Chimín en Cajamarca. Zapata et al. (2017), también evaluaron la concentración de metales, en agua superficial de los ríos Vizcachas y Chilota ubicado en Moquegua, resultados que fueron comparados con el ECA categoría 3 del MINAM.

Villa et al. (2020) determinaron la concentración de Cd, Hg, Pb, As y B en el agua subterránea de uso agrícola en los municipios de Autlán de Navarro y Zacoalco de Torres, Jalisco, México, resultando para Hg una concentración promedio de 0.14 mg L⁻¹, el metaloide As con una concentración promedio de 0.13 mg L⁻¹ superando los límites permisibles, pero Cd, Pb y B no superaron los valores establecidos como límite permisible para el uso del agua en riego agrícola.

Menciona Cañizares Villanueva (2000), que el uso microorganismos como biosorbentes de metales pesados representa una alternativa prometedora en la destoxificación y recuperación de metales tóxicos o valiosos presentes en aguas residuales industriales, basado en la capacidad de ciertos microorganismos,

como levaduras, hongos, algas, bacterias y flora acuática, para concentrar metales de soluciones acuosas y acumularlos en sus estructuras microbianas en función a varios procesos biotecnológicos eficientes que hacen uso de la biosorción y la bioprecipitación para eliminar o recuperar metales cuya implicancia es la utilización de biomasa total, ya sea viva o muerta, mediante mecanismos fisicoquímicos como la adsorción y el intercambio iónico empleando.

1.3 Metales pesados

Karim et al. (2023) mencionan que los "metales pesados" están asociados con la contaminación ambiental, la contaminación de los alimentos y la toxicidad y tienen efectos adversos sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos y la salud animal y humana. Metales pesados y metaloides peligrosos, como arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y mercurio (Hg), y varios metales pesados esenciales, como cobre (Cu), hierro (Fe), el manganeso (Mn), el níquel (Ni) y el zinc (Zn), por encima de los niveles umbral, han sido identificados como contaminantes prioritarios y uno de los problemas ambientales clave de preocupación mundial en las últimas décadas debido a su movilidad en el medio terrestre y terrestre.

Los ecosistemas acuáticos naturales y su naturaleza cancerígena. Las aguas residuales municipales e industriales con frecuencia incluyen una variedad de iones de metales pesados, lo que representa una grave amenaza para el ecosistema acuático y el medio ambiente. Esto se debe a que los metales pesados son contaminantes ambientales estables y persistentes debido a su no biodegradabilidad y su alta toxicidad. Además, poseen una tendencia a bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de la cadena alimentaria, provocando graves amenazas a los seres humanos y otros organismos vivos directa e indirectamente. En consecuencia, las aguas residuales contaminadas con metales deben tratarse antes de su vertido al medio ambiente (Méndez et al., 2009).

Huayanay Ostos (2018) indican que los elementos químicos (metales pesados), originado por actividades antropogénicas considerado como principales contaminantes de mayor preocupación social, por el impacto que generan estos

metales como cadmio (Cd), mercurio (Hg), cobre (Cu), plomo (Pb) (Reyes et al., 2016). Los metales pesados son elementos químicos que se caracterizan por tener un número atómico mayor a 20 y una densidad mayor a los 5 g/cm³ en condiciones normales, cuando se encuentran en zonas mineras. La minería es una de las fuentes más importantes de la contaminación por metales pesados, lo que puede contaminar suelos, aguas subterráneas (con una mayor probabilidad y rapidez para ser ingeridos por los organismos marinos) y superficiales, y afectar a las comunidades cercanas (Madrigal et al., 2016; De la Cruz et al., 2015; Huayllani, E, 2016; Calero Huamán, 2023; Cañizares, 2000).

Para Rosales et al. (2018) es cierto que una gran parte de la contaminación por metales pesados, como el plomo y el cadmio, que afecta al medio ambiente ha sido causada por actividades humanas que incluyen prácticas agrícolas inadecuadas, procesos industriales, explotación minera, descargas de aguas residuales y el uso de una variedad de productos que contienen estos metales, como plomo y cadmio son particularmente preocupantes debido a su toxicidad y al impacto que tienen en la salud humana y en los ecosistemas, que pueden acumularse en el suelo, el agua y los alimentos, y su exposición prolongada puede causar una serie de problemas de salud, incluyendo daños al sistema nervioso, renal y otros órganos, pero la gestión adecuada de los desechos y la regulación de la liberación de estos metales en el medio ambiente son importantes para prevenir la contaminación y minimizar los impactos negativos, generando conciencia sobre los riesgos de la exposición a metales pesados y la adopción de prácticas más seguras en la industria y la agricultura son pasos importantes para abordar este problema.

1.3.1 Metales pesados en plantas

Reyes (2016) detallan que los metales pesados pueden ser absorbidos por las plantas desde el suelo o el agua y acumularse en sus tejidos. Estos metales incluyen elementos como el plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As), cromo (Cr), entre otros, y pueden ser tóxicos tanto para las plantas como para los organismos que las consumen, incluyendo los seres humanos.

La acumulación de metales pesados en las plantas se produce principalmente a través de sus raíces, donde los iones metálicos pueden ser absorbidos y transportados a través del sistema vascular hacia diferentes partes de la planta, como tallos, hojas y frutos. Estos metales pueden interferir con procesos fisiológicos esenciales de las plantas, como la fotosíntesis o la absorción de nutrientes, y afectar su crecimiento y desarrollo.

Para Santa-Cruz et al. (2021) el impacto de los metales pesados en las plantas depende de varios factores, como la concentración de los metales en el suelo o el agua, la duración de la exposición y la capacidad de las plantas para tolerar o acumular estos elementos.

Los metales pesados ejercen un impacto significativo en las plantas, interfiriendo con sus funciones fisiológicas y alterando su desarrollo. Estos elementos, como el plomo, cadmio, mercurio, arsénico y cromo, pueden ser absorbidos por las plantas a través del suelo o el agua y, en concentraciones elevadas, resultan tóxicos para su metabolismo. Cuando estos metales se acumulan en los tejidos vegetales, pueden desencadenar efectos adversos como la inhibición de la fotosíntesis, el bloqueo de la absorción de nutrientes esenciales, y la alteración de la estructura celular (Salas-Mercado et al., 2020). Esta toxicidad directa se manifiesta en síntomas visibles como el amarilleo de las hojas, el marchitamiento y la necrosis, limitando el crecimiento y la salud de la planta.

Además, los metales pesados tienen la capacidad de translocarse dentro de la planta, moviéndose desde las raíces hacia otras partes, lo que conduce a una distribución desigual en diferentes órganos. Esta acumulación puede llegar a niveles críticos en tejidos como las hojas y los frutos, afectando la calidad de los productos vegetales y su idoneidad para el consumo humano o animal. Esta contaminación potencial en la cadena alimentaria puede representar un riesgo para la salud, ya que los metales pesados pueden ser transferidos a organismos superiores, incluyendo seres humanos (Villa et al., 2020).

Por lo tanto, la presencia de metales pesados en el entorno de las plantas no solo afecta su desarrollo y rendimiento, sino que también plantea preocupaciones sobre la seguridad alimentaria y la salud ambiental, destacando la importancia de monitorear y mitigar la presencia de estos contaminantes en los ecosistemas agrícolas y naturales.

Además, algunas plantas tienen la capacidad de tolerar ciertas concentraciones de metales pesados o incluso de hiperacumularlos, lo que significa que pueden acumular concentraciones muy altas de estos metales en sus tejidos sin mostrar signos evidentes de toxicidad (Tejada-Tovar et al., 2015). Estas plantas se denominan hiperacumuladoras y han sido objeto de interés en la fitorremediación, un proceso en el que se utilizan plantas para eliminar o reducir contaminantes en suelos o aguas contaminadas.

Navarro et al. (2007) refieren, que los aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y bioacumulación de metales pesados en plantas, la alta toxicidad química de metales se debe principalmente a su capacidad para unirse a moléculas orgánicas. Las plantas son buenos acumuladores, absorbedores y translocadores de sustancias, ya que los metales pesados son equivalentes químicamente a los nutrientes que absorben de manera normal, los cuales ingresan a la cadena trófica. Las plantas regadas con aguas contaminadas con metales, no son biodegradables y se bioacumulan en los tejidos, causando efectos tóxicos crónicos (Villa et al., 2020; Méndez et al., 2009).

1.4 Especies vegetales altoandinas

1.4.1. *Taraxacum officinale* (diente de león)

Hábitat

Gasca (2000) describe al diente de león como una planta perenne que tiene una raíz primaria larga y una roseta basal, que suele alcanzar una altura de aproximadamente 40 cm con hojas alternas y tienen forma lanceolada con una nervadura central y son pinnatipartidas, lo que significa que tienen lóbulos en forma triangular con márgenes dentados y agudos, cuyas hojas pueden presentar

microvellosidades, lo que se refiere a pequeños pelos o vellosidades en su superficie, identificándose la apariencia y las características de la planta en cuestión, pero para una identificación precisa, sería necesario conocer más detalles, como el nombre científico de la planta o detalles adicionales sobre sus flores, frutos u otras características distintivas. Brocca y Kuri (2004) el diente de león (*Taraxacum officinale*) ha sido utilizado tradicionalmente en diversas culturas como una planta medicinal para tratar una variedad de enfermedades como trastornos del hígado y la vesícula biliar, padecimientos cutáneos infecciosos como sarpullido del recién nacido, granos, sarna, inflamaciones de las mucosas como los “fuegos” en la boca.

Tabla 1

Clasificación taxonómica de Taraxacum officinale

TAXONOMÍA	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteridae
Orden	Asterales
Familia	Astereceae
Subfamilia	Cichorioideae
Tribu	Cichorieae
Subtribu	Crepidinae
Género	Taraxacum
Especie	Taraxacum officinale

Nota. La tabla representa a la taxonomía del diente de león. Tomado de Gasca (2000, p. 54).

Figura 1

Diente de león



1.4.2 *Baccharis salicifolia* (chilca)

Hábitat

Cerca del agua o en lugares húmedos. Común en las montañas patagónicas de Argentina. También se encuentra en Chile (Barrientos Alvarez, 2015).

Tabla 2

Clasificación taxonómica de Baccharis salicifolia

TAXONOMÍA	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae
Subfamilia	Asteroideae
Tribu	Astereae
Género	Baccharis
Especie	<i>Baccharis salicifolia</i>

Nota. La tabla representa a la taxonomía de chilca. Tomado de Gasca (2000, p. 54).

Figura 2

Chilca (Baccharis salicifolia)



1.4.3 *Opuntia ficus-indica* (cáscara de tuna)

Hábitat

En las regiones áridas y semiáridas, una variedad de factores ambientales limita el crecimiento de las plantas, incluidas temperaturas altas y bajas extremas, escasez de agua y disponibilidad limitada de nutrientes (Marín et al., 2018). Las plantas requieren temperaturas anuales entre 18 y 25°C para un crecimiento óptimo, con un pH alcalino adecuado, y en altitudes entre 800 y 2,500 m.s.n.m. también se puede ver en altitudes más bajas (*Opuntia ficus-indica*, 2022).

Tabla 3

Clasificación taxonómica de Opuntia ficus-indica

TAXONOMÍA	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Caryophyllales
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntieae
Género	Opuntia
Subgénero	Opuntia
Especie	Baccharis O. ficus-indica

Nota. La tabla representa a la taxonomía de cáscara de tuna. Tomado de Marín et al. (2018, p. 23).

Figura 3

Tuna (Opuntia ficus-indica)



1.5 Biosorción

El concepto de biosorción se basa en la capacidad de ciertos tipos de biomasa latente o muerta para unirse y acumular diversos contaminantes a través de mecanismos como interacciones electrostáticas, complejación e intercambio iónico, utilizado para referirse al proceso de absorción (Barrientos Álvarez, 2015). La biosorción ha sido objeto de investigación por parte de muchos investigadores y ha demostrado ser una tecnología alternativa a los métodos tradicionales para el tratamiento de diversas aguas residuales industriales contaminadas con

metales, metales pesados y colorantes (Torres Saavedra, 2018). Por lo tanto, existe un uso cada vez mayor de materiales de origen biológico como algas, hongos, bacterias, desechos de conchas y desechos agrícolas, que son abundantes y se convierten fácilmente en absorbentes (Pinzón, et.al 2009). Una de las ventajas de utilizar materiales biológicos como adsorbentes es que están disponibles de forma natural y tienen un coste muy bajo (Moreno Marengo, 2013, p. 28).

La biosorción es un proceso que permite la captura activa o pasiva de iones metálicos gracias a la capacidad de diferentes biomasas vivas o muertas de unirse y acumular estos contaminantes a través de diferentes mecanismos (Pinzón, et.al, 2009). El uso de materiales de bajo costo provenientes de diferentes tipos de biomasa, como microbiota, algas y desechos agroindustriales, se ha explorado como una alternativa a los métodos tradicionales para eliminar contaminantes de desechos, incluidos los metales pesados (Tejada, et al., 2015). Los metales más problemáticos incluyen el cromo, el níquel, el cadmio, el plomo y el mercurio porque son muy tóxicos y difíciles de eliminar (Lovaković, 2020). En estos procesos de descontaminación se aplica el uso de la adsorción para eliminar contaminantes presentes en soluciones acuosas utilizando biomasa residual, evitando así la generación de residuos químicos y reduciendo la cantidad de material considerado como residuo, proporcionando usos alternativos, también se ha identificado que factores como el pH de la solución, el tamaño de las partículas, la temperatura y la concentración del metal influyen en el proceso (Moreno Marengo, 2013).

1.6 Bioadsorción

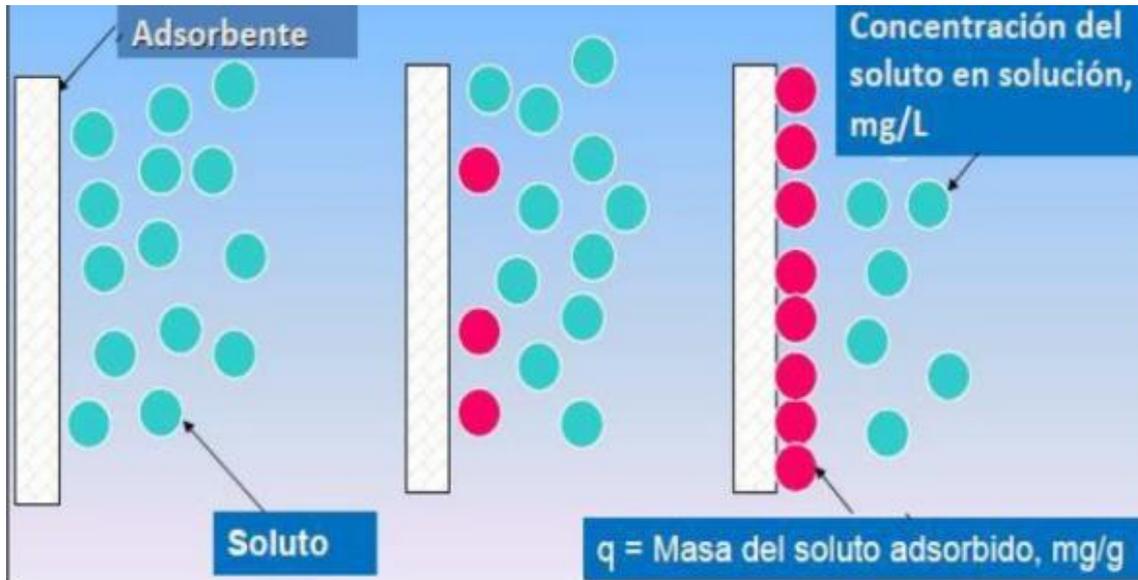
La bioadsorción es un proceso físico-químico que engloba los fenómenos de adsorción y absorción de moléculas e iones (Pinzón et. al 2009). Este enfoque no convencional tiene como objetivo principal la eliminación de metales pesados presentes en aguas residuales industriales (Barrientos Álvarez, 2015). Para lograrlo, se utilizan diversos materiales de origen biológico, ya sea vivos o muertos, como sorbentes (Moreno Marengo, 2013). Entre estos materiales se encuentran algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y

ciertos biopolímeros (Pal et al., 2022). Estos sorbentes son de bajo costo y se encuentran abundantemente en la naturaleza, además, su transformación en biosorbentes no es un proceso costoso (Barrientos Álvarez, 2015).

El proceso de bioadsorción involucra una fase sólida, que es la biomasa, y una fase líquida, que es el agua que contiene los compuestos disueltos, en este caso, los iones de los metales pesados que se pretenden adsorber. Huayanay Ostos (2018), empleó microorganismos adecuados como biosorbentes, aislados a partir de ecosistemas contaminados, para la retención del metal mediante dos procesos, una bioacumulación al interior celular y una interacción fisicoquímica en la superficie celular (Castro Pastor, 2015). La captación de metales con una biomasa completa viva o muerta, fue a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico (Cañizares, 2000). Pacheco Peña (2021) manifiesta que, ocurre varios factores como la complejación de los componentes de la biomasa o microorganismos que pueden formar complejos químicos con los iones metálicos en solución, lo que facilita su retención en la superficie del material biológico, ocurriendo la precipitación de iones metálicos. Así mismo, las interacciones físicas y químicas, como las fuerzas de Van der Waals y los enlaces de hidrógeno, también pueden desempeñar un papel en la adsorción de iones metálicos, las cargas eléctricas en la superficie de la biomasa o microorganismos pueden atraer iones metálicos con cargas opuestas.

Figura 4

Proceso de adsorción



Nota. La figura se refiere al proceso de adsorción. Tomado de Castro Pastor (2015, p. 31).

1.6.1 Metales de interés en el proceso de bioadsorción

Los metales se pueden clasificar según el interés y su impacto ambiental en categorías como: pesados tóxicos referidos a un conjunto de 40 elementos con un peso atómico elevado (mayor a 44) y una densidad específica superior a 5 g/cm^3 , excluyendo en general a los metales alcalinos; estratégicos referidos a los minerales que integran en la producción del acero; elementos nativos preciosos, que se encuentran en su estado elemental en la naturaleza; radionúclidos por su forma inestable de un elemento que libera radiación a medida que se descompone y se vuelve más estable (Tejada-Tovar et al., 2015).

Metales

Anastopoulos et al. (2019) refieren que los metales son elementos químicos fundamentales que se caracterizan por una serie de propiedades distintivas en el estudio químico. Su estructura cristalina y la disposición de electrones juegan un papel crucial en su comportamiento. Los átomos metálicos se organizan en una red cristalina, permitiendo que los electrones de valencia se desplacen libremente

entre ellos. Esta movilidad electrónica confiere a los metales una excelente conductividad eléctrica y térmica, una propiedad valiosa tanto en aplicaciones industriales como en dispositivos electrónicos.

La maleabilidad y la ductilidad son atributos sobresalientes de los metales. Estos elementos pueden ser moldeados en láminas delgadas o estirados en hilos sin romperse debido a la capacidad de los átomos metálicos para deslizarse unos sobre otros manteniendo la integridad de la estructura. Este comportamiento permite la fabricación de diferentes formas y estructuras según las necesidades específicas de las aplicaciones (Cañizares-Villanueva, 2000).

El brillo metálico es una característica visual distintiva de los metales. Este brillo único se debe a la capacidad de los electrones libres de absorber y reemitir luz en un amplio espectro de longitudes de onda. Además, los metales suelen tener puntos de fusión y ebullición elevados, lo que los mantiene en estado sólido en condiciones normales de temperatura y presión, con excepción de algunos como el mercurio, que son líquidos (Ferrer, 2003).

En cuanto a su reactividad química, los metales tienden a ceder electrones fácilmente para formar cationes positivos en reacciones químicas. Esta propiedad los hace propensos a la oxidación al interactuar con no metales, formando compuestos iónicos. Además, los metales tienen la capacidad única de formar aleaciones al combinar dos o más elementos metálicos, lo que les otorga propiedades específicas, como mayor resistencia o durabilidad, según la composición de la aleación (Ferrer, 2003).

Los metales son un grupo de elementos que generalmente se encuentran en la parte izquierda y centro de la tabla. Se caracterizan por tener propiedades como conductividad eléctrica, conductividad térmica, brillo metálico y ductilidad, poseen peso atómico comprendido entre los valores de 63,55 a 200,59 y un peso específico mayor a los 4 g/cm^3 , por lo general tienden a ser sólidos a temperatura ambiente, excepto el mercurio, todos dependen de sus propiedades físicas y químicas (Macha, 2019, p.25; Ferrer, 2003).

a) Plomo

Pacheco Peña (2021) manifiesta que el plomo es un metal pesado de color gris azulado que ha sido utilizado por la humanidad desde tiempos antiguos debido a su maleabilidad, baja reactividad y abundancia relativa en la corteza terrestre. Sin embargo, su toxicidad ha sido reconocida como un grave problema de salud pública.

Desde una perspectiva química, el plomo comparte muchas características típicas de los metales. Posee una estructura cristalina y electrones de valencia móviles que le otorgan una conductividad eléctrica y térmica significativa. Es maleable y se puede moldear fácilmente en láminas delgadas o formar en diferentes formas. El brillo metálico del plomo es característico, aunque con el tiempo puede oxidarse y desarrollar una pátina opaca (Calero Huamán, 2023). Tiene un punto de fusión relativamente bajo en comparación con otros metales, lo que lo ha hecho valioso en aleaciones y soldaduras.

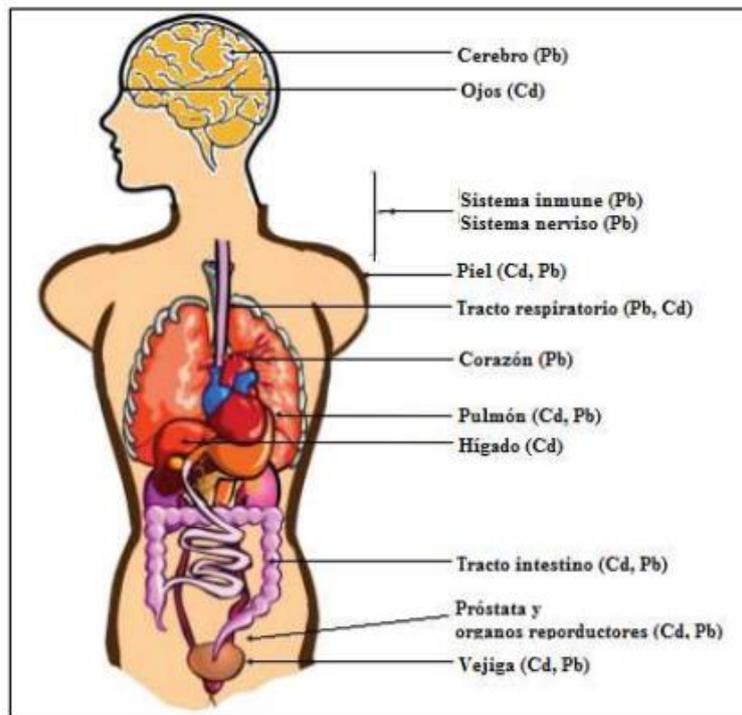
Sin embargo, uno de los aspectos más preocupantes del plomo es su alta toxicidad. Los compuestos de plomo son dañinos para la salud humana y el medio ambiente. La exposición al plomo puede causar problemas neurológicos, renales, y afectar el desarrollo cognitivo en niños (Ninatanta-Ortiz et al., 2016). Por esta razón, su uso ha sido restringido en varios productos y su manejo está regulado para reducir su impacto negativo.

El plomo (Pb) es un metal pesado que ocupa el lugar 82 en la tabla periódica cuyo peso atómico es 207,19 g/mol, de coloración azulosa, es flexible, muy inelástico, se funde a 327,4°C (621,3°F) y ebullición a 1725°C (3164°F), es relativamente resistente al ataque de los ácidos clorhídrico y sulfúrico (Huayllani Enríquez, 2016). En gran parte se encuentra en la corteza terrestre en forma natural, su forma más abundante está en el sulfuro de plomo (PbS), catalogado como altamente contaminante en el medio ambiente, causando problemas graves de salud pública en los seres humanos expuestos. Al ser absorbido en forma de partículas finas, a través de los pulmones (Macha, 2019; Ferrer, 2003). Si la concentración de este elemento químico en la sangre supera los 5 µg/L, puede

tener graves consecuencias para la salud, tanto a corto como a largo plazo (Huaranga, et al., 2022; Macha, 2019; Huayllani Enríquez, 2016, Pacheco Peña, 2021).

Figura 5

Órganos y sistemas del organismo afectados por la toxicidad de plomo



Nota. La figura está referida a órganos y sistemas del organismo afectados por la toxicidad del plomo según la OMS (2016). Tomado de Huayllani (2016, p. 25).

b) Cadmio

El cadmio es un metal de transición blando, plateado y maleable que posee propiedades únicas en el estudio químico. A pesar de su escasez en la corteza terrestre, se encuentra en pequeñas cantidades en minerales de zinc, lo que lo convierte en un subproducto de la producción de zinc (De la Cruz et al., 2015). Este metal tiene propiedades similares a otros elementos del grupo del zinc y el mercurio.

Para Macha (2019) en términos de estructura cristalina y disposición de electrones, el cadmio sigue el patrón común de los metales, presentando una red

cristalina y electrones de valencia móviles, lo que le confiere una conductividad eléctrica y térmica significativas.

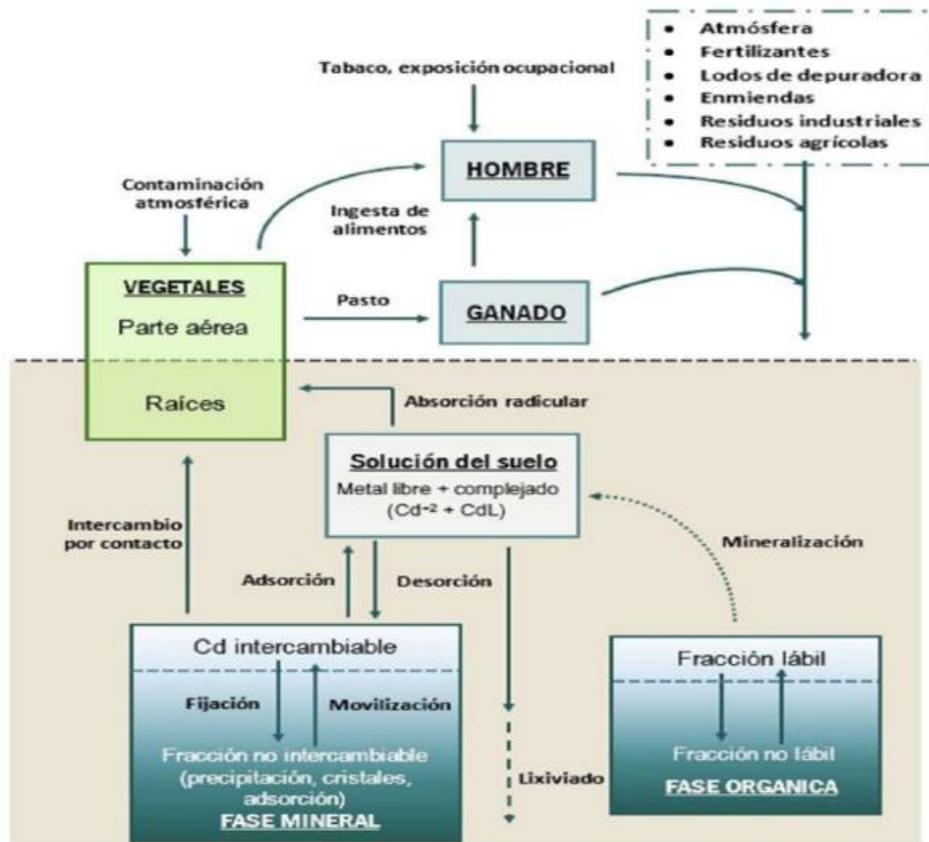
Su maleabilidad y ductilidad son atributos que permiten su conformado en láminas delgadas y su estiramiento en hilos sin fracturarse, aunque en menor medida que otros metales más comunes debido a su tendencia a endurecerse y volverse quebradizo a temperaturas bajas.

El cadmio exhibe un brillo metálico característico y tiene un punto de fusión relativamente bajo en comparación con otros metales, lo que lo hace útil en aleaciones con propiedades específicas de fusión a baja temperatura. En términos de reactividad química, el cadmio es menos reactivo que otros metales del grupo, pero puede formar compuestos con oxígeno, azufre y otros elementos. Sin embargo, su toxicidad es un aspecto crítico a considerar: los compuestos de cadmio son altamente tóxicos y pueden tener efectos perjudiciales en la salud humana y en el medio ambiente (Huayllani et al., 2016).

El (Cd) es un metal pesado, perteneciente al grupo 12 de la tabla periódica, en su forma de metal puro es blando, dúctil y maleable con un color plateado claro. Es un elemento químico altamente contaminante, que se encuentra en la corteza terrestre, muchas veces junto a otros minerales (Macha, 2019). La actividad humana como consecuencia del desarrollo de sus diferentes actividades económicas entre las cuales la minería, la industria, la producción, uso de fertilizantes fosfatados, la incineración de maderas, plásticos, son generadores de cadmio (Cossío Herrera, 2015; Huayanay, 2018). Se puede obtener por procesos metalúrgicos del plomo y zinc, como subproductos con la capacidad de acumularse en diferentes partes de los seres vivos, su distribución en la naturaleza es amplia y se encuentra relacionado a diferentes tipos de minerales (Lovaković, 2020; Huayanay, 2018). Por su parte Calero Huamán (2023) refiere que afecta principalmente a los riñones, con vida media de entre 10 a 35 años, considerándolo como probable cancerígeno para humanos.

Figura 6

Distribución del cadmio en la naturaleza



Nota. La figura se refiere a la distribución del cadmio en la naturaleza. Tomado de Huayanay (2018, p. 24).

El cadmio a menudo se encuentra en tuberías o productos galvanizados de zinc que se utilizan en sistemas de circulación de agua domésticos o industriales (Cossío Herrera, 2015). Con el tiempo, estos productos se desgastan y generan desechos, especialmente óxidos de cadmio, que se filtran al agua, causando contaminación y deterioro (Lovaković, 2020). Las plantas tienen la capacidad de absorber cadmio, lo que se convierte en la principal vía de entrada de este metal en la cadena alimentaria (Macha, 2019). El aumento de concentración de este elemento depende del pH del suelo, aproximadamente el 5% del cadmio presente en los alimentos es asimilado por el cuerpo humano, pero este porcentaje puede aumentar hasta el 15% en caso de deficiencia de hierro (De la Cruz et al., 2015). El cadmio tiende a acumularse principalmente en el hígado y los riñones. (Cossío,

2015). La toxicidad crónica del cadmio puede causar daño renal, hipertensión, así como lesiones en los huesos y los pulmones (Marcano, 2000). Los compuestos de cadmio han sido clasificados por la Agencia Internacional de investigación de cáncer (IARC) como probables cancerígenos (Ninatanta-Ortiz et al., 2016).

c) Arsénico

El arsénico es un elemento químico considerado como metaloide, lo que significa que exhibe propiedades tanto de metales como de no metales. A nivel químico, el arsénico presenta una estructura cristalina similar a la de los metales, pero su comportamiento químico muestra características no metálicas distintivas.

En términos de su estructura, el arsénico puede formar cristales con una disposición ordenada de átomos, aunque su apariencia física puede variar entre formas metálicas, grises o amarillentas, y formas no metálicas, más parecidas al vidrio. Su conductividad eléctrica es baja en comparación con los metales, pero es mayor que la de los no metales. Además, el arsénico exhibe propiedades semiconductoras, lo que lo hace valioso en aplicaciones como la industria electrónica.

El arsénico es conocido por su alta toxicidad para los seres humanos y otros organismos. Los compuestos de arsénico pueden ser extremadamente perjudiciales para la salud, causando una serie de problemas, desde trastornos gastrointestinales agudos hasta efectos crónicos como cáncer de piel, pulmón, vejiga y otros problemas de salud graves. Aunque el arsénico comparte algunas propiedades estructurales con los metales, su comportamiento químico y su impacto en la salud y el medio ambiente lo distinguen significativamente de ellos.

Se trata de un elemento químico que se encuentra en la tabla periódica de los elementos, específicamente en el grupo VA, también conocido como nitrogenoides (Macha, 2019). Esta sustancia se encuentra naturalmente en aguas geotermales, rocas ígneas (volcánicas) y rocas sedimentarias (Çeliker et al., 2019). Tiene un número atómico de 33 y un peso atómico de 74.19 (Çeliker et al., 2019).

Es de color gris plateado, prácticamente insípido e inodoro (Lovaković, 2020). No se disuelve en agua, sustancias cáusticas u oxidantes (Lovaković, 2020). Además, se encuentra en muchas formas alotrópicas (amarilla, negra y gris metálico) y forman óxidos de tipo anfótero y muy difundido en la corteza terrestre, comúnmente formando compuestos, encontrándose generalmente en un estado de oxidación +5, aunque en condiciones anaeróbicas se encuentra con el estado de oxidación +3, en aguas naturales se suele presentar entre 1 a 2 $\mu\text{g/L}$, llegando en el agua subterránea a 12 mg/L con los sulfuros y depósitos sedimentarios (Macha, 2019; Calero, 2023; Ferrer, 2003). El As pentavalente es 5-10 veces menos tóxico que el trivalente y los derivados orgánicos son menos tóxicos que los inorgánicos, la dosis letal oral probable en humanos de trióxido de arsénico está entre 10 y 300 mg , la concentración normal en sangre es inferior a 5 $\mu\text{g/l}$, la OMS fija el límite máximo del As en agua en 10 $\mu\text{g/l}$, aunque es frecuente que el agua subterránea exceda mucho esta concentración (Ferrer, 2003, p. 10).

El arsénico se encuentra de manera natural en diversas fuentes, como rocas sedimentarias, rocas volcánicas y aguas geotermales (Çeliker et al., 2019). En la naturaleza, suele estar presente en forma de compuestos como sulfuro de arsénico, arsenopirita, arsenato o arsenito, tanto en aguas superficiales como subterráneas (Moreno, et.al, 2018). La forma más común del arsénico en estas fuentes es la trivalente, aunque también puede encontrarse en forma pentavalente, este elemento puede ingresar al medio ambiente como resultado de su uso en insecticidas, herbicidas, esterilizantes del suelo, decolorantes de vidrio, defoliantes, antiparasitarios y en descargas industriales (Çeliker et al., 2019).

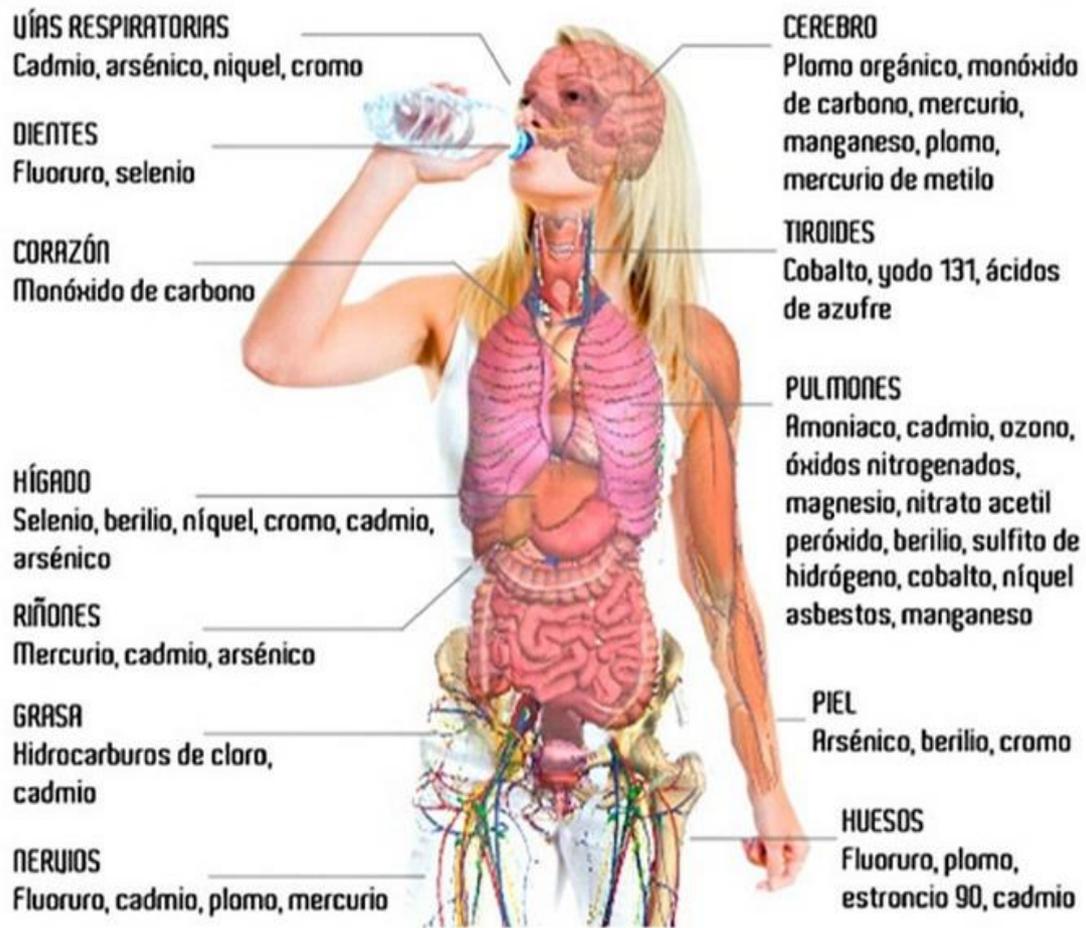
El arsénico puede filtrarse en el agua potable a través de procesos naturales de interacción con las rocas, diversos estudios han asociado la ingesta crónica de agua contaminada con arsénico con la aparición de enfermedades crónicas como diabetes mellitus, hipertensión arterial, anemia megaloblástica, trastornos gastrointestinales y afecciones cutáneas relacionadas con la exposición al arsénico (como melanosis, melanodermia, banda de Mees, discromía en forma de

gotas de lluvia y queratosis) (Lovaković, 2020). La Organización Mundial de la Salud ha establecido un límite de concentración de 10 µg/L de arsénico en el agua potable destinada al consumo humano (Çeliker et al., 2019).

En el Perú, se han encontrado concentraciones de arsénico en las personas superiores a 30 veces los valores referenciales de toxicidad para arsénico (de la Salud, 2002). Se absorbe por todas las vías con la eficacia suficiente para producir toxicidad, aunque por vía digestiva la eficacia es superior al 90% (Ferrer, 2003, p. 10). La existencia de metales pesados en el agua potable constituye un riesgo para la salud pública (Çeliker et al., 2019). Entre estos metales, el arsénico (As), el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) son especialmente destacados debido a su alta toxicidad (Macha, 2019). La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) clasifica tanto al arsénico como al cadmio en el Grupo 1, que incluye sustancias reconocidas como cancerígenas para los seres humanos (Cossío, 2015). El Pb está catalogado en el grupo 2B, como posible carcinógeno (Moreno-Rivas & Ramos-Clamont Montfort, 2018).

Figura 7

Factores metabólicos asociados con la ingestión de arsénico, cadmio y plomo



Nota. La figura representa a factores metabólicos asociados con la ingestión de arsénico, cadmio y plomo. Tomado de Moreno et al. (2018, p. 53).

Tabla 4

Factores metabólicos asociados con la ingestión de arsénico, cadmio y plomo

Características	Arsénico	Cadmio	Plomo
Formas químicas más tóxicas	Arsenato (As^{5+}) y arsenito (As^{3+})son las especies más frecuentes en agua; bastante tóxicas (Çeliker et al., 2019).	Son muy tóxicas, el Cd^{2+} es soluble en agua en un amplio rango de pH. (Marcano, 2000).	Son tóxicas, en agua se encuentra disuelto en forma de sulfatos e hidróxidos, a pH ácido se encuentra como Pb^{2+} (Cossío Herrera, 2015).
Principales rutas de entrada	Ingestión	Ingestión e inhalación	Ingestión e inhalación

Absorción después de ingestión (%)	> 80	5	10
Cinética y metabolismo	Se distribuye en tejidos blancos; se metaboliza mediante reacciones REDOX y destilación (Çeliker et al., 2019).	Distribuido en hígado y riñón, formando complejos con metaloproteínas (Moreno-Rivas & Ramos-Clamont Montfort, 2018).	Se une a proteínas de eritrocitos y se acumula en tejidos suaves y huesos. (Huaranga Moreno et al., 2022).
Vida media biológica	Las especies inorgánicas se excretan después de 3 a 5 días.	> 10 años	En sangre 20 a 40 días, en tejidos y huesos 10 a 30 años
Principal vía de excreción	Orina	Orina	Orina
Principales órganos de acumulación	Tejidos queratinosos	Hígado y riñón	Huesos, riñones e hígado
Toxicidad aguda	Dolor abdominal, vómito, diarrea, disminución del volumen sanguíneo; Neuropatía periférica; falla multiorgánica, muerte (Çeliker et al., 2019).	Pérdida de fluidos, shock, edema pulmonar, hipotensión, oliguria, falla multiorgánica; muerte (Lovaković, 2020).	Nefritis, hipertensión, encefalopatía; dolor abdominal, vómito, convulsiones, coma; daño hepático y renal (Macha, 2019).
Toxicidad crónica	Desarrollo de lesiones en la piel; neurotoxicidad, ataxia; anemia; leucopenia; cáncer en pulmón, riñón, hígado y vejiga (Çeliker et al., 2019).	Fallo renal, osteoporosis, anemia, cáncer en pulmón, riñón, seno y próstata (De la Cruz et al., 2015).	Neuro y nefrotoxicidad, alteraciones psicomotoras, hipertensión, daño cardiovascular y del sistema hematológico; posible cáncer en pulmón, estómago, cerebro y riñón (Barrientos Alvarez, 2015).

Nota. Esta tabla refiere a factores metabólicos asociados con la ingestión de arsénico, cadmio y plomo. Tomado de Moreno Rivas y Ramos Ramon (2018, p. 54).

1.7 Aguas superficiales

De acuerdo con Marín (2018) las aguas superficiales hacen referencia al agua que se encuentra en la superficie terrestre, como ríos, lagos, arroyos, embalses y océanos. Estos cuerpos de agua son esenciales para los ecosistemas, la vida silvestre, la agricultura, el suministro de agua potable y las actividades humanas. Estas pueden provenir de diversas fuentes, como el derretimiento de nieve, la precipitación directa, los desbordamientos de ríos y corrientes subterráneas que emergen en la superficie. A menudo, actúan como receptores de aguas pluviales y de escorrentía, transportando sedimentos, nutrientes y contaminantes hacia otras áreas o cuerpos de agua.

La calidad del agua superficial es crucial para su uso sostenible. Su estado puede variar debido a factores naturales, como cambios estacionales o geográficos, pero también puede ser impactada por actividades humanas, como la descarga de desechos industriales, agrícolas o urbanos, generando problemas de contaminación que afectan la salud humana, la vida acuática y la biodiversidad. Por ello, su monitoreo y gestión adecuada son fundamentales para garantizar su preservación y utilización sostenible (Huerta Vásquez, 2009).

Riesgos en las aguas superficiales

La contaminación a raíz de las actividades del hombre y también proveniente naturalmente, generó contaminantes como arsénico, cadmio, mercurio y plomo contenido en el agua, estas se bioacumulan en los alimentos superando los límites máximos permisibles establecidos, ingresando al cuerpo humano por contacto, consumo e inhalación, comprometiendo a la salud humana en el mundo. Estos al ingresar en el cuerpo humano, afectan los órganos vitales y modifican la estructura del ADN, alteraciones que producen diferentes tipos de cáncer, producto de la experimentación en animales y hallazgos en humanos,

evidenciándose que los individuos expuestos a residuos peligrosos como Pb, Cd y As, presentan una alta prevalencia de intoxicación en sitios contaminados con desechos metalúrgicos, aguas residuales y escorrentía agrícola (Calero Huamán, 2023).

La contaminación de metales en aguas superficiales representa un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. La presencia de metales como el mercurio, plomo, cadmio y arsénico, entre otros, puede tener efectos devastadores en la vida acuática. Estos metales, incluso en concentraciones bajas, pueden ser altamente tóxicos para los organismos acuáticos, alterando su desarrollo, dañando órganos vitales y, en casos extremos, provocando la muerte (Méndez, 2009).

La acumulación de metales en los tejidos de peces, plantas acuáticas y otros seres vivos puede desencadenar problemas graves en la cadena alimentaria. Los depredadores que se alimentan de organismos contaminados pueden acumular concentraciones aún mayores de estos metales, lo que aumenta el riesgo para la salud humana al consumir alimentos contaminados. Esto puede dar lugar a enfermedades graves, afectando especialmente el sistema nervioso y el desarrollo en niños y fetos (Pabón, 2020).

Además de los impactos directos en la vida acuática, la contaminación por metales puede alterar drásticamente los ecosistemas acuáticos. Puede reducir la biodiversidad al afectar a especies sensibles o importantes en la cadena alimentaria, modificar las interacciones naturales entre diferentes organismos y disminuir la productividad biológica en general.

La regulación y control de la descarga de metales en aguas superficiales son fundamentales para mitigar estos riesgos. Estrategias de tratamiento de aguas residuales, políticas de gestión de residuos industriales y prácticas de agricultura sostenible son algunas de las medidas necesarias para prevenir la contaminación y proteger la calidad del agua, preservando así la salud de los ecosistemas acuáticos y la seguridad de las comunidades humanas que dependen de ellas (Tejada-Tovar, 2015).

1.8 Espectrofotómetro de absorción atómica de flama

Para Vega (2018) el espectrofotómetro de absorción atómica de flama es una herramienta analítica utilizada en química para determinar la concentración de diferentes elementos metálicos presentes en una muestra líquida mediante la medición de la absorción de luz.

El proceso comienza con la preparación de la muestra, que se introduce en una llama de alta temperatura dentro del espectrofotómetro. La llama descompone la muestra en átomos individuales, liberando los elementos metálicos presentes en forma de vapor atómico. Luego, una fuente de luz, comúnmente una lámpara de cátodo hueco, emite radiación de longitud de onda específica, generalmente en el rango de la luz ultravioleta o visible. Esta luz atraviesa la llama y la muestra, y parte de ella es absorbida por los átomos de los elementos presentes en la muestra (Stirling, 2007).

Un detector en el espectrofotómetro registra la cantidad de luz absorbida a una longitud de onda específica. Al comparar la cantidad de luz absorbida con la concentración conocida de la sustancia estándar, se puede determinar la concentración de los elementos en la muestra original. La técnica es altamente precisa y selectiva, permitiendo la identificación y cuantificación de múltiples elementos metálicos en una muestra líquida con muy bajos límites de detección. Por tanto, es ampliamente utilizada en áreas como la química ambiental, la metalurgia, la industria farmacéutica y la investigación científica para analizar la composición de muestras líquidas y determinar la presencia y cantidad de elementos metálicos (Çeliker et al., 2019).

La técnica utilizada fue mediante la técnica de espectrofotómetro de absorción atómica de flama (THERMO SCIENTIFIC IC 3500 SERIES), se empleó para determinar la presencia de metales y algunos no metales en soluciones (Macha, 2019) Este método combina y mejora técnicas ya existentes para el análisis de agua, aguas residuales y residuos sólidos (Torres Saavedra, 2018). Antes de someter las muestras al análisis, es necesario filtrarlas adecuadamente y conservarlas en ácido para minimizar posibles interferencias (Menezes et al.,

2020). En el caso de muestras sólidas y acuosas que contengan elementos no disueltos (como suelos, lodos, sedimentos y muestras acuosas con partículas y sólidos en suspensión), se requiere una etapa previa de digestión o extracción para determinar la concentración total de los analitos recuperables (Gamarra Avila & Uceda León, 2017). Se toma una muestra acuosa o sólida bien mezclada y homogénea, y se mide o se toma una alícuota precisa para su procesamiento posterior, para el análisis recuperable total de una muestra sólida o acuosa que contiene material no disuelto, los analitos se solubilizan primero mediante reflujo suave como ácido nítrico (HNO_3) y clorhídrico (HCl) (Stirling, 2007; Çeliker et al., 2019).

CAPÍTULO II

EFICIENCIA DE BIOADSORCIÓN DE VEGETALES SILVESTRES SOMETIDOS A METALES Y METALOIDE CONTENIDO EN AGUA SUPERFICIAL

3.1 Razones de la investigación

En minería, el hombre a través de los procesos productivos genera alteraciones al medio ambiente, en particular, parte del resultado del proceso metalúrgico no se excusa de esto, en vista de que los residuos producidos, en los efluentes, aún en el transitar tecnológico del presente siglo XXI, no se llega a controlar eficientemente emisiones con metales pesados tóxicos que continúan desembocando en corrientes acuíferas, afectando y disminuyendo cada vez más los escasos recursos naturales, importantes para la sobrevivencia humana y cualquier variedad de vida (Rahman et al., 2022).

Los contaminantes inorgánicos son peligrosos para los seres vivos son metaloides y metales pesados los cuales representan un peligro que provienen de las actividades mineras que ocasionan pérdidas irreversibles de recursos naturales (Lagua López, 2021 & Gupta et al., 2021). Así mismo, en los países en vías de desarrollo más del 82% de las aguas residuales son descargadas a las cuencas hidrográficas sin tratamiento alguno, afectando las zonas costeras, lagos y ríos, con metaloides y metales pesados en aguas provenientes de las industrias mineras, que son muy tóxicos para la fauna terrestre, flora y acuática (Lagua López, 2021).

Por otro lado, existen diversas especies vegetales silvestres, que crecen en suelos donde hay minerales los cuales tienen función fitorremediadora en zonas de pasivos mineros (Vizcaíno Mendoza & Fuentes Molina, 2015). También, otras fuentes de conocimientos mencionan a la bioadsorción, como técnica o método fisicoquímico que incluye la adsorción y absorción, capaces de retener compuestos inorgánicos de aguas contaminadas, gran potencial para realizar remediación de medio ambiente (Pinzón & Vera, 2009). En este proceso o exploración de opciones de estudio, se encuentra entre otras, la bioadsorción con la planta diente de león (*Taraxacum officinale*), chilca (*Baccharis salicifolia*) y cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*), para remover iones de metales pesados, como un potencial bioabsorbente que puede ser utilizada como una alternativa para lograr remoción de metales pesados generados por los procesos

industriales; puede absorber metales que representan alto riesgo para la salud, el ambiente y los recursos naturales.

Teóricamente se justifica a través de la implementación de medidas efectivas de gestión ambiental y mitigación, incluyendo la captura y tratamiento de aguas residuales mineras, la restauración de áreas afectadas y la implementación de prácticas mineras sostenibles que reduzcan la liberación de metales tóxicos. Además, es importante monitorear de cerca la calidad del agua y su impacto en la salud y el medio ambiente. La mitigación de los impactos ambientales de la minería es un desafío importante que requiere una cooperación estrecha entre la industria, las autoridades regulatorias y las comunidades locales para proteger los recursos naturales y la salud de las personas. Asimismo, prácticamente los beneficios directos que aporta la investigación en términos de eficacia del agua, salud humana, sostenibilidad ambiental, economía local y cumplimiento normativo son cruciales para la comunidad local de la región de Huancavelica con los beneficios eficientes del agua al identificar plantas silvestres y desechos locales efectivos como bioadsorbentes para reducir los niveles de metales y metaloides tóxicos en el agua, se mejora la eficacia del agua disponible en la región.

Esto significa que el agua se vuelve más segura para el consumo humano y la agricultura, lo que puede tener un impacto directo en la calidad de vida de la comunidad, la salud humana al garantizar que el agua utilizada para beber y riego esté libre de contaminantes peligrosos, se protege la salud de la población local. La exposición a metales y metaloides tóxicos puede causar enfermedades graves, por lo que reducir esta exposición tiene un impacto positivo en la salud de la comunidad. En cuanto a la sostenibilidad ambiental el uso de plantas silvestres y materiales locales como bioadsorbentes es una práctica sostenible que no solo resuelve un problema de contaminación, sino que también promueve la conservación de la biodiversidad local y reduce la necesidad de productos químicos sintéticos, consecuentemente la economía local encontraría soluciones locales y sostenibles para el problema de la contaminación, se promueve la

economía local. Esto puede incluir la generación de empleo en la recolección y procesamiento de plantas y desechos, así como la promoción de prácticas agrícolas y ganaderas más seguras y productivas.

La justificación social en este contexto tuvo mejora de calidad de agua en Cochaccasa, garantizando que las personas en esta comunidad tengan acceso a agua potable y segura. Esto es esencial para proteger la salud de la población y prevenir enfermedades transmitidas por el agua para la protección de la salud evitando la contaminación del agua y graves consecuencias en la salud de las personas, como enfermedades gastrointestinales, infecciones y problemas a largo plazo, tener acceso al recurso agua, esencial para la vida y el bienestar de cualquier comunidad. Al garantizar el acceso a agua limpia, se mejora la calidad de vida de las personas al eliminar la necesidad de recurrir a fuentes de agua potencialmente contaminadas o peligrosas. El fomento de la participación de la comunidad en la resolución de problemas ambientales no sólo empodera a los residentes locales, sino que también promueve un sentido de comunidad y solidaridad. Esto tendrá un impacto positivo en la cohesión social y el trabajo conjunto para abordar otros desafíos locales, generando impacto positivo duradero al abordar la contaminación del agua en Cochaccasa y establecer un modelo efectivo, la investigación tiene el potencial de generar un impacto a largo plazo en la calidad de vida de la comunidad. La mejora del acceso al agua limpia puede beneficiar a generaciones futuras y servir como un ejemplo para otras comunidades que enfrentan problemas similares.

Metodológicamente se justifica por la elección de la bioadsorción como método y otros elementos clave se basa en la bioadsorción como método crucial, ya que es una técnica efectiva para la eliminación de contaminantes en el agua. La capacidad de los organismos vivos o sus productos derivados para adsorber y retener contaminantes puede ser altamente efectiva y sostenible, lo que justifica su elección en este contexto, la utilización de recursos locales demuestra una consideración importante por la sostenibilidad y la adaptación a las condiciones específicas de Cochaccasa. Esto garantiza que la metodología sea apropiada para

el entorno y puede ser implementada sin depender en exceso de recursos externos, validando científicamente la credibilidad de la metodología.

La elección de un enfoque basado en evidencia científica respalda la efectividad y la confiabilidad de la bioadsorción como método para abordar la contaminación del agua, dado que las condiciones ambientales y las características del agua pueden variar significativamente de un lugar a otro, la consideración de las variables locales es fundamental. Asegura que la metodología sea aplicable y efectiva en el contexto específico de Ccochaccasa, esta metodología se puede replicar en otros lugares con problemas similares de contaminación del agua es esencial para su relevancia y utilidad a nivel global.

Legalmente en este contexto, el cumplimiento de leyes y regulaciones, garantiza que la investigación se realice con un acercamiento al cumplimiento de normas y regulaciones aplicables en el Perú, respetando los derechos de las comunidades locales tanto individuales como colectivos, esto incluye el derecho a un entorno saludable y al acceso a agua limpia. El respeto por estos derechos es un imperativo legal y ético, y es necesario para evitar posibles conflictos legales y sociales.

3.2 Objetivo de la investigación

El objetivo principal de este proyecto fue determinar y evaluar la eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres sometidos a metales y metaloides en agua superficial proveniente de yacimientos mineros del Centro poblado de San Pedro de Mimosa del distrito de Ccochaccasa, provincia de Angaraes, departamento de Huancavelica, específicamente determinar y evaluar la eficiencia del diente de león (*Taraxacum officinale*), la chilca (*Baccharis salicifolia*) y la cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) como bioadsorbentes del arsénico, cadmio, y plomo contenido en agua superficial, asimismo determinar la diferencia significativa de eficiencia de bioadsorción entre los vegetales silvestres en mención.

3.3 Método, diseño y tipo de investigación

3.3.1 Método de investigación

Dado que se está investigando la presencia de metales y metaloides en muestras de agua y su absorción por vegetales silvestres, un enfoque experimental correlacional es apropiado. No fue necesario manipular deliberadamente las condiciones, ya que fue interés en comprender cómo ocurren estas relaciones en un entorno real.

Los resultados de un enfoque correlacional fueron altamente relevantes, ya que reflejan cómo los metales y metaloides se comportan en un entorno real. Esto proporcionó información valiosa para comprender los riesgos ambientales y de salud relacionados con la contaminación por estos elementos.

3.3.2 Diseño de investigación

El diseño utilizado en la presente investigación fue experimental (Alban et al., 2020) abordando el problema de la contaminación por metales pesados en los efluentes mineros en Ccochaccasa y Ocopa. El enfoque científico fue esencial para comprender y controlar el impacto de los bioadsorbentes en la concentración de As, Cd y Pb presentes en el agua superficial. Los bioadsorbentes utilizados fueron representativos de las plantas chilca, diente de león y cáscara de tuna, especies que se encuentran en la región. Las muestras como grupo control fueron agua superficial de Ccochaccasa y Ocopa, que no han sido sometidas a bioadsorbentes y los grupos experimentales sometidos al proceso de bioadsorbente, permitieron comparar y evaluar la eficiencia de adsorción a los metales y metaloide. El uso de la prueba de Tukey, fue para interpretar los resultados apropiados para una evaluación cuantitativa de la eficacia y significancia de la reducción de las concentraciones de metales pesados.

La investigación es de diseño transversal experimental donde el esquema del diseño es el siguiente:

Grupo de control 1:	GC1 R	O1
Grupo de control 2:	GC2 R	O2

Grupo experimental: GE R O3

Donde:

- GE: Grupo experimental.
- GC1: Grupo control 1 (agua superficial de Ccochaccasa).
- GC2: Grupo control 2 (agua superficial de Ocopa).
- R: Asignación aleatoria de las unidades objeto de estudio a los grupos.
- X: Variable independiente.
- O1: Medición de la variable independiente.
- O2: Medición de la variable dependiente.
- O3: Medida de la variable dependiente (variación de As, Cd y Pb) en el grupo experimental.

3.3.3 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, porque se realizó la manipulación de variables vegetales silvestres no comprobada, a través de un prototipo de filtro elaborado a nivel de laboratorio en condiciones controladas, con el fin de describir la eficiencia de adsorción de metales y metaloide en agua superficial (Lozada, 2014; Abad, 2015).

3.3.4 Procedimiento metodológico

a) Ubicación geográfica de los puntos de muestreo en campo

La georreferenciación del lugar de muestreo, se realizó con el programa informático Google Earth. La georreferenciación del lugar de muestreo utilizando el programa informático Google Earth es una práctica común y efectiva, es una herramienta de mapeo y visualización que permite a los investigadores ubicar con precisión los puntos de muestreo en un entorno geoespacial, haciendo accesible a proporcionar imágenes satelitales actualizadas, lo que permite a los investigadores obtener una vista precisa de la ubicación de

muestreo y sus alrededores, planificando ubicación de puntos de muestreo, de acuerdo al siguiente tabla 5:

Tabla 5

Ubicación de los puntos de muestreo de aguas y plantas silvestres

Puntos de muestreo	Latitud	Longitud	Altura m
• Riachuelo San Pedro de Mimosa- Ccochaccasa	-12,9169954	-74,7906846	4.080,48
• Bocamina Ocopa	-12,9416118	-74,7152329	3.236,65
• Mercado-Lircay (cáscara de tuna)	-12,9937274	-74,7235232	3.274.67
• Río Opamayo (diente de león y chilca)	-13,0005385	-74,7365158	3.292,06

b) Análisis de aguas en campo y laboratorio

— Muestreo de agua de campo

Proceso de recolección de muestra de agua superficial de riachuelo del anexo San Pedro de Mimosa-Ccochaccasa.

El punto de muestreo de agua superficial del riachuelo del anexo San Pedro de Mimosa, fue a 300 m debajo de la carretera, las cuales fueron recolectadas en envases de polietileno de 5 litros de capacidad debidamente limpio y rotulado, en el cual se evaluó parámetros físicos tales como pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y temperatura, luego se hizo proceso de estabilización con 3 mL de ácido nítrico al 50% (HNO₃ 1:1), para luego llevar dentro del hidroculer hasta el laboratorio de química de la FIMCA.

Figura 8

Recolección de muestra de aguas superficial del Riachuelo del anexo San Pedro de Mimosa Ccochaccasa



Toma de muestra de agua subterránea de bocamina Ocopa- Lircay.

El punto de muestreo de agua subterránea fue a 30 m al interior de la bocamina Ocopa ubicado en el centro poblado de Ocopa del distrito de Lircay, la recolección de la muestra de agua fue en un envase de polietileno de capacidad de 5 litros, debidamente limpio y rotulado, inmediatamente se realizó el proceso de estabilización con 3 mL de ácido nítrico al 50% (HNO_3 1:1), para luego llevar dentro del hidrocóoler hasta el laboratorio de Química.

Figura 9

Recolección de muestra de agua subterránea de bocamina Ocopa- Lircay



Control de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, temperatura y demanda de oxígeno) del riachuelo del anexo San Pedro de Mimosa y bocamina Ocopa procedentes del centro poblado Ocopa.

Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos con el multiparámetro EL METRON de las muestras obtenidas, con la finalidad de determinar el pH, conductividad, temperatura y demanda de oxígeno de los puntos de del Riachuelo del anexo de San Pedro de Mimosa, bocamina del Centro poblado de Ocopa, Rio Opamayo y el mercado abastos de Lircay, con la finalidad de determinar la calidad del agua según la normativa D.S. 010-2010-MINAM y el D.S. 004-2017-MINAM.

Tabla 6

Medición de los parámetros pH, conductividad, temperatura y demanda de oxígeno

Parámetros fisicoquímicos	Efluente	
	Riachuelo San Pedro Mimosa	Bocatoma Ocopa
Temperatura	14.35 °C	13.2 °C
pH	5.4	5.5
Conductividad	164.68 µS/cm	136.0 µS/cm
Oxígeno disuelto	11.3 mg/L	9.5 mg/L

Figura 10

Medición de los parámetros pH, conductividad, temperatura y demanda de oxígeno



Procesos de digestión en laboratorio:

— **Digestión del agua obtenidas de riachuelo y bocamina antes del proceso de bioadsorción con las plantas chilca, diente de león y cáscara de tuna**

El proceso de digestión de las muestras de agua se realizó en un equipo digestor de bloques de Marca DigiPREP SM SCP SCIENCE:

- Se tomaron 50 mL de cada una de las fuentes de muestras de agua debidamente mezclada.
- Trasvaso en un tubo de 50 mL por triplicado.
- Añadió 2 mL de ácido nítrico (HNO₃) y 1 mL de ácido clorhídrico (HCl) de concentración 50% (1:1).
- Temperatura de 85°C.

- Tiempo 240 minutos.
- enfriar en temperatura ambiente 10 minutos.
- enrasar con agua ultrapura hasta 50 mL.

Figura 11

Proceso de digestión de agua obtenidas de riachuelo y bocamina antes del proceso de bioadsorción



c) Análisis de plantas en campo y laboratorio Muestreo de plantas en campo

— Muestreo de diente de león (*Taraxacum officinale*), chilca (*Baccharis salicifolia*) y cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*)

La recolección de muestras de los vegetales silvestres diente de león (*Taraxacum officinale*), chilca (*Baccharis salicifolia*) y cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*), fueron extraídos en bolsas de muestreo, con la ayuda de una espátula cada 50 m de distancia en un área de 1,000 m² (una hectárea), el número de puntos de muestreo (NPM) se calculó según la siguiente ecuación, de acuerdo con el Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM.

$$\text{NPM} = 18 + 2.34 * A$$

Dónde:

NPM = Número de puntos de muestreo

A = Superficie en hectáreas

$$\text{NPM} = 18 + 2.34 * A = 20.34 \text{ redondeando } 20 \text{ puntos.}$$

Las muestras de diente de león y chilca fueron recolectadas de las márgenes derecho e izquierdo del río Opamayo, de un peso de 5 Kg cada uno y las muestras de cáscara de tuna de peso 5 Kg se recolectaron de los desechos de ventas ambulatorias del mercado de Lircay, los cuales fueron transportadas al laboratorio de química de la FIMCA- UNH.

— **Proceso de molienda de cada muestra**

Para la reducción de tamaño de las muestras deshidratadas chilca (*Baccharis salicifolia*), diente de león (*Taraxacum officinale*) y cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*), se utilizó el molino de acero inoxidable modelo SM-100 durante el tiempo promedio de 4 minutos, pasando por el tamiz 70 obteniendo el tamaño de 0.210 mm, luego se envasó en recipientes para evitar la contaminación y ser usado en siguientes procesos.

Figura 12

Proceso de selección, secado, molienda, de muestras de chilca, diente de león y cáscara de tuna



— **Proceso de incineración de chilca (*Baccharis salicifolia*), diente de león (*Taraxacum officinale*), y cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*)**

Las muestras deshidratadas, fueron pesadas en los crisoles limpios y secos por triplicado, con la ayuda de una balanza analítica de marca OHAUS, la cantidad

de 5g, las cuales fueron colocadas en el horno mufla marca NABERTHEM, durante 5 horas a la temperatura de 600°C, al término de este tiempo se retiró los crisoles con las muestras del horno mufla para su enfriamiento hasta temperatura ambiente.

Figura 13

Incineración de muestras de chilca, diente de león y cáscara de tuna



— Digestión de muestras de plantas chilca, diente de león y cáscara de tuna.

Las muestras incineradas fueron trasvasadas en tubos de 50 mL, en los crisoles las cenizas, la primera lavada fue con 40 mL de solución ácido clorhídrico ($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ 1:3), la segunda y tercera lavada fue con 10 mL con la misma solución para luego ser vertida en recipiente de 150 mL tapando con luna de reloj para luego agregar 5 gotas (0.25 mL) de ácido nítrico concentrado (HNO_3 68.5%), luego calentar en el bloque digestor digi PRI, hasta temperatura de ebullición durante 5 minutos, al término del tiempo se dejó enfriar hasta que sea manipulable para ser transferido a un matraz volumétrico de 100 mL, para el proceso de filtrado con la ayuda de un embudo que contiene papel filtro Whatman N° 40 y lavando los residuos del vaso 3 veces con agua ultrapura para ser aforado hasta 100 mL, finalmente fue trasvasado en tubos de 50 mL para la lectura con el espectrofotómetro de absorción atómica de flama marca THERMO SCIENTIFIC IC3500 SERIES.

Figura 14

Proceso digestión y filtrado de muestras de chilca, diente de león y cáscara de tuna.



— **Análisis con el equipo espectrofotómetro de absorción atómica**

Figura 15

Análisis con el equipo espectrómetro de absorción atómica



d) Proceso de bioadsorción de arsénico, cadmio y plomo por vegetales chilca, diente de león y cáscara de tuna de agua procedente del riachuelo de San Pedro de Mimosa y bocamina de Ocopa.

Para la bioadsorción con plantas chilca (*Baccharis salicifolia*), diente de león (*Taraxacum officinale*), y cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) de los elementos químicos (As, Cd y Pb), se diseñó un prototipo bioadsorbente, tomando algunas

consideraciones de (Sánchez Castro, 2014), los otros componentes fueron parte de los investigadores.

El diseño del prototipo bioadsorbente consta de una cabina de melamina movable, en la parte superior cuenta con 3 orificios de 20 cm de diámetro que sirvió como soporte para los envases que contiene las muestras de agua y en la parte inferior también cuenta con 3 orificios del mismo diámetro que sirvió como soporte para la recepción de muestras producto del proceso de bioadsorción, siendo en ambas caras de la cabina. En la parte central cuenta con tres abrazaderas de metal movibles que sujetan los cilindros de polietileno, cuyo diámetro fue de 3 cm, los cuales contiene 200 g de grava de ½ pulgada, luego 130 g de arena gruesa de 3 a 5 mm de diámetro finalmente 30 g de bioadsorbente cuya granulometría fue de 0.210 mm en promedio

La finalidad fue la simulación de un filtro para el proceso de bioadsorción. Las muestras de agua de ambas fuentes hídricas fueron alimentadas a los cilindros (filtro) por medio de mangueras de 0.5 cm diámetro, cayendo por gravedad gota a gota durante 4 horas tiempo de proceso de bioadsorción.

Figura 16

Cabina bioadsorbente y muestras de agua del proceso de bioadsorción con las plantas chilca, diente de león y cáscara de tuna



3.3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

a) Técnicas

Se utilizó como técnica de recolección de datos: la observación y evaluación.

Observación directa

Se observó los resultados de la determinación de cadmio, arsénico y plomo en las muestras.

Evaluación

Se realizó mediante la técnica de espectrofotómetro de absorción atómica de flama (THERMO SCIENTIFIC IC 3500 SERIES), en el laboratorio de química de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería de Minas Civil Ambiental (FIMCA) de la Universidad Nacional de Huancavelica (UNH), para la determinación de metales y metaloide (As, Cd y Pb) en muestras de agua superficial y subterránea y plantas silvestres diente de león (*Taraxacum officinale*), chilca (*Baccharis salicifolia*) y cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*).

b) Instrumentos

Tabla 7

Equipos utilizados en la preparación de las muestras

	Equipos	Unidades	Cantidad
Equipos	• Agitador magnético	Und	1
	• Espectrofotómetro de absorción atómica de flama	Und	1
	• Sistema purificador de agua	Und	1
	• Campana extractora de gases	Und	1
	• Bloque digestor	Und	1
	• Balanza analítica de precisión	Und	1
	• Estufa de secado	Und	1
	• Horno mucha	Und	1
	• Molino de acero inoxidable	Und	1
	• Tamizador	Und	1
	• Multiparámetro	Und	1

Tabla 8

Materiales utilizados en la preparación de muestras

	Equipos, materiales y reactivos	Unidades	Cantidad
Materiales	• Fiolas 10mL, 25mL, 50mL, 100mL	Und	9 de c/u
	• Beaker 50mL	Und	9
	• Placas Petri de vidrio estériles	Und	9
	• Termómetro	Und	9
	• Lunas de reloj	Und	24
	• Tubos de digestión	Und	6
	• Embudos	Und	3
	• Pizetas	Und	3
	• Tijeras	Paquete	3
	• Bolsas de muestreo	Paquete	2
	• Puntas para micropipeta de 20-200 μ L y 0.5- 5mL	Und	6
	• Bandejas Espátulas	Und	6

Tabla 9

Reactivos usados para la preparación de muestras

	Equipos, materiales y reactivos	Unidades	Cantidad
Reactivos	• Ácido nítrico al 68.5%	mL	20
	• Ácido clorhídrico al 37.5%	mL	15
	• Agua destilada	L	50
	• Estándar de cobre	mL	10
	• Estándar de plomo	mL	10
	• Estándar de cadmio	mL	10
	• Estándar de arsénico	mL	10

3.4. Consideraciones éticas

- **Impacto ambiental:** La investigación consideró cuidadosamente los posibles efectos negativos en el medio ambiente, especialmente en el contexto del yacimiento minero de Chochaccasa. Nos aseguramos de que los métodos utilizados para la recolección de muestras y la realización de experimentos no causen daño adicional al ecosistema local.

- **Derechos de las comunidades locales:** Las comunidades locales fueron consultadas y respetadas en todo momento. Incluyendo respetar sus derechos territoriales, culturales y económicos. La investigación no perjudicó a estas comunidades ni agravó su situación.
- **Evaluación de riesgos:** La investigación llevó a cabo una evaluación exhaustiva de los riesgos para la salud tanto para los participantes humanos como para los vegetales silvestres.
- **Beneficios y justicia:** Los resultados contribuirán al bienestar de la comunidad local y no solo a los intereses de la investigación o de terceros.
- **Transparencia y divulgación:** Los resultados de la investigación fueron comunicados de manera clara y accesible a las comunidades locales y a la sociedad en general. La transparencia es esencial para establecer la confianza y la legitimidad del estudio.
- **Ética en la publicación:** en su publicación se seguirán los estándares éticos de la publicación científica, incluyendo la atribución adecuada de fuentes y la divulgación de cualquier conflicto de intereses.

3.5. Resultados de la investigación

3.5.1 Resultado de parámetro médico

Tabla 10

Evaluación de parámetros fisicoquímicos de muestras de agua in situ.

Parámetros fisicoquímicos	Efluente	
	Riachuelo San Pedro Mimosa	Bocatoma Ocopa
Temperatura	14.35 °C	13.2 °C
pH	5.4	5.5
Conductividad	164.68 $\mu\text{S}/\text{cm}$	136.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Oxígeno disuelto	11.3 mg/L	9.5 mg/L

Tabla 11

Límites Máximos Permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento
pH	--	6 – 9
Arsénico total	mg/L	0,1
Cadmio total	mg/L	0,05
Plomo total	mg/L	0,2

Nota. Tomado del Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM (Ministerio del Ambiente, 2010).

Tabla 12

Estándares ambientales ECA para agua, Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetro	Unidad	Riego de vegetales
Conductividad	(μ S/cm)	2 500
Oxígeno disuelto	mg/L	≥ 4
Potencial de hidrógeno pH	---	6,5 – 8,5
Temperatura	°C	$\Delta 3$
Arsénico	mg/L	0,1
Cadmio	mg/L	0,01
Plomo	mg/L	0,05

Nota. Elaborado en base al Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (Ministerio del Ambiente, 2017).

3.5.2 Resultado del grupo de control N° 1: Aguas de efluentes

Los resultados se obtuvieron bajo el siguiente diseño:

Grupo de control 1: GC1 \longrightarrow R \longrightarrow O1

Donde:

- GC1: Grupo control 1 muestra de agua de riachuelo de San Pedro de Mimosa y muestras de aguas de bocamina Ocopa
- R: Asignación aleatoria de las unidades objeto de estudio a los grupos.

- O1: Medición de la variable independiente (bioadsorbentes vegetales silvestres chilca, diente de león y cáscara de tuna) objeto de estudio en el grupo control 1.

Tabla 13

Resultados de análisis de As en agua procedente de bocamina Ocopa y riachuelo San Pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción

Análisis de As en el grupo de control 1 en muestra de agua, con Límite de detección del equipo de 0,00154 (mg/L)		
Procedencia	Valor	Unidad
Agua de bocamina Ocopa	0.5498	mg/L
Agua de San Pedro de Mimosa	0.4643	mg/L
Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales	0.2	mg/L

Figura 17

Contenido de As en agua procedente de bocamina de Ocopa y riachuelo San Pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción

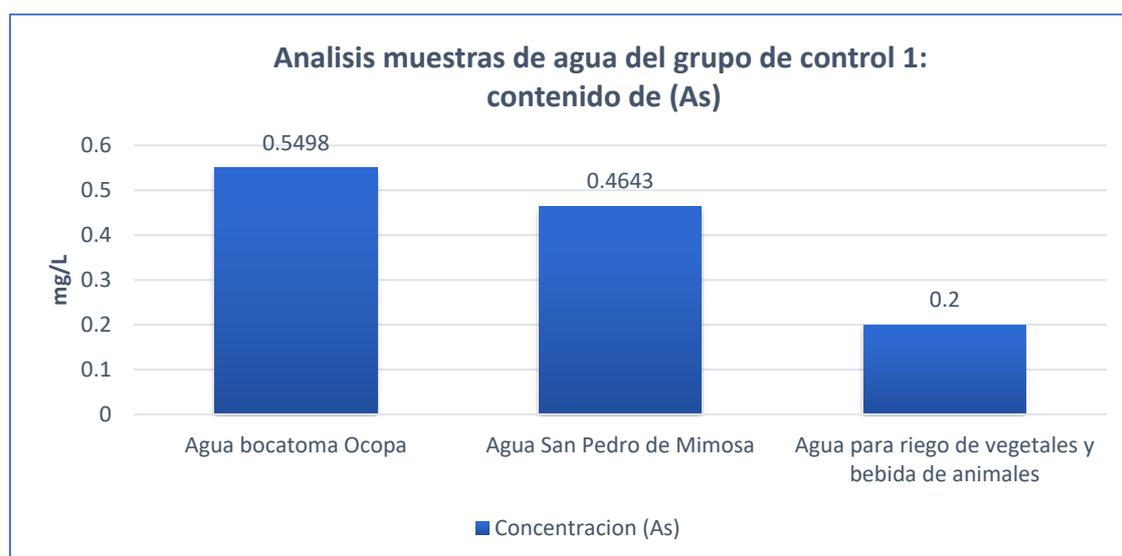


Tabla 14

Resultados de análisis de Cd en agua procedente de bocamina Ocopa y riachuelo San Pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción

Análisis de Cd en el grupo de control 1 en muestra de agua, con Límite de detección del equipo de 0,008 (mg/L)		
Procedencia	Valor	Unidad
Agua de bocamina Ocopa	0.0083	mg/L
Agua de San Pedro de Mimosa	0.0047	mg/L
Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales	0.2	mg/L

Figura 18

Contenido de Cd en agua procedente de bocamina de Ocopa y riachuelo San Pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción

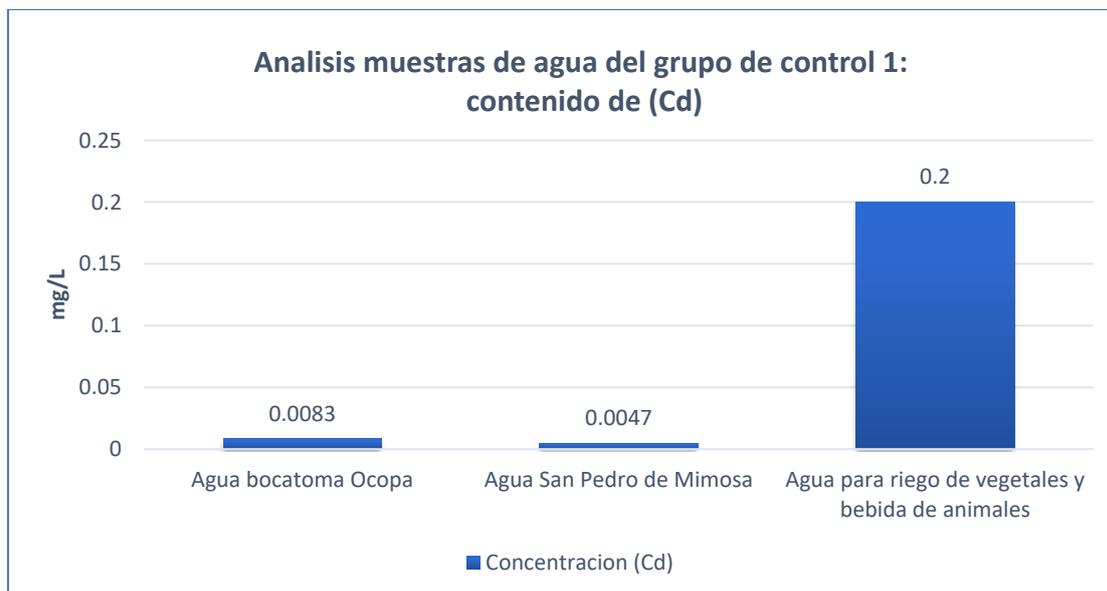


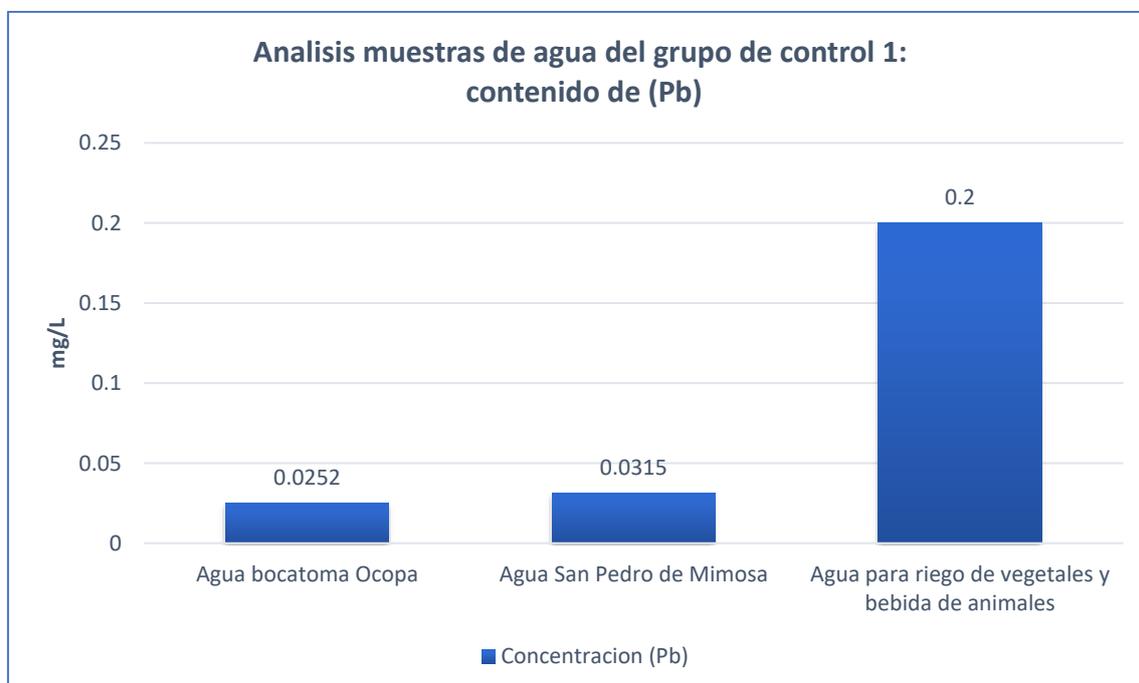
Tabla 15

Resultados de análisis de Pb en agua procedente de bocamina Ocopa y riachuelo San Pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción

Análisis de Pb en el grupo de control 1 en muestra de agua, con Límite de detección del equipo de 0,0015 (mg/L)		
Procedencia	Valor	Unidad
Agua de bocamina Ocopa	0.0252	mg/L
Agua de San Pedro de Mimosa	0.0315	mg/L
Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales	0.2	mg/L

Figura 19

Contenido de Pb en agua procedente de bocamina de Ocopa y riachuelo San Pedro de Mimosa antes del proceso de bioadsorción



3.5.3 Resultado del grupo de control N° 2: Vegetales bioadsorbentes

Los resultados se obtuvieron bajo el siguiente diseño:

Grupo de control 2: GC2 → R → O₂

Donde:

- **GC2:** Grupo control 2 muestra de bioadsorbentes vegetales silvestres chilca, diente de león y cáscara de tuna.
- **R:** Asignación aleatoria de las unidades objeto de estudio a los grupos.
- **O₂:** Medición de la variable dependiente (variación de As, Cd y Pb) objeto de estudio en el grupo control.

Tabla 16

Resultados de análisis de As en vegetales silvestres (chila, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción

Análisis de As en el grupo de control 2 en muestra de vegetales silvestres, con Límite de detección del equipo de 0,00154 (mg/kg)		
Procedencia	Valor	Unidad
Chilca	4.370	mg/kg
Diente de león	3.660	mg/kg
Cáscara de tuna	2.232	mg/kg

Figura 20

Contenido de As en vegetales silvestres (chilca, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción

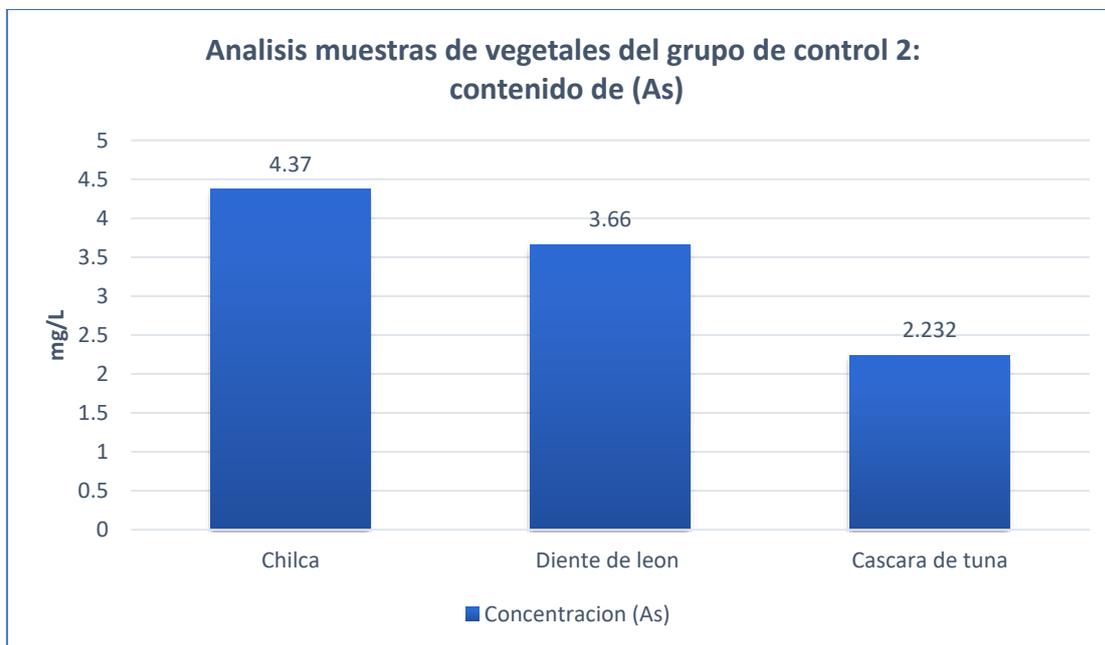


Tabla 17

Resultados de análisis de Cd en vegetales silvestres (chila, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción

Análisis de Cd en el grupo de control 2 en muestra de vegetales silvestres, con Límite de detección del equipo de 0,008 (mg/kg)		
Procedencia	Valor	Unidad
Chilca	0.0715	mg/kg
Diente de león	0.1645	mg/kg
Cáscara de tuna	0.0345	mg/kg

Figura 21

Contenido de Cd en vegetales silvestres (chilca, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción

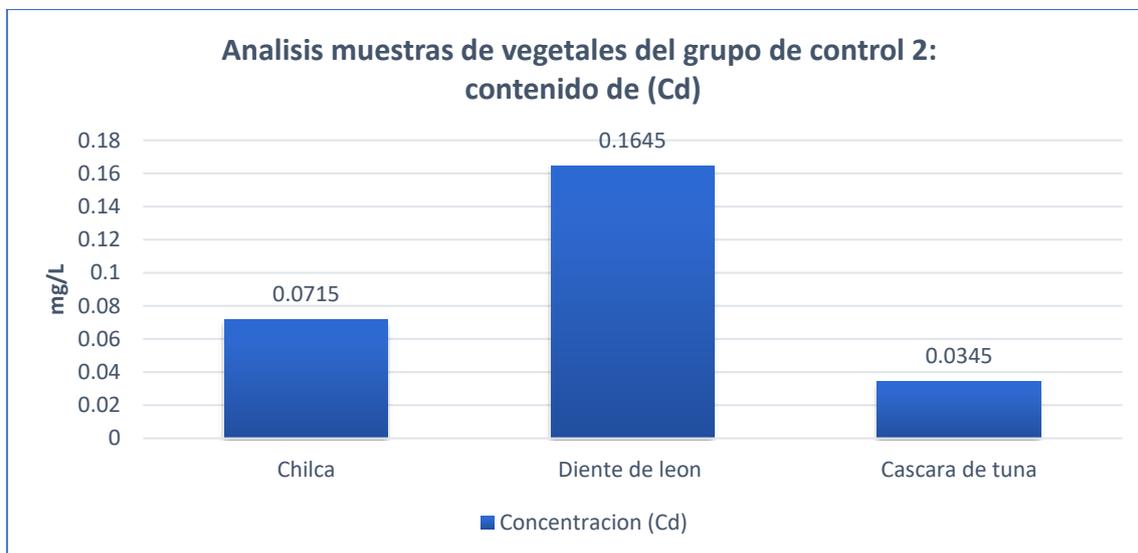


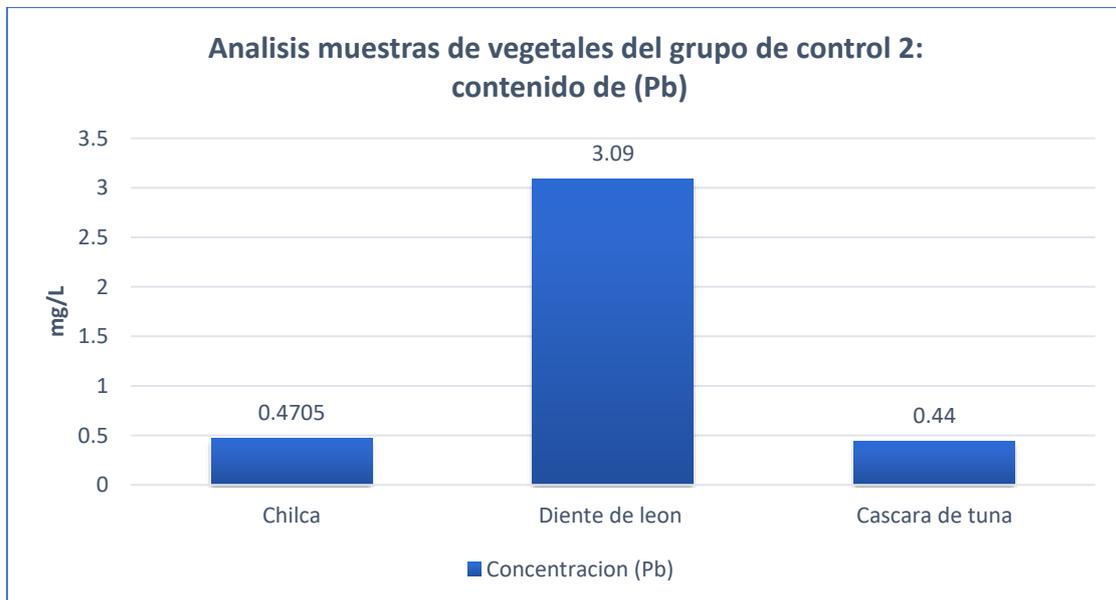
Tabla 18

Resultados de análisis de Pb en vegetales silvestres (chila, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción

Análisis de Pb en el grupo de control 2 en muestra de vegetales silvestres, con Límite de detección del equipo de 0,0015 (mg/kg)		
Procedencia	Valor	Unidad
Chilca	0.4705	mg/kg
Diente de león	3.0900	mg/kg
Cáscara de tuna	0.4400	mg/kg

Figura 22

Contenido de Pb en vegetales silvestres (chilca, diente de león y cáscara de tuna) antes del proceso de bioadsorción



3.5.4 Resultado del grupo experimental

Los resultados obtenidos se obtuvieron bajo el siguiente diseño

Grupo experimental: $G_E R X O_3$

Donde:

- **GE:** Grupo experimental muestra de agua del riachuelo de San Pedro de Mimoso y muestras de aguas de bocamina Ocopa.
- **R:** Asignación aleatoria de las unidades objeto de estudio a los grupos.
- **X:** Variable independiente (bioadsorbentes vegetales silvestres chilca, diente de león y cáscara de tuna).
- **O3:** Medición de la variable dependiente (variación de As, Cd y Pb) en el grupo experimental.

a) Resultados de muestras de la Bocamina de ocopa

Tabla 19

Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en agua de bocamina Ocopa

Planta	Unidad	N	Grupo experimental agua		
			As	Cd	Pb
			Media	Media	Media
Chilca	mg/L	3	0.3653	0.0019	0.0145
Diente de león	mg/L	3	0.2873	0.0013	0.0169
Cáscara de tuna	mg/L	3	0.4179	0.002	0.0212

Figura 23

Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en agua de bocamina Ocopa

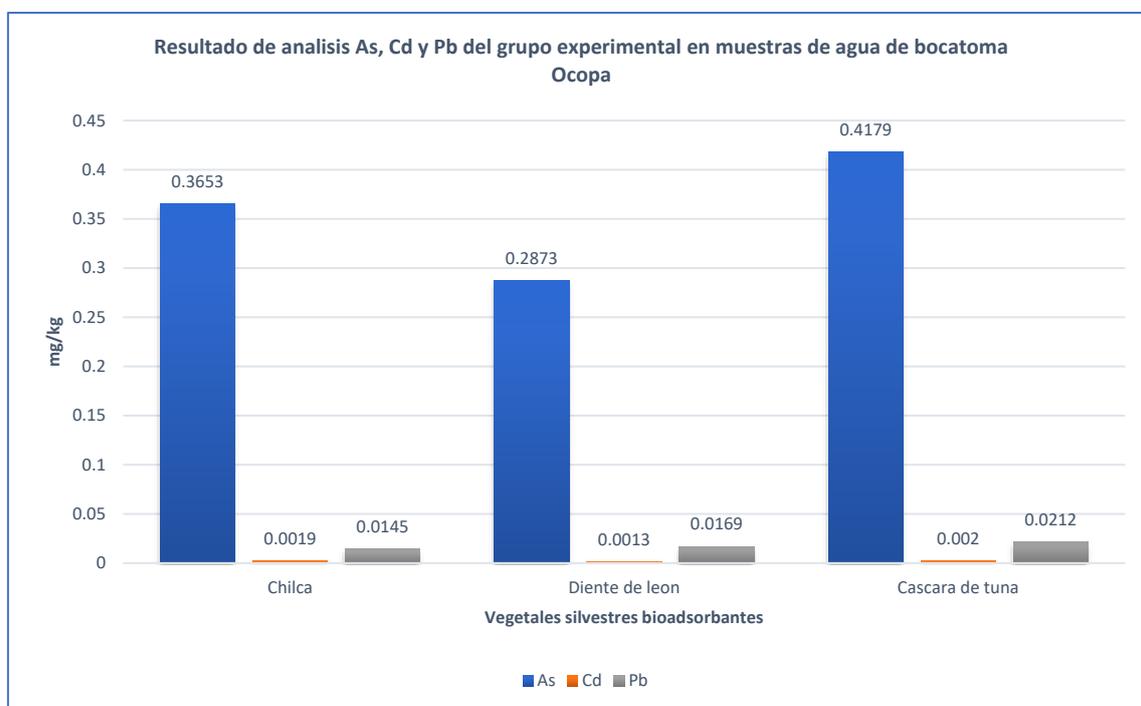


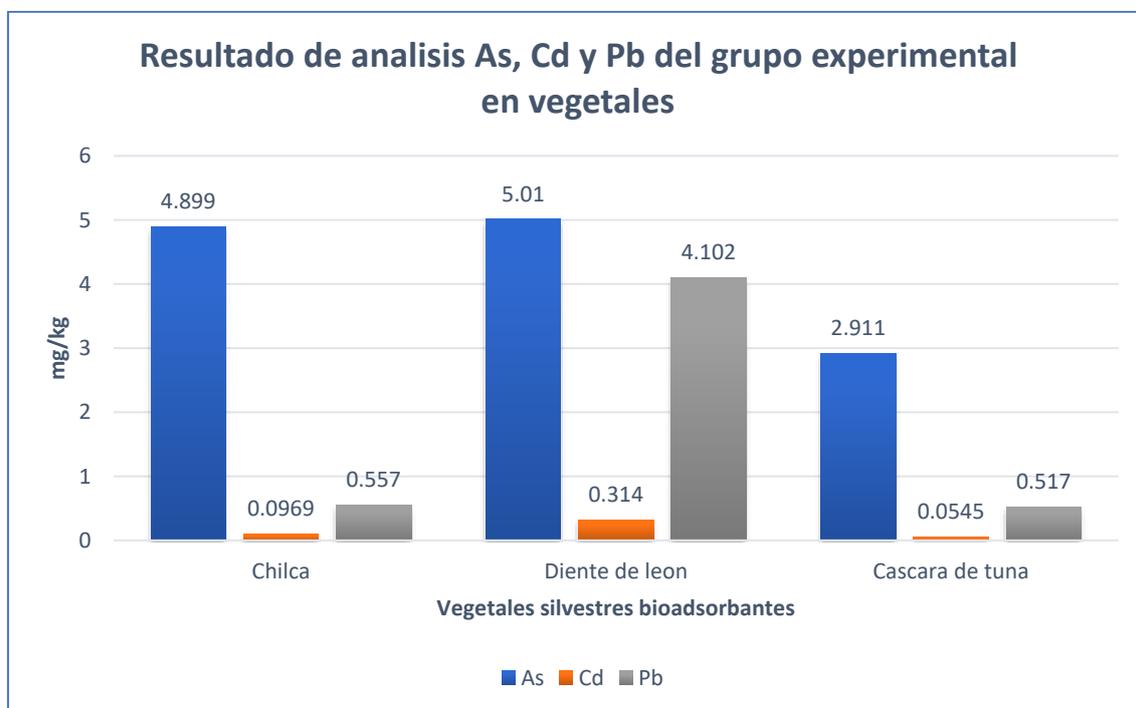
Tabla 20

Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en vegetales silvestres bioadsorbentes chilca, diente de león y cáscara de tuna, bocamina Ocopa

Planta	Unidad	N	Grupo experimental		
			As	Cd	Pb
			Media	Media	Media
Chilca	mg/kg	3	4.899	0.0969	0.557
Diente de león	mg/kg	3	5.01	0.314	4.102
Cáscara de tuna	mg/kg	3	2.911	0.0545	0.517

Figura 24

Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en vegetales silvestres bioadsorbentes chilca, diente de león y cáscara de tuna, bocamina Ocopa.



b) Resultados de muestras del riachuelo San Pedro de Mimosa

Tabla 21

Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en agua del riachuelo San Pedro de Mimosa

Planta	Unidad	N	Grupo experimental agua		
			As	Cd	Pb
			Media	Media	Media
Chilca	mg/L	3	0.3086	0.0031	0.0201
Diente de león	mg/L	3	0.2564	0.0029	0.0235
Cáscara de tuna	mg/L	3	0.3555	0.0039	0.0198

Figura 25

Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en agua del riachuelo San Pedro de Mimosa

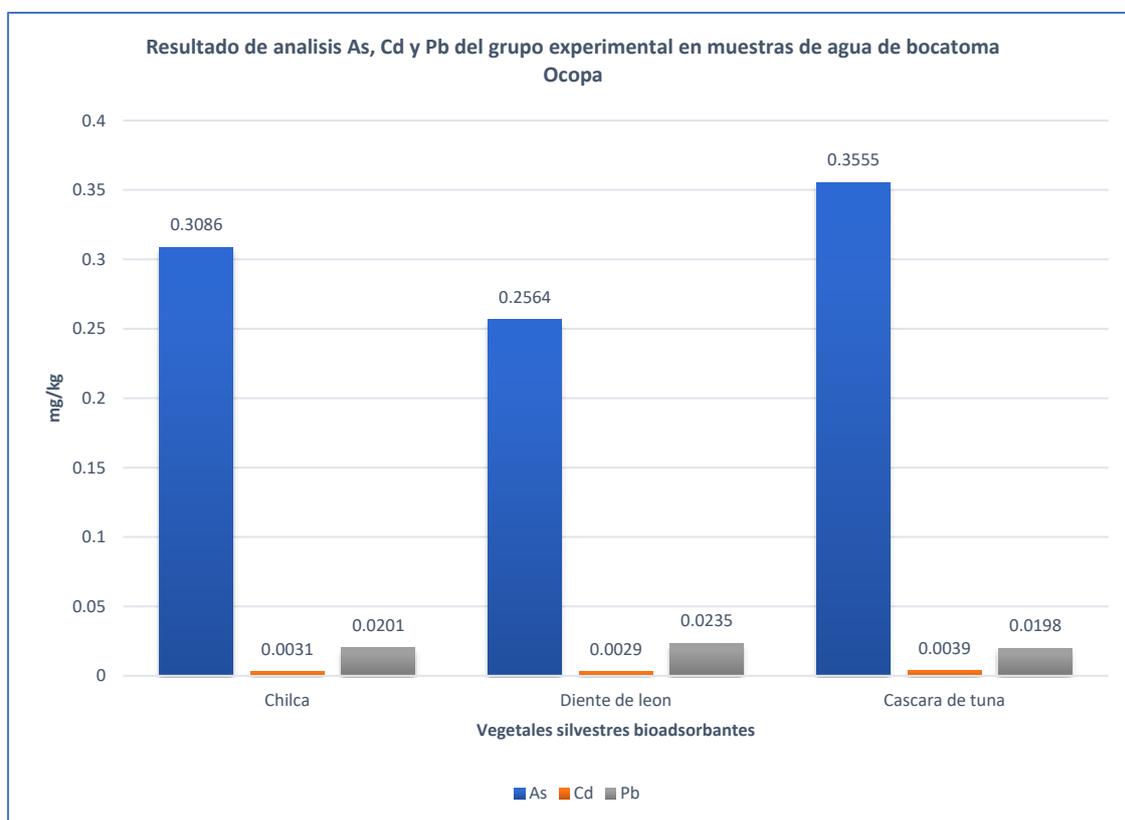


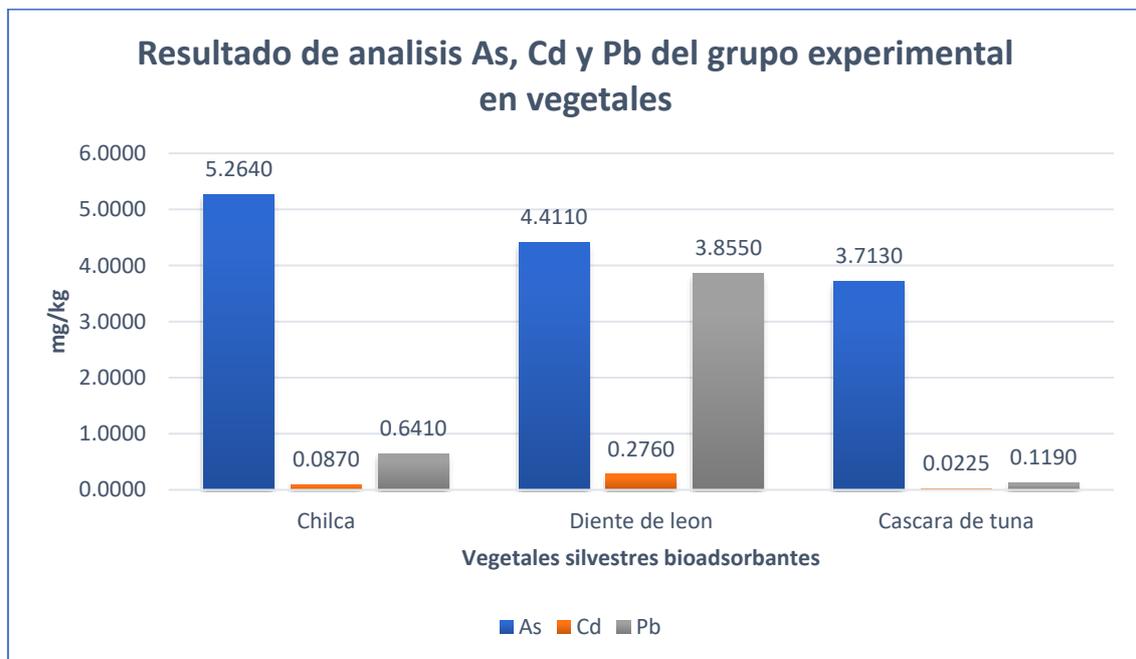
Tabla 22

Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en vegetales silvestres bioadsorbentes chilca, diente de león y cáscara de tuna del riachuelo San Pedro de Mimososa

Planta	Unidad	N	Grupo experimental		
			As	Cd	Pb
			Media	Media	Media
Chilca	mg/kg	3	5.2640	0.0870	0.6410
Diente de león	mg/kg	3	4.4110	0.2760	3.8550
Cáscara de tuna	mg/kg	3	3.7130	0.0225	0.1190

Figura 26

Resultados del análisis de As, Cd y Pb, en el grupo experimental en vegetales silvestres bioadsorbentes chilca, diente de león y cáscara de tuna del riachuelo San Pedro de Mimososa



3.5.5 Resultado de eficiencia en el agua y vegetales

a) Resultados de eficiencia de bioadsorción en el agua – bocamina Ocopa

Tabla 23

Resultados de eficiencia de adsorción de los vegetales chilca, diente de león, cáscara de tuna en muestras de aguas de bocatoma Ocopa

Planta	Und	N	Grupo control			Grupo experimental			Eficiencia		
			Análisis de agua			Análisis de agua			As	Cd	Pb
			As	Cd	Pb	As	Cd	Pb			
			Media	Media	Media	Media	Media	Media	%	%	%
Chilca	mg/L	3	0.5498	0.0083	0.0252	0.3653	0.0019	0.0145	33.56	77.11	42.46
Diente de león	mg/L	3	0.5498	0.0083	0.0252	0.2873	0.0013	0.0169	47.74	84.34	32.94
Cáscara de tuna	mg/L	3	0.5498	0.0083	0.0252	0.4179	0.002	0.0212	23.99	75.90	15.87

Según los resultados, el diente de león demostró ser especialmente eficaz en la reducción de la concentración de cadmio en el agua, logrando una impresionante reducción del 84.34%. Le siguen la chilca con un 77.11% y la cáscara de tuna con un 75.90%, ambas también mostrando una buena eficiencia en la reducción de cadmio en el agua.

En cuanto al plomo, la reducción de la concentración varió entre 15.87% y 42.46% para las diferentes plantas, lo que indica que también contribuyeron a la disminución del contenido de plomo en el agua.

Para el arsénico, se observaron reducciones que oscilaron entre 23.99% y 47.74%, lo que sugiere que las plantas también tuvieron un impacto significativo en la reducción de la concentración de arsénico en el agua de la bocamina Ocopa.

Tabla 24

Resultados de eficiencia en adsorción de los vegetales chilca, diente de león, cáscara de tuna después del proceso de adsorción en muestras de agua subterránea de bocamina Ocopa

Planta	Und	N	Grupo control			Grupo experimental			Eficiencia		
			Análisis en vegetales			Análisis en vegetales			As	Cd	Pb
			As	Cd	Pb	As	Cd	Pb			
			Media	Media	Media	Media	Media	Media	%	%	%
Chilca	mg/kg	3	4.370	0.072	0.471	4.899	0.097	0.557	12.11	35.52	18.38
Diente de león	mg/kg	3	3.660	0.165	3.090	5.010	0.314	4.102	36.89	90.88	32.75
Cáscara de tuna	mg/kg	3	2.232	0.035	0.440	2.911	0.055	0.517	30.42	57.97	17.50

Este resultado sugiere que el diente de león es una planta muy efectiva en la bioadsorción de cadmio de los vegetales silvestres, lo que puede ser importante para reducir la acumulación de este metal tóxico en la cadena alimentaria y proteger la salud de los consumidores. Además, sería beneficioso para la gestión de la contaminación ambiental.

b) Resultados de eficiencia de bioadsorción en el agua - riachuelo San Pedro de Mimosa

Tabla 25

Resultados de eficiencia en adsorción de los vegetales chilca, diente de león, cáscara de tuna en muestras de agua del riachuelo San Pedro de Mimosa

Planta	Und	N	Grupo control			Grupo experimental			Eficiencia		
			Análisis agua			análisis de agua					
			As	Cd	Pb	As	Cd	Pb	As	Cd	Pb
			Media	Media	Media	Media	Media	Media	%	%	%
Chilca	mg/L	3	0.4643	0.0047	0.0315	0.3086	0.0031	0.0201	33.53	34.04	36.19
Diente de león	mg/L	3	0.4643	0.0047	0.0315	0.2564	0.0029	0.0235	44.78	38.30	25.40
Cáscara de tuna	mg/L	3	0.4643	0.0047	0.0315	0.3555	0.0039	0.0198	23.43	17.02	37.14

Los resultados indican que las plantas han demostrado ser efectivas en la reducción de la concentración de cadmio en el agua del riachuelo San Pedro de Mimosa. El diente de león logró la mayor eficiencia con una reducción del 38.30%, seguido de la chilca con un 34.04% y la cáscara de tuna con un 17.02%.

En cuanto al plomo, la reducción de la concentración varió entre 25.40% y 37.14% para las diferentes plantas, lo que indica que también contribuyeron a la disminución del contenido de plomo en el agua.

Por otro lado, la bioadsorción del metaloide arsénico en el agua mostró reducciones que oscilaron entre 23.43% y 44.78%. Esto sugiere que las plantas también tienen un efecto positivo en la reducción de la concentración de arsénico en el agua del riachuelo.

Tabla 26

Resultados de eficiencia en adsorción de los vegetales chilca, diente de león, cáscara de tuna después del proceso de adsorción en agua del, riachuelo San Pedro de Mimosa

Planta	Und	N	Grupo control vegetales			Grupo experimental			Eficiencia		
			As	Cd	Pb	As	Cd	Pb	As	Cd	Pb
			Media	Media	Media	Media	Media	Media	%	%	%
Chilca	mg/kg	3	4.3700	0.0715	0.4705	5.264	0.087	0.641	20.46	21.68	36.24
Diente de león	mg/kg	3	3.6600	0.1645	3.0900	4.411	0.276	3.855	20.52	67.78	24.76
Cáscara de tuna	mg/kg	3	2.2320	0.0345	0.4400	3.713	0.022	0.119	66.35	34.78	72.95

En la Tabla 26, se presentan los resultados de la concentración de arsénico, cadmio y plomo en vegetales silvestres antes y después del proceso de bioadsorción. Los resultados muestran que la cáscara de tuna fue especialmente eficiente en la reducción de la concentración de plomo en los vegetales silvestres, logrando una reducción del 72.95%. Esto es importante ya que la reducción de la concentración de plomo en los vegetales es esencial para garantizar la seguridad alimentaria y prevenir la acumulación de este metal tóxico en la cadena alimentaria, lo que puede ser perjudicial para la salud de las personas que consumen estos vegetales. Además, contribuye a la gestión de la contaminación ambiental.

3.6. Discusión de resultados de investigación

En concordancia a los resultados de los parámetros físicos T°C, pH, conductividad y oxígeno disuelto de muestras de agua del riachuelo San Pedro Mimosa y bocamina Ocopa; se ha obtenido como resultados la T°C varía de 14.35°C y 13.2°C respectivamente, el pH 5.4 y 5 respectivamente, es importante argumentar este parámetro puesto que es un indicador esencial que nos permite determinar la idoneidad del agua sobre todo para riego de pastizales;

contrastando con los autores que refieren al respecto, el terreno para una óptima producción de pastos requiere un pH de entre 6 y 6,5, con suficientes nutrientes (Tejada, et al., 2015); para el agua de riego agrícola va de 6.0 a 9.0 (Palacios et al., 2020) igualmente en la normatividad del DS N°004-2017-MINAM-ECA (MINAM, 2017) establece el pH debe estar entre 6,5 y 8,5 para riego de vegetales; por tanto, bajo estas consideraciones el pH de agua de riachuelo de San Pedro de Mimoso y la bocamina de Ocopa no es apto para el riego agrícola por estar fuera de los estándares de calidad de agua.

Los resultados de la presente investigación en cuanto a conductividad eléctrica se obtuvieron como resultados 164.68 y 136.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las aguas del riachuelo San Pedro Mimoso y bocamina Ocopa; de acuerdo a Aiswarya et al. (2022) la conductividad eléctrica (CE) es un factor físico significativo en la evaluación de la calidad del agua para riego, la existencia de partículas iónicas en el agua subterránea eleva su conductividad quien encontró un valor promedio de 1531.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, igualmente en la normatividad del DS N°004-2017-MINAM-ECA establece el valor de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$; por lo mismo la CE resultante de la investigación está por debajo del límite superior (Moreno Marengo, 2013) investigó muestras de agua procedentes de minería artesanal obteniendo As, Respecto al OD se obtuvo valores de 11.3 y 9.6 mg/L, valores que son ≥ 4 según el ECA, lo que significa que hay buenas reacciones redox como lo define (Huerta. V. 2009) siendo un parámetro muy importante en la evaluación de aguas subterráneas, si se encuentra en altas concentraciones producirá un medio oxidante y si se encuentra en bajas concentraciones producirá un medio reductor (Dusi et al., 2022).

La presencia de contaminantes en soluciones acuosas, en particular metales pesados y metaloides peligrosos, es un problema ambiental y social de gran importancia. Estos contaminantes representan una seria amenaza para el medio ambiente y la salud pública (Dey et al., 2022). Nuevos materiales adsorbentes, como los nanomateriales, los materiales compuestos y los bioadsorbentes, están recibiendo una gran atención en la investigación y en la práctica debido a varias

ventajas que ofrecen, incluyendo su asequibilidad, facilidad de uso y eficiencia en el tratamiento de contaminantes (Soni et al., 2020). El agua superficial procedente del riachuelo San Pedro Mimosa la mayor concentración de arsénico es (0.4643mg/L), es un metaloide tóxico que puede tener efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente si se encuentra en concentraciones elevadas en el agua potable o en fuentes de agua utilizadas para diversos fines. La comparación de estas concentraciones con los estándares y regulaciones ambientales locales y nacionales es fundamental para determinar si el agua es segura para el consumo y otros usos.

En el estudio realizado por Neiva et al. (2019) encontró las concentraciones máximas de As 63,4 µg/L en el agua superficial y 66,7 µg/L en el agua subterránea. Respecto al plomo fue 0.0252 mg/L y cadmio 0.0083 mg/L; superando el límite del ECA el arsénico en 13%, plomo encontrándose en el límite y cadmio por debajo de los límites; Rivera (2021) encontró arsénico 0,0095 mg/L y plomo 0,0010 mg/L, comparado con los valores de la presente investigación existe diferencia considerable que están por debajo de los límites permisibles. Los resultados de análisis de agua subterránea de bocamina ocopa, la concentración de As fue de 0.5498 mg/L valor que supera el ECA, Cd 0.0023 mg/L y Pb 0.0315 mg/L, estos dos últimos elementos se encuentran por debajo del límite. Villa et al. (2020), investigó muestras de agua procedentes de minería artesanal obteniendo As, 235 µg/ L, Cd, 255 µg/L y Pb, 0,43 mg /L valores que superan al ECA. En ambos referentes las concentraciones del As superan el límite del ECA, por lo que se considera que el agua de ambas fuentes no es recomendable para riego ni bebida de animales.

Los bioadsorventes utilizados fueron los vegetales silvestres diente de león (*Taraxacum officinale*), la chilca (*Baccharis salicifolia*) y la cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*), como bioarremiadores y es el método más atractivo ya que emplea biomateriales ecológicos sostenibles y rentables como mencionan Singh et al. (2020). Las biomasas agrícolas son materiales que se generan en abundancia como subproductos de la agricultura o la industria alimentaria. Esto significa que

son asequibles y, en muchos casos, prácticamente gratuitos, lo que puede ayudar a reducir los costos de tratamiento de agua y gestión de residuos (Anastopoulos et al., 2019). Similarmente Nathan et al. (2022) empleó como bioadsorbente cáscara de tuna y verdura para la eliminación simultánea de metales pesados mediante bioadsorción mostrando resultados del 92% de cadmio, 67% de plomo y 17% de arsénico.

Los resultados de análisis de As, en diente de león fue 3.66 mg/kg en cáscara de tuna 2.232 mg/kg y en chilca 4.37 mg/kg, valores detectados por el espectrofotómetro de absorción atómica, concentraciones de Cd, en diente de león 0.1645 mg/kg, en cáscara de tuna 0.0345 mg/kg y chilca 0.0715 mg/kg y Pb en diente de león 3.0900 mg/kg, en cáscara de tuna 0.4400 mg/kg y en chilca 0.4705 mg/kg. Méndez et al. (2009) en muestras Yerba mate las concentraciones encontradas fue entre 0,015 y 0,114 mg/ kg de As, las concentraciones que oscilaron entre 0,18 y 1,25 mg/ kg de Cd y las concentraciones entre 0,10 mg/ kg y 1,20 mg/kg de Pb. En la raíz de Girasol, la concentración de cadmio fue de 0,85 mg/kg, de plomo fue 0,50 mg/ kg y de arsénico 1,02 mg/kg, en muestras de agua de relave (Huaranga Moreno et al., 2022).

Asimismo Menezes et al. (2020), utilizó como bioadsorbente de plomo la corteza de *Caryocar coriaceum Wittm* previamente fueron lavados y secados, luego triturados y tamizados que adsorbió iones de plomo (II) variando de 15.6 a 13.5 mg/L. Es cierto que en los últimos años ha habido un creciente interés en el uso de bioadsorbentes económicos y fácilmente disponibles para la eliminación de metales pesados. Los bioadsorbentes son materiales derivados de fuentes naturales, como desechos de alimentos de origen vegetal, que tienen la capacidad de adsorber o atrapar metales pesados del agua u otras soluciones contaminadas (Karim et al., 2023). Con estos resultados se considera que las plantas son hiperacumuladora favorables en la fitoextracción de As, Cd y Pb. Según los estudios de Asmat et al. (2016) logró mayor concentración de Pb, Zn y Cd, siendo la raíz el órgano de mayor bioacumulación de estos metales.

La culminación del estudio, permitió confrontar resultados de hallazgos frente a aportes de investigaciones similares, combinando creatividades y experiencias propias de los investigadores implicando integración según sus perfiles en la línea medio ambiental, en las propiedades bioadsorbentes de diferentes materiales. La divulgación del estudio a través del presente texto, beneficiará a los lectores académicos y la sociedad en general como referencia informativa de saberes.

Respecto a limitaciones y áreas para futuras investigaciones, existen restricciones en cuanto a la disponibilidad de equipos, materiales, instrumentos, insumos y reactivos que está al alcance del laboratorio de química de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería de Minas Civil Ambiental de la Universidad Nacional de Huancavelica. Por el contrario, hemos predispuesto la mejor voluntad de continuar y realizar investigación en medio de dificultades económicas, climatológicas y fuentes bibliográficas actualizadas. Sugerimos implementar los laboratorios con tecnologías de sensibilidad de ng/L o ppt, a fin de ayudar a empoderar mejores contribuciones al conocimiento científico.

CAPÍTULO III

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFLEXIONES

4.1. Conclusiones

La determinación de la eficiencia de bioadsorbentes en muestras de aguas superficiales proveniente de bocatoma Ocopa, concluyó en los siguientes resultados. Diente de león un 47.74% en As, 84.34% en Cd y un 32.94% en Pb. la chilca un 33.56% en As, 77.11% en Cd y un 42.46% en Pb. la cáscara de tuna un 23.99% en As, 75.90% en Cd y 15.87% un Pb. Y en las muestras de vegetales luego del proceso experimental con agua proveniente de bocatoma Ocopa, del diente de león un 36.89% en As, 90.88% en Cd y un 32.75% en Pb. la chilca un 12.11% en As, 35.52% en Cd y un 18.38% en Pb. la cáscara de tuna un 30.42% en As, 57.97% en Cd y un 17.50% en Pb.

La determinación de la eficiencia de bioadsorbentes vegetales en muestras de aguas superficiales proveniente del riachuelo San Pedro de Mimosa concluyó en los siguientes resultados. Diente de león un 44.78% en As, 38.30% en Cd y un 25.40% en Pb. la chilca un 33.53% en As, 34.04% en Cd y un 36.19% en Pb. la cáscara de tuna un 23.43% en As, 17.02% en Cd y un 37.14% en Pb. Y en las muestras de vegetales luego del proceso experimental con agua proveniente de riachuelo San Pedro de Mimosa, del diente de león un 20.52% en As, 67.78% en Cd y un 24.76% en Pb. la chilca un 20.46% en As, 21.68% en Cd y un 36.24% en Pb. la cáscara de tuna 66.35% en As, 34.78% en Cd y un 72.95% en Pb.

Se concluye también en que no existe diferencia significativa de eficiencia de bioadsorción entre el diente de león, la chilca y la cáscara de tuna el cual fue contrastado con el método Tukey a una confianza de 95%. Así mismo se llegó a definir la eficiencia de bioadsorción de todo el proceso experimental donde prevalece el diente de león con una eficiencia del 45.59%, y seguido de la cáscara de tuna con una eficiencia de 39.44% y finalmente la chilca una eficiencia de 33.44%.

A través del presente texto académico producto de una investigación científica, contribuimos con el incremento específicamente conocimientos referidos a bioadsorbentes naturales que remedian contaminantes de metales y metaloide entre ellos arsénico, cadmio y plomo presentes en agua superficial de origen

minero, utilizando para ello la disponibilidad de los vegetales chilca, diente de león y cáscara de tuna de natural y abundante en la zona y con el uso de los equipos de laboratorio específicamente el espectrofotómetro de absorción atómica por flama, acorde al avance de la ciencia y tecnología, contribuyendo a la mitigación ambiental en beneficio de la sociedad del ámbito del distrito de Ccochaccasa y la comunidad de Ocopa. Esta metodología adaptativa servirá en alguna medida para orientar y/o reorientar futuras investigaciones similares, influyendo al bienestar de los seres vivos.

4.2. Recomendaciones

Recomendar la implementación de prácticas sostenibles, como la reutilización del agua tratada mediante bioadsorción, es una sugerencia valiosa para las empresas mineras en la región, y conservar recursos hídricos puesto que la minería requiere grandes cantidades de agua para diversas operaciones, lo que puede tener un impacto significativo en los recursos hídricos locales. La reutilización del agua tratada mediante bioadsorción reduce la demanda de agua fresca y contribuye a la conservación de los recursos hídricos, asimismo la reducción de la contaminación del agua a través de bioadsorción eficaz para eliminar metales pesados y otros contaminantes del agua, la reutilización del agua tratada con bioadsorbentes ayuda a reducir la contaminación y a minimizar el impacto ambiental de las operaciones mineras en los cuerpos de agua circundantes y el cumplimiento de normativas en la prácticas sostenibles y la reutilización del agua tratada pueden ayudar a cumplir con regulaciones ambientales más estrictas y a evitar sanciones legales o multas relacionadas con la contaminación del agua. Establecer un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua es una medida esencial para garantizar el éxito a largo plazo de la bioadsorción y para detectar de manera temprana cualquier problema de contaminación.

La divulgación de los resultados de la investigación es una estrategia fundamental para promover la conciencia sobre soluciones sostenibles y fomentar la adopción de prácticas más responsables con el medio ambiente en la

industria minera, obteniendo resultados que demuestra un compromiso con la transparencia esencial para establecer y mantener la confianza y aumentar la conciencia pública sobre los desafíos ambientales y las soluciones sostenibles disponibles. Esto puede movilizar a la sociedad civil y a las comunidades afectadas para presionar por prácticas más responsables y manifiesto de soluciones sostenibles adoptando prácticas más responsables con el medio ambiente. La recomendación de capacitar a las comunidades locales en la implementación y mantenimiento de sistemas de bioadsorción es una iniciativa valiosa que puede tener un impacto positivo en la gestión de la calidad del agua a nivel local con la participación proporcionada de las comunidades locales para generar conocimiento y las habilidades necesarias para tomar medidas directas en la gestión de la calidad del agua en sus áreas, esto las empodera para abordar problemas de contaminación y mejorar su acceso a agua limpia. Asimismo, contar con sistemas de bioadsorción que les permitirá a las comunidades utilizar recursos locales, como biomásas agrícolas, para mejorar la calidad del agua de manera sostenible y económica y la mejora de la salud pública al reducir la exposición a contaminantes y prevenir enfermedades relacionadas con el agua.

4.3. Reflexiones

Se destacan los desafíos y complejidades inherentes al proceso de investigación y desarrollo de soluciones sostenibles para la gestión de la calidad del agua. Es importante reconocer que la investigación científica y la implementación de tecnologías sostenibles pueden enfrentar diversas barreras, como limitaciones de tiempo, cargas laborales, responsabilidades adicionales y diferencias de opinión entre los investigadores.

Sin embargo, lo que se destaca en esta declaración es el compromiso hacia el bien común y la protección del recurso hídrico, que es esencial para la vida, el bienestar de los seres humanos y el ecosistema en general. La utilización de bioadsorbentes naturales tales como paja de cebada, paja de avena que se encuentran como deshecho después de la cosecha y el ichu que se tienen en grandes cantidades en zonas altoandinas peruanas, pueden ser estudiados como

adsorbentes para salvaguardar la calidad del agua como un enfoque valioso y sostenible que puede tener un impacto positivo tanto a nivel local como global.

Los investigadores que trabajan en temas ambientales, como la gestión del agua, a menudo se enfrentan a desafíos significativos, pero su dedicación y esfuerzo son fundamentales para abordar los problemas ambientales y avanzar hacia soluciones sostenibles. La divulgación de sus hallazgos y la concienciación sobre la importancia de la protección del agua son pasos esenciales en este proceso.

En última instancia, esta declaración refleja la importancia de abordar los desafíos ambientales de manera colaborativa y enfocada en el bienestar de la sociedad y el medio ambiente. La investigación y el desarrollo de soluciones sostenibles, como el uso de bioadsorbentes naturales, son esenciales para garantizar un suministro de agua limpia y seguro para las generaciones presentes y futuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, R. C. (2015). *Introducción a la Metodología de la investigación*. Universidad Técnica de Machala. <https://cutt.ly/bwYVbcIm>
- Aiswarya, S., Awasthi, P., & Banerjee, S. S. (2022). Self-healing thermoplastic elastomeric materials: Challenges, opportunities and new approaches. *European Polymer Journal*, 181, 111658.
- Alban, G. P. G., Arguello, A. E. V., & Molina, N. E. C. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *Recimundo*, 4(3), 163-173.
- Alcántara, D. A. Ñ. (2016). *Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Áncash, Perú)*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Repositorio Institucional. <https://acortar.link/PTzoQx>
- Alegre Bustamante, L. M. (2022). *Evaluación del riesgo de exposición de metales pesados en el agua sobre las poblaciones adyacentes de las quebradas Pacchac y Pucaurán Huaraz-Ancash, entre los años 1996 al 2014*. [Tesis de Maestría, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Repositorio Institucional. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3286326>
- Álvarez-Legorreta, T. (2009). El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: costa occidental del mar Caribe. J. Espinoza-Ávalos, GA Islebe y HA Hernández-Arana (Eds.). *Contaminación acuática* (pp. 205-219). El Colegio de la Frontera Sur.
- Anastopoulos, I., Pashalidis, I., Hosseini-Bandegharaei, A., Giannakoudakis, D. A., Robalds, A., Usman, M., Escudero, L. B., Zhou, Y., Colmenares, J. C., Núñez-Delgado, A., & Lima, É. C. (2019). Agricultural biomass/waste as adsorbents for toxic metal decontamination of aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 295, 111684. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111684>
- Apelo, A. (2017). *Bioadsorción con cáscara de naranja (Citrus sinensis) en agua*

contaminadas por anilina de la Empresa Curtiembre – Huachipa 2017. [Tesis de Licenciatura, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Institucional. <https://acortar.link/8bNKxh>

Asmat, K. L., López, Y. R., Bobadilla, J. M., Herrera, M. V., & Espinoza, R. R. (2016). Fitoextracción De Plomo, Zinc y Cadmio de Relaves Mineros Utilizando *Helianthus annuus* L. (Girasol). *Infinitum...*, 6(2). <http://datos.unjfsc.edu.pe/index.php/INFINITUM/article/view/38>

Awual, M. R. (2019). Efficient phosphate removal from water for controlling eutrophication using novel composite adsorbent. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1311-1319.

Barrientos Alvarez, H. A. (2015). *Bioadsorción de plomo (II) utilizando Baccharis Latifolia (Chilca)*. [Tesis de Pregrado, Universidad Alas Peruanas]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/1260>

Belizario Quispe, G., Capacoila Coila, J., Huaquisto Ramos, E., Cornejo Olarte, D. A., & Chui Betancur, H. N. (2019). Determinación del contenido de Fósforo y Arsénico, y de otros metales contaminantes de las aguas superficiales del Río Coata, afluente del lago Titicaca, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 36(5), 223-228.

Belmer, N., & Wright, I. A. (2020). The regulation and impact of eight Australian coal mine waste water discharges on downstream river water quality: A regional comparison of active versus closed mines. *Water and Environment Journal*, 34(3), 350-363.

Blanco-Villafuerte, L., & Hartinger, S. M. (2023). Impacto del cambio climático en la salud de los peruanos: Desafíos y estrategias para una respuesta integral. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 40(2). <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2023.402.12998>.

Boraah, N., Chakma, S., & Kaushal, P. (2022). Attributes of wood biochar as an efficient adsorbent for remediating heavy metals and emerging

contaminants from water: A critical review and bibliometric analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107825.

Brocca, H., & Kuri, S. T. (2004). Diente de león. *LiberAddictus*.
<http://www.liberaddictus.org/Pdf/0590-51.pdf>

Cabrera, D. (2018). *Evaluación de la capacidad de biosorción de plomo (II) empleando biomasa vegetal inerte (tallo de rosas) como adsorbente*. [Tesis de Maestría. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8217>

Calero Huaman, B. S. (2023). *Evaluación del contenido de metales pesados en el agua superficial de desembocadura del río Chancay, Huaral, año 2021*. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/7797>

Cama J., Rovira M., Ávila P., Pereira M. R., Asta M. P., Grandia F., Martínez-Lladó X. & Ivarez-Ayuso E. (2008). Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana. J. Bundschuh, A. Pérez Carrera & M. Litter (Eds.). *Distribución de arsénico en la región Ibérica* (pp. 122). IBEROARSEN

Campos Pardo, H. S., & Porras Becerra, J. J. (2018). *Evaluación de eficiencia de la harina de cáscara de plátano (Musa spp) utilizando un filtro casero, para la adsorción de hierro y manganeso en agua para consumo humano, barrio Miramayo, distrito de Yantaló–Moyobamba–San Martín*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Martín-Taparapoto]. Repositorio Institucional. <https://tesis.unsm.edu.pe/handle/11458/3287>

Cañizares-Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología-Mexico*, 42(3), 131-143.

Castro Pastor, V. B. (2015). *Uso de la cáscara de banano (musa paradisiaca) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas* [Master's Thesis]. Universidad

de Guayaquil.

- Çeliker, M., Türkmen, S., Güler, C., & Kurt, M. A. (2019). Factors controlling arsenic and selected potentially toxic elements in stream sediment–soil and groundwater–surface water systems of a hydrologically modified semi-closed basin (Uluova) in Elazığ Province, Eastern Turkey. *Journal of Hydrology*, 569, 167-187.
- Coelho, G. F., Gonçalves, A. C., Schwantes, D., Rodríguez, E. Á., Tarley, C. R. T., Dragunski, D., & Conradi Junior, É. (2018). Removal of Cd (II), Pb (II) and Cr (III) from water using modified residues of *Anacardium occidentale* L. *Applied Water Science*, 8, 1-21.
- Cossío Herrera, L. A. (2015). *Contaminación por plomo y cadmio del Río Apurímac-VRAE*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/1130>
- Cruzado Marrufo, K. A., & Inostroza Ortiz, J. J. (2023). *Tratamiento de las aguas contaminadas por plomo y cadmio con el uso de chilca (Baccharis latifolia) y llantén (Plantago major) en la quebrada lechería en el caserío Tumbacucho-provincia de Hualgayoc-Cajamarca 2021*. [Tesis de Grado, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/2807>
- De la Cruz, C. E. B., Rafael, F. A. M., & Moreno, S. M. G. (2015). Evaluación de la capacidad de bioadsorción de Cadmio (II) y Plomo (II) mediante el uso de biomasa bacteriana muerta en soluciones acuosas. *Theorēma (Lima, Segunda época, En línea)*, 2, 95-106.
- Dey, S., Uppala, P., Sambangi, A., Haripavan, N., & Veerendra, G. T. N. (2022). Recycling of solid waste biosorbents for removal of nitrates from contaminated water. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100014>
- Díaz Cartagena, W. J. (2020). *Factores que determinan el origen de la contaminación*

de suelos por arsénico en la comunidad de Llacuabamba, Pataz, mediante procedimientos secuenciales y alternos. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/11602>

Dótor Almazán, A., Armienta Hernández, M. A., Árcega Cabrera, F., & Talavera Mendoza, O. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. *Hidrobiológica*, 24(3), 245-256.

Duany-Timosthe, S., Arias-Lafargue, T., Bessy-Horruitiner, T., & Rodríguez-Heredia, D. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 42(1), 94-113.

Dusi, G. G., Marques, G. S., Kienteca, M. L., Gimenes, M. L., Cerutti, M. L. M. N., & da Silva, V. R. (2022). Biosorption investigation of Cu (II) ions from aqueous solutions using sericin-alginate particles: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 25, 100601.

Elgarahy, A. M., Elwakeel, K. Z., Mohammad, S. H., & Elshoubaky, G. A. (2021). A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100209. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100209>

Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales del sistema sanitario de Navarra*, 26, 141-153. <https://scielo.isciii.es/pdf/asisna/v26s1/ocho.pdf>

Gamarra Avila, N. A., & Uceda León, R. Y. (2017). *Determinación de metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica en truchas arcoiris "oncorhynchus mykiss" del río Chiapuquio de Ingenio-Huancayo*. [Tesis de Grado, Universidad Inca Garcilaso de la Vega]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.uigv.edu.pe/handle/20.500.11818/1697>

García Pérez, S. P. (2018.). *Conceptos relacionados con el tema de ecosistemas. Aprendizaje desde un aula natural* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63963>

Gasca, J. M. G. (2000). Diente de Leon: *Taraxacum officinale* weber. *Medicina naturista*, 22-26.

Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Krishnan, S., Kumar, S., Nejad, Z. D., Khan, M. M., & Alam, J. (2021). Evaluating heavy metals contamination in soil and vegetables in the region of North India: Levels, transfer and potential human health risk analysis. *Environmental toxicology and pharmacology*, 82, 103563.

Hernández Domínguez, C. M. (2021). *Evaluación del arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en peces, crustáceos y moluscos de mayor consumo en Isla Fuerte (Caribe colombiano): Estimación del riesgo por ingesta a la salud humana*. [Tesis de Maestría, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional.

<https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/4142>

Huaranga Moreno, F., Arteaga Núñez, J. R., & Huaranga Arévalo, F. (2022). Remoción selectiva de plomo presente en relaves mineros utilizando nanodendímeros de humus, compost, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos puros. *Arnaldoa*, 29(3), 439-450.

Huayanay Ostos, K. P. (2018). *Evaluación de la eficiencia de biosorción de cadmio por levaduras nativas para cultivos agrícolas usando tomate *Solanum lycopersicum* L. como modelo biológico en cultivos hidropónicos*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/8476>

Huayllani Enriquez, M. G. (2016). *Presencia de metales pesados en la estructura vegetal de *Apeiba membranacea* Spruce ex Benth.(Peine de mono), *Ochroma pyramidale* (Cav, ex. Lam.) Urb.(Topa), *Ceiba pentandra* (L.) Gaerth.(Lupuna), *Erythrina ulei* Harms (Amasisa) Instaladas en áreas intervenidas por la minería aurífera en el sector Manuani-Inambari-Tambopata-Madre de Dios*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/20.500.14070/214>

- Huerta Vásquez, G. J. (2009). *Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en la cuenca del Estero Punitaqui, IV Región*. [Tesis de Grado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103322>
- James, A., & Yadav, D. (2021). Valorization of coconut waste for facile treatment of contaminated water: A comprehensive review (2010–2021). *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102075.
- Karim, A., Raji, Z., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Valorization of Fibrous Plant-Based Food Waste as Biosorbents for Remediation of Heavy Metals from Wastewater – A Review. *Molecules*, 28(10), 4205. <https://doi.org/10.3390/molecules28104205>
- Lagua López, W. G. (2021). *Evaluación de carbón activado de semillas de datura como material adsorbente de metales (cromo VI y plomo II)*. [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio institucional. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16908>
- Litter M., Pérez Carrera A., Morgada M. E., Ramos O., Quintanilla J. & Fernández-Cirelli A. (2008). Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana. J. Bundschuh, A. Pérez Carrera & M. Litter (Eds.). *Formas presentes de arsénico en agua y suelo* (pp. 5-27). Iberoarsen.
- Loja Herrera, B., Alvarado Yarasca, Á., Salazar Granara, A., Ramos Yica, E., Jurado B. (2017). Cribado fitoquímico del *Baccharis latifolia* (R&P.) Pers. (chilca). *Comunicación Breve*, 22(1). <http://scielo.sld.cu/pdf/pla/v22n1/pla15117.pdf>
- Lovaković, B. T. (2020). Cadmium, arsenic, and lead: Elements affecting male reproductive health. *Current Opinion in Toxicology*, 19, 7-14.
- Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 47-50.

- Macha, E. (2019). *Determinación de cadmio, arsénico y plomo por espectrofotometría de absorción atómica en aguas de pozo de Castillo Grande-Tingo María, julio-setiembre 2019*. [Tesis de Segunda Especialidad, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/11630>
- Madrugal, S., Muñoz, C., & Vega, M. (2016). Biosorción de Pb²⁺ y Zn²⁺ en agua usando una planta silvestre inactiva recolectada en el estado de Colima: *Viguiera linearis*. *ResearchGate*. <https://cutt.ly/7wYV48B0>.
- Maia-Elkhoury, A. N. S., Magalhães Lima, D., Salomón, O. D., Buzanovsky, L. P., Saboyá-Díaz, M. I., Valadas, S. Y., & Sanchez-Vazquez, M. J. (2021). Interacción entre los determinantes medioambientales y socioeconómicos para el riesgo para leishmaniasis cutánea en América Latina. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 45, e49.
- Manwani, S., Devi, P., Singh, T., Yadav, C. S., Awasthi, K. K., Bhoot, N., & Awasthi, G. (2023). Heavy metals in vegetables: A review of status, human health concerns, and management options. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(28), 71940-71956. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22210-w>
- Marcano, T. H. (2000). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Venesuelos*, 8(1-2), 42-47.
- Marín, J. A. G., González, C. del V. V., & Mata, N. J. M. (2018). Evaluación de la calidad del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA). Caso de estudio: Cuenca del Río Guarapiche, Monagas, Venezuela. *Anales Científicos*, 79(1), 111-119.
- Medellín-Castillo, N. A., Hernández-Ramírez, M. G., Salazar-Rábago, J. J., Labrada-Delgado, G. J., & Aragón-Piña, A. (2017). Bioadsorción de Plomo (II) presente en solución acuosa sobre residuos de fibras naturales procedentes de la industria ixtlera (Agave lechuguilla Torr. Y Yucca carnerosana (Trel.) McKelvey). *Revista internacional de contaminación*

ambiental, 33(2), 269-280.

Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.

Menezes, J. M. C., da Silva Bento, A. M., da Silva, J. H., de Paula Filho, F. J., da Costa, J. G. M., Coutinho, H. D. M., & Teixeira, R. N. P. (2020). Equilibrium, kinetics and thermodynamics of lead (II) adsorption in bioadsorbent composed by *Caryocar coriaceum* Wittm barks. *Chemosphere*, 261, 128144.

Ministerio del Ambiente (2010). *Plataforma del Estado Peruano*. <https://www.gob.pe/minam>

Ministerio del Ambiente (2017). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Estándares ambiental ECA para agua, Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales*. <https://cutt.ly/dwYBqXGI>

Moreno Marengo, A. R. (2013). *Estudio de diferentes bioadsorbentes como posibles retenedores de fosfatos en aguas*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.

Moreno-Rivas, S. C., & Ramos-Clamont Montfort, G. (2018). Descontaminación de arsénico, cadmio y plomo en agua por biosorción con *Saccharomyces cerevisiae*. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 21.

Muñoz Carpio, J. C. (2007). *Biosorción de plomo (II) por cáscara de naranja "citrus cinensis" pretratada*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/391>

Nathan, R. J., Barr, D., & Rosengren, R. J. (2022). Six fruit and vegetable peel beads for the simultaneous removal of heavy metals by biosorption. *Environmental Technology*, 43(13), 1935-1952. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1858183>

Navarro-Aviñó, J. P., Alonso, I. A., & López-Moya, J. R. (2007). Aspectos

bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16(2).

Neiva, A. M. R., Carvalho, P. C. S., Antunes, I. M. H. R., Albuquerque, M. T. D., Santos, A. C. S., Cunha, P. P., & Henriques, S. B. A. (2019). Assessment of metal and metalloid contamination in the waters and stream sediments around the abandoned uranium mine area from Mortórios, central Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*, 202, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.03.020>

Ninatanta-Ortiz, J. A., Núñez-Zambrano, L. A., García-Flores, S. A., & Romani, F. R. (2016). Frecuencia de síndrome metabólico en residentes de una región andina del Perú. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 33, 640-650.

Organización Mundial de la Salud (2002). *Convenio Marco de la OMS para el Control del Tabaco*. Ginebra, 21. <https://cutt.ly/4wYVZ6TY>

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.

Pacheco Peña, L. A. (2021). *Capacidad de Adsorción de plomo (II) mediante el uso de totora (Scirpus californicus), en las aguas contaminadas*. [Tesis de Grado]. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Pal, D. B., Saini, R., Srivastava, N., Ahmad, I., Alshahrani, M. Y., & Gupta, V. K. (2022). Waste biomass based potential bioadsorbent for lead removal from simulated wastewater. *Bioresource Technology*, 349, 126843.

Palacios Diaz, E., & Ramos Carrión, L. A. (2020). *Gestión integrada del recurso hídrico para la recuperación de la calidad del agua en la laguna Piás, Pataz-2020*. [Tesis de Grado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/11537/23956>

Pinzón-Bedoya, M. L., & Vera Villamizar, L. E. (2009). Modelamiento de la

- cinética de bioadsorción de Cr (III) usando cáscara de naranja. *Dyna*, 76(160), 95-106.
- Prasad, S., Yadav, K. K., Kumar, S., Gupta, N., Cabral-Pinto, M. M., Rezania, S., Radwan, N., & Alam, J. (2021). Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. *Journal of Environmental Management*, 285, 112174.
- Rahman, M., Rima, S. A., Saha, S. K., Saima, J., Hossain, M. S., Tanni, T. N., Bakar, M. A., & Siddique, M. A. M. (2022). Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals in the surface water of a remote island Nijhum Dweep, northern Bay of Bengal. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100706.
- Rana, A., Sindhu, M., Kumar, A., Dhaka, R. K., Chahar, M., Singh, S., & Nain, L. (2021). Restoration of heavy metal-contaminated soil and water through biosorbents: A review of current understanding and future challenges. *Physiologia Plantarum*, 173(1), 394-417. <https://doi.org/10.1111/ppl.13397>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.
- Romero Ledezma K. P. (2009). Contaminación por metales pesados. (Eróstegui Revilla Carlos Pedro, entrevistador). *Revista Científica Ciencia Médica*, 12(1), 45-46. <https://www.redalyc.org/pdf/4260/426041218013.pdf>
- Rosales Arévalo, F. G., & Villavicencio Criollo, M. B. (2018). *Evaluación de la eficiencia de Brassica rapa subsp. Oleífera (nabo silvestre) en la reducción de Plomo y Cadmio en los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas del cantón Penipe*. [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/8938>
- Sahmoune, M. N. (2019). Evaluation of thermodynamic parameters for

- adsorption of heavy metals by green adsorbents. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 697-704. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00819-z>
- Salas-Mercado, D., Hermoza-Gutiérrez, M., & Salas-Ávila, D. (2020). Distribución de metales pesados y metaloides en aguas superficiales y sedimentos del río Crucero, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 37(4), 185-193.
- Salehi, M. (2022). Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environment International*, 158, 106936.
- Santa-Cruz, J., Peñaloza, P., Korneykova, M. V., & Neaman, A. (2021). Thresholds of metal and metalloid toxicity in field-collected anthropogenically contaminated soils: a review. *Geography, Environment, Sustainability*, 14(2), 6-21. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-023>
- Singh, S., Kumar, V., Datta, S., Dhanjal, D. S., Sharma, K., Samuel, J., & Singh, J. (2020). Current advancement and future prospect of biosorbents for bioremediation. *Science of the Total Environment*, 709, 135895.
- Soni, R., Bhardwaj, S., & Shukla, D. P. (2020). Various water-treatment technologies for inorganic contaminants: Current status and future aspects. *Inorganic pollutants in water*, 273-295. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00014-7>
- Stirling, D. A. (2007). EPA glossaries: The struggle to define environmental terms. *Government Information Quarterly*, 24(2), 414-428.
- Tejada Soraluz, J. L., & Helfgott Lerner, S. (2018). Evaluación técnica y económica de atrazina, pendimetalin y metribuzin en maíz amarillo duro. *Idesia (Arica)*, 36(4), 121-126.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109-123.
- Tirado Ríos, P. H., & Valverde Gómez, L. (2019). *Determinación del PH y concentración de metales totales de las aguas del Río Chimín, distrito Cachachi-2018*

- y 2019. [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/22012>
- Torres Saavedra, A. M. (2018). *Factor de bioconcentración y traslocación de especies altoandinas para suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora de Mesapata, en condiciones de invernadero, 2015-2016*. [Tesis para Título, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Loyola]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2110>
- Vega, D. P., González, C., Escalante, C. A., Gallego, J., Salamanca, M., & Manrique-Losada, L. (2018). Uso de zeolita faujasita para adsorción de iones en aguas residuales municipales. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(4), 184-208.
- Veliz Ávila, G. (2022). *Uso del suelo con presencia de metales pesados y su influencia en forrajes del pasivo ambiental de la Minera Azulcocha-2022*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8752>
- Villa, O. R. M., Cortes, B. N. A., Gutiérrez, R. D. G., Vargas, O. H., Escobar, H. M. O., Magdaleno, H. F., Chulim, Á. C., Lopez, J. L. O., Saldivar, I. M., & Bernal, E. I. S. (2020). Metales pesados, arsénico y boro en agua de riego subterránea en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, Jalisco. *Agrociencia*, 54(8), 995-1007.
- Vizcaíno Mendoza, L., & Fuentes Molina, N. (2015). Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 43-60.
- Xu, H., Song, J., Luo, H., Zhang, Y., Li, Q., Zhu, Y., Xu, J., Li, Y., Song, C., & Wang, B. (2016). Analysis of the genome sequence of the medicinal plant *Salvia miltiorrhiza*. *Molecular plant*, 9(6), 949-952.
- Zapata, C. B. R., Paredes, L. E., & Rojo, C. M. (2017). Metodología DMAIC-SIX SIGMA para aumentar la productividad del área de producto terminado de la empresa Pesquera Artesanal de Chimbote, 2016. *INGnosis*, 3(1), 114-129.

ANEXOS

Anexo 1

Glosario de términos

- **Adsorción:** Proceso en el cual las moléculas se agrupan en una capa interfacial (Tejada, et al., 2015, pp. 41-51).
- **Absorción:** Cuando las moléculas llegaron a penetrar la parte interna de la fase sólida (Tejada, et al., 2015, pp. 41-51).
- **Arsénico:** El arsénico (As, número atómico 33, peso atómico 74,922) es un elemento ampliamente distribuido en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera (aprox. 5×10^{-4} % de la corteza terrestre) (Litter et al., 2008).
- **Baccharis latifolia:** comúnmente conocida como "Chilca", es una planta nativa de América del Sur y ampliamente distribuida en la región andina que se extiende desde Mérida (Venezuela) hasta Tucumán (Argentina) Incluyendo Colombia, que crece en los trópicos, con temperaturas entre templado y frío templado (Loja et al., 2017, p. 26).
- **Bioadsorbente:** Los bioadsorbente son materiales provenientes de la flora microbiana, algas, plantas, biomasa residual, productos agroindustriales o algunos biopolímeros, estos deben ser capaces de adsorber directamente el metal de forma iónica de la solución. Los biomateriales son sometidos a tratamientos fisicoquímicos sencillos y de bajo costo; con el fin de mejorar su capacidad de adsorción en los procesos de aplicación como remoción de metales pesados o recuperación de especies metálicas en solución (Muñoz Carpio, 2007).
- **Bioadsorción:** Es la captación de diferentes especies químicas por una biomasa (viva o muerta) mediante mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico o metabólico. En el proceso de biosorción implica la fase sólida-biomasa- (bioadsorbente) y una fase líquida que contiene distintas especies disueltas (adsorbato) en las que van a ser retenidas por el sólido (Apelo, 2017).

- **Cadmio:** Un metal utilizado en las aleaciones de protección de metales; a menudo se produce como un subproducto del refinado de zinc (Cama et al., 2008, p. 122).
- **Diente de león (*Taraxacum officinale*):** Es una especie de planta con flor de la familia de las asteráceas. Considerada generalmente como una "mala hierba", sus hojas se consumen en ensalada y se le han atribuido numerosas propiedades medicinales.
- **ECA:** Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el MINAM, fijan los valores máximos permitidos de contaminantes en el ambiente. El propósito es garantizar la conservación de la calidad ambiental mediante el uso de instrumentos de gestión ambiental sofisticados y de evaluación detallada.
- **Filtrado:** Líquido que ha pasado a través de un filtro.
- **Metales pesados:** Los metales pesados son un grupo de elementos químicos de origen natural presentes en la corteza terrestre que se caracteriza por sus propiedades físicas, químicas y toxicológicas, "se define como metales pesados aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g/cm³ cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (Navarro et al., 2007).
- **Plomo:** La intoxicación por plomo varía de acuerdo a la edad de la persona y su nivel de exposición. Afecta varios sistemas, entre ellos el sistema nervioso; llega a dañar a las neuronas, especialmente las del cerebro; afecta también a la médula ósea y últimamente con la generación de conductas antisociales, y también hay una relación con retraso mental y pérdida de habilidades cognitivas (Romero Ledezma, 2009).
- **Sorción o biosorción:** llamado así cuando el proceso de adsorción y absorción ocurren de forma simultánea y no se llega a distinguir el uno del otro (Tejada, et al., 2015, pp. 41-51).
- **Tuna (*Opuntia ficus-indica*):** A. Origen: La familia de las cactáceas (Cactaceae) es endémica del Continente Americano, y fue distribuida con

relativa facilidad en el mundo, debido a su fácil proliferación en las regiones áridas y semiáridas.

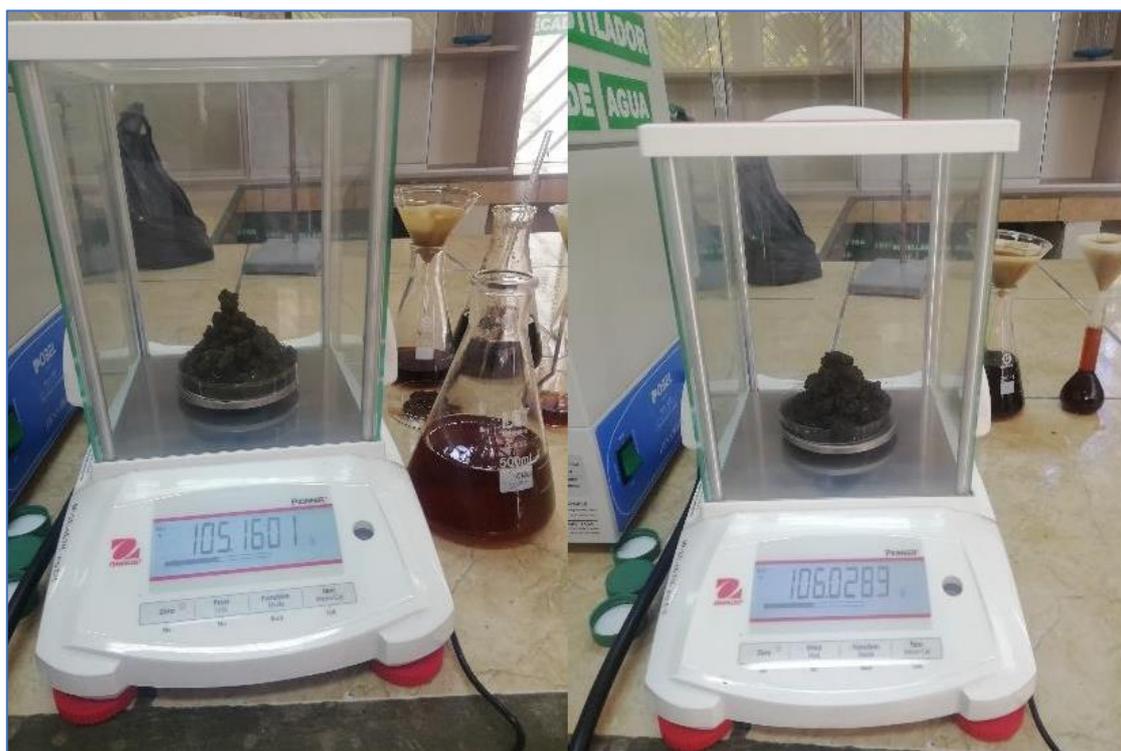
Anexo 2

Evidencias fotográficas

Fotografía 1. Filtrado de bioadsorbente de cáscara de tuna, chilca y diente de león



Fotografía 2. Pesado de bioadsorbentes de cáscara de tuna, chilca y diente de león



Fotografía 3. Pesado de bioadsorbente de cáscara de tuna, chilca y diente de león para el proceso de ceniza



Fotografía 4. Proceso de incinerado de cáscara de tuna, chilca y diente de león



Fotografía 5. Muestro y toma de parámetro físicos del riachuelo de San Pedro de Mimosa



Fotografía 6. Toma de muestra de la Bocamina Ocopa



Fotografía 7. Proceso de filtrado de aguas de San Pedro de Mimosa y de la bocamina de Ocopa



Fotografía 8. Armado del equipo bioadsorbente



INFORMACIÓN DEL AUTOR

Luz Marina Acharte Lume



Ingeniero Químico de profesión, cuenta con una Maestría en Química Orgánica por la Universidad Alas Peruanas. Doctora en Ciencias Ambientales por la Universidad Nacional de Huancavelica. Docente principal en la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería de Minas Civil Ambiental de la Universidad Nacional de Huancavelica. Reconocida como docente investigador por RENACYT. Su amplia experiencia incluye la dirección de investigaciones centradas en el medio ambiente, además, ha presentado ponencias de alto nivel en eventos tanto a nivel nacional como internacional, contribuyendo al intercambio de conocimientos y perspectivas en el ámbito científico y académico.

Amadeo Enríquez Donaires



Ingeniero de Minas por la Universidad Nacional del Centro del Perú, con Maestría en Ciencias de Ingeniería, mención Ecología y Gestión Ambiental. Doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad Nacional de Huancavelica. Docente Principal de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería de Minas Civil Ambiental de la Universidad Nacional de Huancavelica. Realiza trabajos en la línea medioambiental, ponente a nivel nacional e internacional.

Luis Quispealaya Armas



Ingeniero de Minas, con Maestría en Ingeniería mención Rocas Ornamentales y Minerales Industriales. Doctor en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Federico Villareal. Docente de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería de Minas Civil Ambiental de la Universidad Nacional de Huancavelica. Cuenta con investigaciones en revistas indexadas.

Jeny Maribel Asto Gonzales



Ingeniero de Minas con CIP N° 244596, con Maestría en Seguridad y Salud Minera por la Universidad Nacional de Huancavelica. Cuenta con estudios de Doctorado en Seguridad y Control Minero. Docente en la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería de Minas-Civil-Ambiental de la Universidad Nacional de Huancavelica.

Este libro se terminó de publicar en la editorial

**Instituto Universitario
de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú**

INUDI PERÚ



INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INNOVACIÓN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ISBN: 978-612-5130-10-5



9 786125 130105