



Capacidad de adsorción de metales mediante biomasa de cebada y avena en aguas, río Opamayo Huancavelica

Metal adsorption capacity of barley and oat biomasses in water samples from the Opamayo River, Huancavelica

Luzmila Ibet Arancel Palomino ¹ • Luz María Zambrano Ccance ¹ • Luz Marina Acharte Lume ¹ 

Recibido: 03 de septiembre del 2025 / Aceptado: 23 de marzo del 2026

RESUMEN

El presente estudio evaluó la capacidad de adsorción de metales pesados utilizando pajas de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*) como biosorbentes en aguas del río Opamayo (Huancavelica, Perú). Se recolectaron muestras en tres puntos (P1, P2 y P3) y se analizaron las concentraciones de plomo (Pb), zinc (Zn) y cobre (Cu) mediante espectrometría ICP-MS. Se prepararon los biosorbentes mediante lavado, secado y molienda hasta obtener un tamaño promedio de 3 mm. Los ensayos de adsorción se realizaron durante 6 horas a temperatura ambiente (18–20 °C) con agitación constante.

Los resultados evidenciaron que la cebada presentó mayor eficiencia de adsorción para Zn (53,31%) y Cu (49,69%), en comparación con la avena (28,29% y 47,22%, respectivamente). No se determinó la eficiencia para Pb debido a concentraciones iniciales no detectables. Se concluye que ambos residuos agrícolas tienen potencial como alternativas sostenibles y de bajo costo para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas.

Palabras clave: biosorción, metales pesados, cebada, avena, ICP-MS.

ABSTRACT

This study evaluated the adsorption capacity of heavy metals using barley (*Hordeum vulgare*) and oat (*Avena sativa*) straw as biosorbents in water from the Opamayo River (Huancavelica, Peru). Water samples were collected from three points (P1, P2, P3), and concentrations of lead (Pb), zinc (Zn), and copper (Cu) were analyzed using ICP-MS.

Barley showed higher adsorption efficiency for Zn (53.31%) and Cu (49.69%) compared to oat (28.29% and 47.22%, respectively). Pb removal efficiency could not be determined due to non-detectable initial concentrations. These findings demonstrate the potential of agricultural residues as low-cost and sustainable alternatives for water remediation.

Keywords: biosorption, heavy metals, barley straw, oat straw, ICP-MS.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación de los recursos hídricos constituye una de las problemáticas ambientales más críticas a nivel mundial, particularmente por la presencia de metales pesados tales como cromo, níquel, cadmio, plomo y mercurio. Estos elementos se caracterizan por su alta toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación en los ecosistemas, lo que representa un riesgo significativo tanto para la biodiversidad como para la salud humana (Tejada-Tovar et al., 2015). La exposición prolongada a estos contaminantes puede generar graves afecciones, incluyendo enfermedades renales, cardiovasculares y diversos tipos de cáncer (Paul, 2017).

En este contexto, la actividad minera desempeña un papel determinante en la generación de contaminación

hídrica. Si bien constituye un sector clave para el desarrollo económico, el manejo inadecuado de relaves, drenaje ácido de minas y aguas residuales provoca impactos negativos acumulativos en los cuerpos de agua, especialmente en las cuencas altas, afectando la calidad del recurso hídrico y limitando su uso en actividades productivas y consumo humano (Dorin et al., 2014; Remigio, 2015).

Frente a esta problemática, en los últimos años se ha incrementado el interés por el uso de materiales lignocelulósicos derivados de residuos agrícolas como alternativas sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas. Diversos estudios han demostrado la eficiencia de materiales como cáscaras, bagazo, hojas y residuos de cultivos en la remoción de metales pesados, debido a su bajo costo, alta disponibilidad y capacidad de adsorción (Akindolie & Choi, 2023). En

este sentido, los bioadsorbentes, obtenidos a partir de biomasa vegetal, microorganismos o polímeros naturales, han emergido como una tecnología prometedora para la descontaminación de efluentes industriales y cuerpos de agua impactados (Duany-Timosthe et al., 2022a).

✉ Luzmila Ibet Arancel Palomino
arancelpalominoluzmila@gmail.com.

¹ Universidad Nacional de Huancavelica,
Huancavelica, Perú.

En la región de Huancavelica, la actividad minera ha generado impactos ambientales significativos, especialmente en la calidad de los recursos hídricos. El río Opamayo, ubicado en el distrito de Lircay, provincia de Angaraes, presenta evidencias de contaminación por metales pesados como plomo, zinc y cobre, producto de actividades antropogénicas. Esta situación afecta no solo el equilibrio ecológico del ecosistema acuático, sino también las condiciones de vida de las poblaciones que dependen de este recurso.

En este contexto, la presente investigación se orienta a evaluar la capacidad de adsorción de residuos agrícolas locales, específicamente pajas de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*), como una alternativa de bajo costo y ambientalmente sostenible para la remoción de metales pesados en el agua del río Opamayo.

La hipótesis de investigación plantea que las pajas de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*) presentan una capacidad de adsorción significativa para la remoción de metales pesados en el agua del río Opamayo, contribuyendo a la mejora de su calidad.

Asimismo, esta investigación aporta al desarrollo de soluciones tecnológicas sostenibles mediante la valorización de residuos agrícolas, promoviendo su uso como biosorbentes en procesos de remediación hídrica, lo cual resulta especialmente relevante en contextos rurales y mineros con limitaciones económicas.

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones. En primer lugar, la escasa disponibilidad de estudios previos a nivel local limita la comparación de resultados y el establecimiento de antecedentes regionales. En segundo lugar, el diseño de investigación de tipo transversal implicó que la recolección de datos se realizara en un único periodo de tiempo, lo que restringe la evaluación de la variabilidad temporal de la contaminación y de la eficiencia de adsorción a lo largo del tiempo.

En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse considerando estas restricciones, aunque constituyen una base importante para futuras investigaciones orientadas al monitoreo continuo y a

la optimización de tecnologías de tratamiento de aguas contaminadas en la región.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Los materiales utilizados para la obtención de datos y muestras de campo incluyen: GPS, multiparámetro, pH-metro, envases de polietileno de 500 ml para la conservación de muestras, pipetas de diversos volúmenes, goteros, espátula, matraces de diferentes capacidades, embudos, vasos de recipiente de 50 ml, 100 ml y 500 ml, papel filtro para filtración rápida, sondas de distintos volúmenes, fiolas de 50 ml, guantes de látex, cofia, guardapolvo.

2.2. Método

El objetivo de este estudio es evaluar la capacidad de adsorción de metales en el agua del río Opamayo (Lircay, Angaraes, Huancavelica) utilizando paja de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*).

Se empleó un enfoque de investigación aplicada, con un nivel descriptivo-correlacional y un diseño no experimental transversal correlacional.

Se tomaron muestras de paja de cebada y paja de avena, con un peso de 5 kg cada una, provenientes de los terrenos de cultivo del Centro Poblado de Rumichaca, en el distrito de Lircay. Estas muestras fueron georreferenciadas con un GPS Garmin modelo GPSmap 64s. Las coordenadas del terreno de cebada fueron UTM 8562794, latitud 18L 0527290 y altura de 3312 msnm, mientras que las del terreno de avena fueron UTM 8562637, latitud 18L 0527304 y altura de 3295 msnm.

Además, se recolectaron 5 litros de solución acuosa del río Opamayo en tres puntos específicos: P1 (Julcani), P2 (Kolpa) y P3 (Cambalache). Las coordenadas de estos puntos son:

- P1: UTM 8564773, latitud 0519449, altura 3462 msnm.
- P2: UTM 8556875, latitud 0501284, altura 4221 msnm
- P3: UTM 8563192, latitud 0522978, altura 3420 ms

La toma de muestras se realizó desde la orilla, conforme al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N° 010 – 2016 ANA).

Figura 1

Muestra de paja de cebada y avena



Figura 2

Toma de muestra de agua



Preparación de los adsorbentes:

Lavado: Una vez transportadas las muestras de paja de cebada y paja de avena al laboratorio, se procedió a un lavado cuidadoso con agua destilada para eliminar las impurezas, como barro, polvo y otras.

Dsecado: Las pajas fueron cortadas para lograr un tamaño homogéneo y luego se procedió a su desecado a temperatura ambiente, manteniendo una temperatura de 18°C.

Embolsado: Las muestras de cebada y avena se colocan en bolsas de papel, las cuales se colocan sobre una bandeja de acero inoxidable para continuar con el proceso de deshidratación.

Secado: Las muestras de paja de cebada y avena se colocan en una estufa modelo IFAMIN durante 3 días, a una temperatura de 20°C, para finalizar el proceso de secado.

Triturado: Para obtener una granulometría aproximada de 3 mm de diámetro, las pajas de cebada y avena fueron molidas por separado con un molino de martillos, con el apoyo del personal de laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial.

Ensayo de la adsorción:

Se utilizaron muestras de agua con pH entre 5 y 8, provenientes de los puntos P1, P2 y P3. A cada matraz

de 500 mL se le agregaron 60 g de muestras de cebada y avena por separado, completando el volumen hasta 500 mL.

Figura 3

Ensayo de adsorbente para la adsorción de metales pesados.



Una vez añadidas las muestras de paja de cebada y avena en polvo, se procedió a agitar la mezcla con un agitador magnético para lograr una homogeneización completa. La agitación fue durante 6 horas a una temperatura entre 18 y 20°C, permitiendo un contacto adecuado entre la solución acuosa y la biomasa. Al finalizar el tiempo de adsorción, se realizó la filtración del adsorbente con la ayuda de papel filtro rápido.

Figura 4

Filtrado y desecado de las biomazas después de la adsorción.



Una vez tratadas las soluciones acuosas contaminadas con metales pesados (plomo, zinc y cobre) utilizando como adsorbentes las biomazas de paja de cebada y avena en polvo, se procedió a la filtración y al desecado de las muestras, asegurando su correcta etiquetación. Posteriormente, las muestras desecadas de cebada y avena fueron sometidas a un proceso de incineración a 600 °C durante 3 horas, seguido de una digestión en medio ácido. De igual manera, las muestras filtradas fueron sometidas a un proceso de digestión en medio ácido. Ambas series de muestras

fueron analizadas por el servicio H&F LABORATORIOS SAC, utilizando la Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) para determinar la concentración de los contaminantes.

Figura 5
Muestras de biomasa tras el proceso de adsorción y previo a su filtración y digestión



3. RESULTADOS

Tabla 1

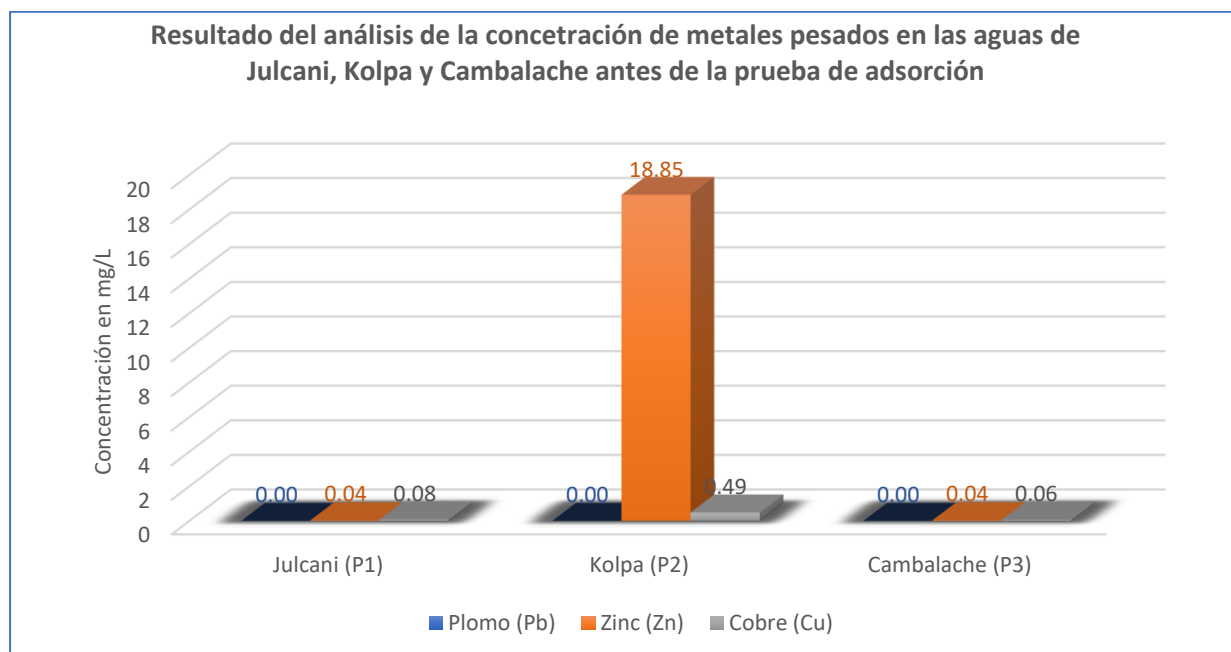
Datos del análisis en laboratorio de las aguas de Julcani, Kolpa y Cambalache en “H&F LABORATORIOS S.A.C.”, antes de la prueba de adsorción.

Descripción	ID	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)	Cobre (Cu)
		mg/L	mg/L	mg/L
		LD: 0.0	LD: 0.0	LD: 0.0
Julcani	P1	0.000	0.035	0.081
Kolpa	P2	0.000	18.845	0.485
Cambalache	P3	0.000	0.043	0.064

Nota. LD: Es el límite de detección del equipo; ID: identificador de la muestra de agua

Figura 6

Resultado del análisis de la concentración de metales pesados en las aguas de Julcani, Kolpa y Cambalache antes de la prueba de adsorción.



Nota: análisis de la concentración de metales pesados en las aguas de Julcani, Kolpa y Cambalache antes de la prueba de adsorción

Interpretación: La figura 6, muestra los resultados de la concentración de metales pesados. Con respecto al plomo (Pb): no se encontró en P1 Julcani, P2 Kolpa y P3 Cambalache. Con respecto al Zinc (Zn): existe la prevalencia en

P2 con un 18.85 mg/L, seguido de P3 con 0.043 mg/L y finalmente en P1 con 0.035 mg/L. Así mismo, con respecto al Cobre se tiene una prevalencia en P2 con 0.485 mg/L, seguido de P1 con 0.081 y finalmente P3 con 0.064 mg/L.

Tabla 2

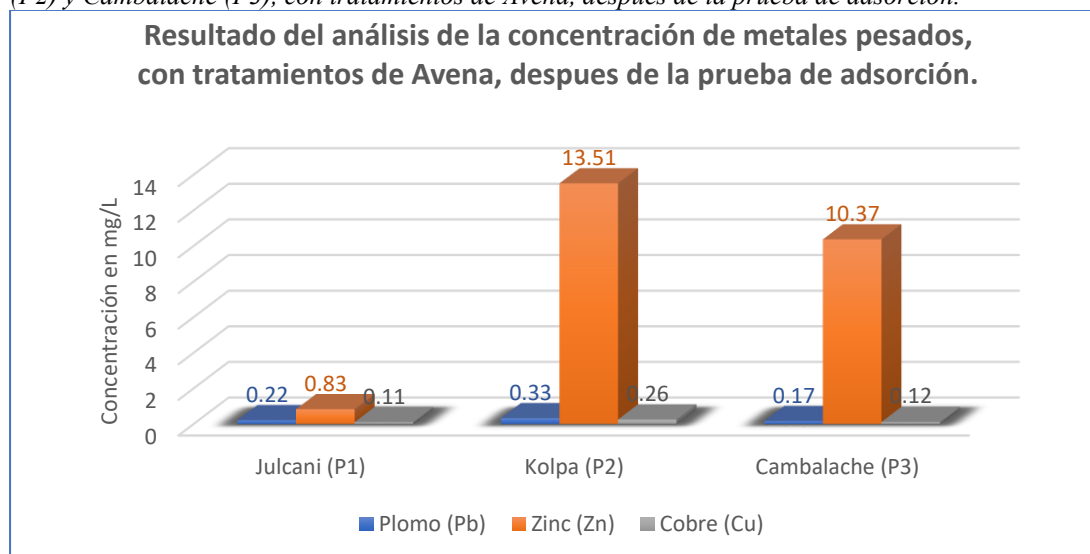
Datos del análisis de las aguas de Julcani, Kolpa y Cambalache con tratamientos de las pajas de avena en “H&F LABORATORIOS S.A.C.”, después de la prueba de adsorción.

Descripción	ID	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)	Cobre (Cu)
		mg/L	mg/L	mg/L
Avena	P1	0.215	0.834	0.109
Avena	P2	0.329	13.513	0.256
Avena	P3	0.167	10.370	0.117

Nota. LD: Es el límite de detección del equipo; ID: identificador de la muestra de agua.

Figura 7

Resultado del análisis de la concentración de metales pesados (Plomo, Zinc y Cobre) en aguas de Julcani (P1), Kolpa (P2) y Cambalache (P3), con tratamientos de Avena, después de la prueba de adsorción.



Interpretación: La figura 7, muestra los resultados de la concentración de metales en agua con tratamiento de paja de avena. Con respecto al plomo (Pb): se encontró una prevalencia de 0.329 mg/L en P2, seguido de 0.215 mg/L en P1, y con un 0.167 mg/L en P3. Con respecto al Zinc (Zn): existe una prevalencia de 13.513 mg/L en P2, seguido de 10.370 mg/L en P3 y con un 0.834 mg/L en P1. Así mismo, Con respecto al Cobre (Cu): existe una prevalencia de 0.256 mg/L en P2, seguido de 0.117 mg/L en P3 y con un 0.109 mg/L en P1.

Tabla 3

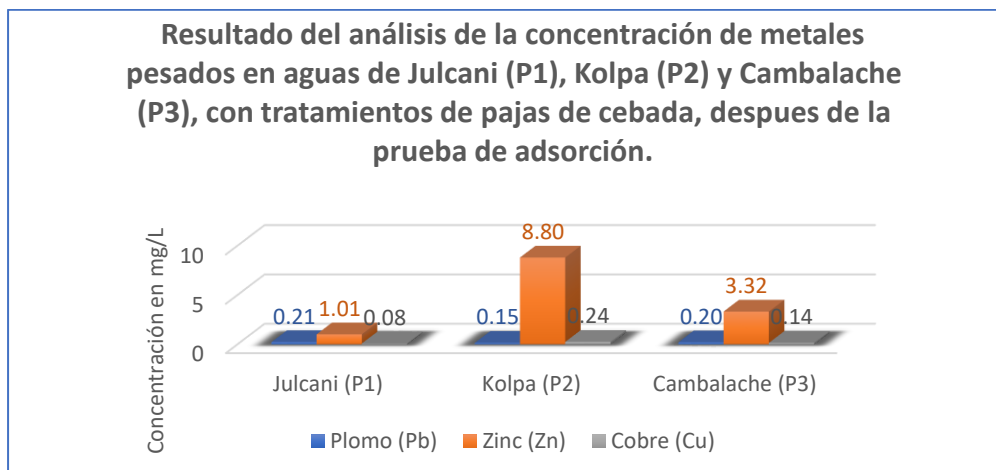
Datos del análisis de las aguas de Julcani, Kolpa y Cambalache con tratamiento de las pajas de cebada en “H&F LABORATORIOS S.A.C.”, después de la prueba de adsorción.

Descripción	ID	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)	Cobre (Cu)
		mg/L	mg/L	mg/L
Cebada	P1	0.213	1.010	0.079
Cebada	P2	0.147	8.798	0.244
Cebada	P3	0.196	3.320	0.142

Nota. LD: Es el límite de detección del equipo; ID: identificador de la muestra de agua.

Figura 8

Resultado del análisis de la concentración de metales pesados (Plomo, Zinc y Cobre) en aguas de Julcani (P1), Kolpa (P2) y Cambalache (P3), con tratamientos de pajas de cebada, después de la prueba de adsorción.



Interpretación: La figura 8, muestra los resultados de la concentración de metales en agua con tratamiento de paja de avena. Con respecto al plomo (Pb): se encontró una prevalencia de 0.213 mg/L en P1 seguido de 0.196 mg/L en P3, y con un 0.147 mg/L en P2. Con respecto al Zinc (Zn): existe una prevalencia de 8.798 mg/L en P2, seguido de 3.32 mg/L en P3 y con un 1.01 mg/L en P1. Así mismo, Con respecto al Cobre (Cu): existe una prevalencia de 0.244 mg/L en P2, seguido de 0.142 mg/L en P3 y con un 0.079 mg/L en P1.

Tabla 4

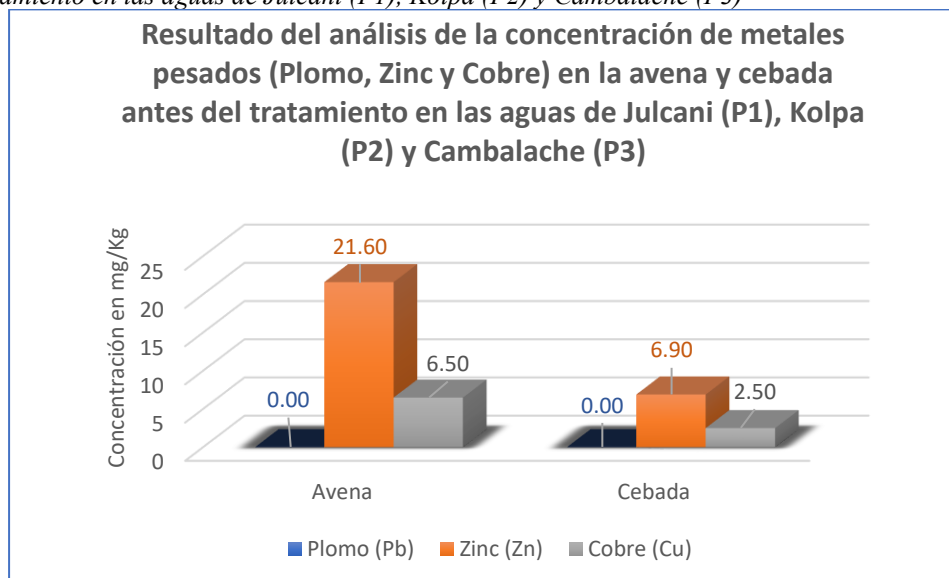
Datos del análisis en laboratorio de las muestras de Avena y Cebada en "H&F LABORATORIOS S.A.C.", antes de la prueba de adsorción de metales.

Descripción	Plomo (Pb) mg/Kg LD: 2	Zinc (Zn) mg/Kg LD: 0.5	Cobre (Cu) mg/Kg LD: 0.5
Avena	<2	21.6	6.5
Cebada	<2	6.9	2.5

Nota. LD: Es el límite de detección del equipo.

Figura 9

Resultado del análisis de la concentración de metales pesados (Plomo, Zinc y Cobre) en la avena y cebada antes del tratamiento en las aguas de Julcani (P1), Kolpa (P2) y Cambalache (P3)



Interpretación: La figura 9, muestra los resultados de la concentración de metales en agua con tratamiento de paja de avena. Con respecto al plomo (Pb): se encontró todos los valores se encuentran por debajo del límite de detección del equipo. Con respecto al Zinc (Zn): existe una prevalencia de 21.6 mg/Kg en la Avena, seguido de 6.9 mg/kg en la cebada. Así mismo, Con respecto al Cobre (Cu): existe una prevalencia de 6.5 mg/kg en avena, seguido de 2.5 mg/kg en la cebada.

Tabla 5

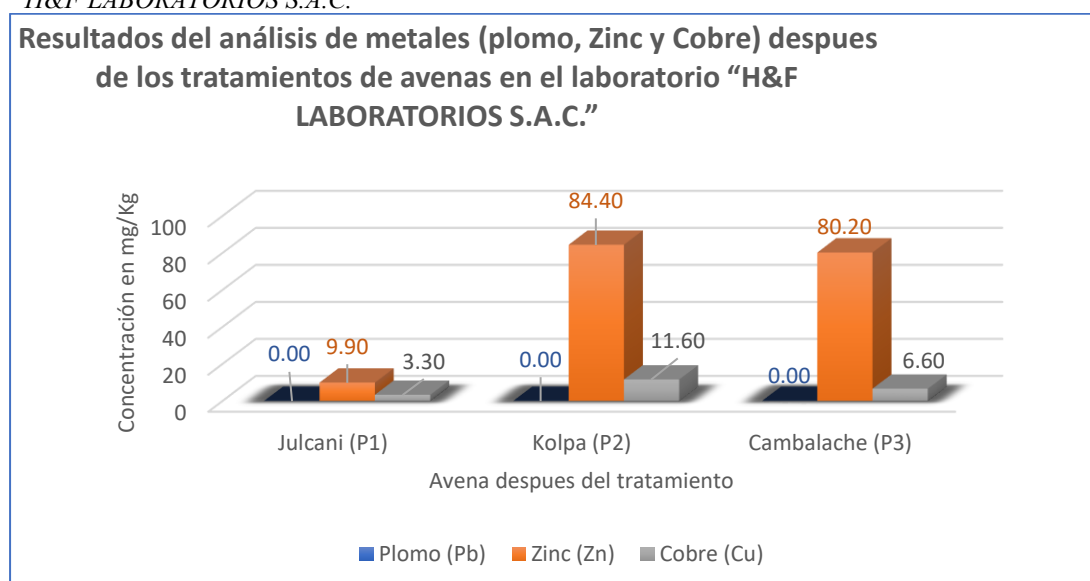
Resultados del análisis de metales (plomo, Zinc y Cobre) en los tratamientos de avenas en el laboratorio "H&F LABORATORIOS S.A.C."

Descripción	ID	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)	Cobre (Cu)
		mg/Kg LD: 2	mg/Kg LD: 0.5	mg/Kg LD: 0.5
Avena	P1	<2	9.9	3.3
Avena	P2	<2	84.4	11.6
Avena	P3	<2	80.2	6.6

Nota. LD: Es el límite de detección del equipo; ID: identificador de la muestra de agua.

Figura 40

Resultados del análisis de metales (plomo, Zinc y Cobre) después de los tratamientos de avenas en el laboratorio "H&F LABORATORIOS S.A.C."



Interpretación: La figura 10, muestra los resultados de la concentración de metales en la avena después de los tratamientos. Con respecto al plomo (Pb): se encontró todos los valores se encuentran por debajo del límite de detección del equipo. Con respecto al Zinc (Zn): existe una prevalencia de 84.4 mg/Kg en P2, seguido de 80.2 mg/kg en P3, y con 9.9 mg/kg en P1. Así mismo, Con respecto al Cobre (Cu): existe una prevalencia de 11.6 mg/kg en P2, seguido de 6.6 mg/kg en P3, y con 3.3 mg/kg en P1.

Tabla 6

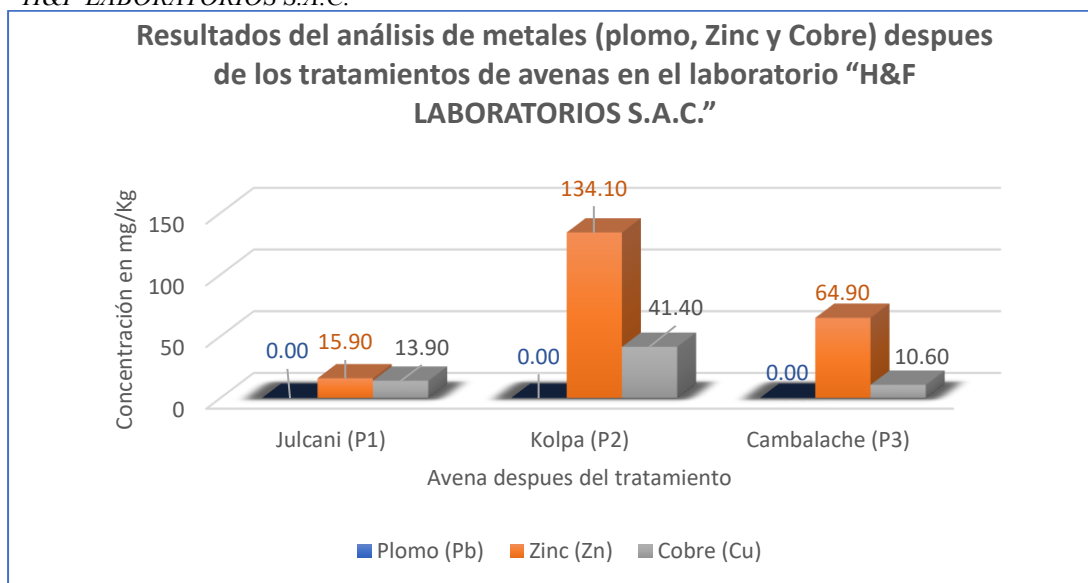
Resultados del análisis de metales (plomo, Zinc y Cobre) en los tratamientos de cebadas en el laboratorio "H&F LABORATORIOS S.A.C."

Descripción	ID	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)	Cobre (Cu)
		mg/Kg LD: 2	mg/Kg LD: 0.5	mg/Kg LD: 0.5
Cebada	P1	<2	15.9	13.9
Cebada	P2	<2	134.1	41.4
Cebada	P3	<2	64.9	10.6

Nota. LD: Es el límite de detección del equipo; ID: identificador de la muestra de agua.

Figura 51

Resultados del análisis de metales (plomo, Zinc y Cobre) después de los tratamientos de avenas en el laboratorio “H&F LABORATORIOS S.A.C.”



Interpretación: La figura 11, muestra los resultados de la concentración de metales en la avena después de los tratamientos. Con respecto al plomo (Pb): se encontró todos los valores se encuentran por debajo del límite de detección del equipo. Con respecto al Zinc (Zn): existe una prevalencia de 134.1 mg/Kg en P2, seguido de 64.9 mg/kg en P3, y con 15.9 mg/kg en P1. Así mismo, Con respecto al Cobre (Cu): existe una prevalencia de 41.4 mg/kg en P2, seguido de 13.9 mg/kg en P2, y con 10.6 mg/kg en P3.

Tabla 7

Resultados de la eficiencia de adsorción de metales pesados (Plomo, Zinc y Cobre), en la muestra del agua de Kolpa

Nota. LD: Es el límite de detección del equipo. ∅: No determinado.

Nombre del bente	Pre prueba			Pos prueba			Eficiencia de adsorción (%)		
	Pb mg/L	Zn mg/L	Cu mg/L	Pb mg/L	Zn mg/L	Cu mg/L	Pb %	Zn %	Cu %
	LD:	LD:	LD:	LD:	LD:	LD:	LD:	LD:	LD:
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Avena	0.000	18.845	0.485	0.329	13.513	0.256	∅	28.29	47.22
Cebada	0.000	18.845	0.485	0.147	8.798	0.244	∅	53.31	49.69

Interpretación: La tabla 7, muestra los resultados del cálculo de la eficiencia de adsorción con respecto al elemento plomo (Pb) no se pudo determinar la eficiencia puesto que las muestras iniciales no presentan valor ninguno en la pre prueba. Con respecto al Zinc (Zn) la Cebada ha adsorbido el 53.31 % del metal presente en la solución, mientras la paja de avena solo un 28.29%. Así mismo con respecto al Cobre (Cu) la cebada ha adsorbido el 49.69 % del metal presente en la solución, mientras que la avena un 47.22%.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que las pajas de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*) presentan una capacidad significativa de adsorción de metales pesados, especialmente cobre (Cu) y zinc

(Zn), lo que respalda su potencial como biosorbentes de bajo costo para la remediación de aguas contaminadas. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que destacan la eficiencia de materiales lignocelulósicos en la remoción de contaminantes metálicos, debido a la presencia de

grupos funcionales activos capaces de interactuar con iones metálicos en solución.

Al comparar los resultados con la investigación de Liu et al. (2020), se observan diferencias importantes en la capacidad de adsorción. Dichos autores desarrollaron un adsorbente modificado (WS-CA-AM) mediante la incorporación de grupos funcionales de acrilamida y ácido cítrico, alcanzando capacidades de adsorción considerablemente superiores para compuestos como naranja de metilo y azul de metileno. Esta diferencia puede explicarse por la modificación química del material, que incrementa la disponibilidad de sitios activos y mejora la afinidad por los contaminantes. En contraste, el presente estudio utilizó biomasa sin modificación química, lo que, si bien reduce la eficiencia máxima de adsorción, representa una alternativa más accesible, económica y sostenible para contextos rurales.

En relación con el estudio de Dimitrijević et al. (2023), que empleó paja de avena modificada mediante solventes eutécticos profundos (DES), se observa una mayor proximidad en los resultados. Dichos autores reportaron capacidades de adsorción de 48,21 mg/g para Cu(II) y 55,06 mg/g para Zn(II), valores comparables en términos de tendencia con los obtenidos en esta investigación. En el presente estudio, la paja de cebada mostró una mayor eficiencia de adsorción para zinc (53,31%) y cobre (49,69%) en comparación con la paja de avena (28,29% y 47,22%, respectivamente), lo cual sugiere que la estructura y composición de cada biomasa influyen en su desempeño adsorbente. No obstante, la imposibilidad de determinar la adsorción de plomo (Pb), debido a la ausencia de concentraciones detectables en las muestras iniciales, limita la comparación con otros estudios y restringe el alcance de los resultados.

Asimismo, las variaciones observadas entre los puntos de muestreo (Julcani, Kolpa y Cambalache) evidencian que la eficiencia de adsorción está influenciada por las características fisicoquímicas del agua, tales como la concentración inicial de metales, el pH y la presencia de otros compuestos en solución. Esto coincide con la literatura, que señala que los procesos de bioadsorción son altamente dependientes de las condiciones del medio, lo que puede afectar tanto la cinética como la capacidad de adsorción.

Desde una perspectiva aplicada, el uso de residuos agrícolas locales como biosorbentes representa una alternativa viable para la remediación hídrica en zonas rurales y mineras, como el caso del río Opamayo. Además de contribuir a la reducción de contaminantes, esta estrategia promueve la valorización de subproductos agrícolas, alineándose con enfoques de economía circular y sostenibilidad ambiental.

No obstante, el estudio presenta limitaciones importantes que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, la escasez de antecedentes científicos a nivel local limita la posibilidad de contrastar los hallazgos con investigaciones realizadas en condiciones similares. En segundo lugar, el diseño de investigación de tipo transversal implicó la recolección de datos en un único periodo de tiempo, lo que impide evaluar la variabilidad temporal de la contaminación y la estabilidad del proceso de adsorción. Asimismo, no se evaluaron parámetros clave como isothermas de adsorción, cinética del proceso ni la influencia detallada de variables fisicoquímicas (pH, temperatura, competencia iónica), lo que restringe la comprensión integral del mecanismo de adsorción.

En este sentido, se plantean diversas líneas de investigación futura. Se recomienda realizar estudios longitudinales que permitan evaluar la variabilidad estacional de la contaminación y la eficiencia de adsorción en el tiempo. Asimismo, es necesario profundizar en el análisis de modelos cinéticos e isotérmicos para describir con mayor precisión el comportamiento de los biosorbentes. Otra línea relevante es la modificación química o física de las pajas de cebada y avena, con el fin de mejorar su capacidad adsorbente y compararla con materiales modificados. Finalmente, se sugiere evaluar la regeneración, reutilización y disposición final de los biosorbentes, así como realizar estudios a escala piloto o real que permitan validar su aplicabilidad en sistemas de tratamiento de aguas.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman el potencial de las pajas de cebada y avena como alternativas sostenibles para la remediación de aguas contaminadas; sin embargo, su implementación a mayor escala requiere de estudios complementarios que permitan optimizar su eficiencia y garantizar su viabilidad técnica y ambiental.

5. CONCLUSIÓN

En esta investigación se evaluó la capacidad de adsorción de paja de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*) para metales pesados como Pb (plomo), Cu (cobre) y Zn (zinc) en muestras de 1 L de agua provenientes de tres puntos del río Opamayo: Julcani (P1), Kolpa (P2) y Cambalache (P3). Las concentraciones de los metales fueron analizadas utilizando espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), con un límite de detección (LD) de 0.0 mg/L para todos los metales.

En las muestras de P1, las concentraciones fueron: 0.000 mg/L de Pb, 0.035 mg/L de Zn y 0.081 mg/L de Cu. En las muestras de P2, las concentraciones fueron: 0.000 mg/L de Pb, 18.845 mg/L de Zn y 0.485 mg/L de Cu. Para las muestras de P3, las concentraciones

fueron: 0.000 mg/L de Pb, 0.043 mg/L de Zn y 0.064 mg/L de Cu.

La capacidad de adsorción de las especies vegetales fue evaluada con los siguientes resultados:

- **Avena (P1):** LD: 2, concentración de Pb < 2 ppm, LD: 0.5, concentración de Cu: 9.9 ppm, LD: 0.5, concentración de Zn: 3.3 ppm.
- **Avena (P2):** LD: 2, concentración de Pb < 2 ppm, LD: 0.5, concentración de Cu: 84.4 ppm, LD: 0.5, concentración de Zn: 11.6 ppm.
- **Avena (P3):** LD: 2, concentración de Pb < 2 ppm, LD: 0.5, concentración de Cu: 80.2 ppm, LD: 0.5, concentración de Zn: 6.6 ppm.
- **Cebada (P1):** LD: 2, concentración de Pb < 2 ppm, LD: 0.5, concentración de Cu: 15.9 ppm, LD: 0.5, concentración de Zn: 13.9 ppm.
- **Cebada (P2):** LD: 2, concentración de Pb < 2 ppm, LD: 0.5, concentración de Cu: 134.1 ppm, LD: 0.5, concentración de Zn: 41.4 ppm.
- **Cebada (P3):** LD: 2, concentración de Pb < 2 ppm, LD: 0.5, concentración de Cu: 64.9 ppm, LD: 0.5, concentración de Zn: 10.6 ppm.

Se determinó la capacidad de adsorción de pajas de cebada (*Hordeum vulgare*) para los metales Cu, Pb y Zn. En cuanto al plomo (Pb), no fue posible evaluar la eficiencia de adsorción, ya que las muestras iniciales no presentaron concentración detectable de este metal en la prueba preliminar de análisis de agua. Por otro lado, en el caso del zinc (Zn), las pajas de cebada adsorbieron el 53.31 % del metal presente en la solución. Respecto al cobre (Cu), la cebada logró adsorber el 49.69 % del metal en la solución.

Se evaluó la capacidad de adsorción de pajas de avena (*Avena sativa*) para los metales Cu, Pb y Zn. En el caso del plomo (Pb), no fue posible determinar la eficiencia de adsorción, dado que las muestras iniciales no presentaron concentración detectable de este metal en la prueba preliminar de análisis de agua. En cuanto al zinc (Zn), las pajas de avena adsorbieron únicamente el 28.29 % del metal presente en la solución. Por otro lado, en lo que respecta al cobre (Cu), las pajas de avena lograron adsorber el 47.22 % del metal presente en la solución.

Se comparó la adsorción de metales pesados entre pajas de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*) utilizando el estadístico t de Student. Para el metal pesado Zinc (Zn), se obtuvo un p-valor de 0.640 en muestras independientes, lo que indica que no existe una diferencia significativa en las medias de las eficiencias de acumulación entre avena y cebada. Esto sugiere que la cebada tiene una mayor eficiencia de

acumulación de Zinc, con una diferencia del 6.54% con respecto a la avena. Por otro lado, para el Cobre (Cu), se obtuvo un p-valor de 0.016 en muestras independientes, lo que indica que sí existe una diferencia significativa en las medias de las eficiencias de acumulación. Esto implica que tanto la avena como la cebada tienen una capacidad similar de acumulación de Cobre de manera estadísticamente significativa.

6. REFERENCIAS

Admin. (2017, diciembre 18). ¿Qué es la contaminación ambiental? *¡Cuidemos el planeta!*
<https://cuidemoselplaneta.org/contaminacion-ambiental/>

AGQ Labs. (2022, junio 21). Drenaje ácido de minas, caracterización de relaves mineros en Colombia. *AGQ Labs Colombia*.
<https://agqlabs.co/2022/06/21/drenaje-acido-minas/>

Akindolie, M. S., & Choi, H. J. (2023a). Acid modification of lignocellulosic derived material for dye and heavy metals removal: A review. *Environmental Engineering Research*, 28(2).
<https://doi.org/10.4491/eer.2021.574>

Akindolie, M. S., & Choi, H. J. (2023b). Acid modification of lignocellulosic derived material for dye and heavy metals removal: A review. *Environmental Engineering Research*, 28(2).
<https://doi.org/10.4491/eer.2021.574>

ANA. (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N°010-2016-ANA)*.
www.ana.gob.pe

Belc, N., Mustatea, G., Apostol, L., Iorga, S., Vlăduț, V.-N., & Mosoiu, C. (2019). Cereal supply chain waste in the context of circular economy. *E3S Web of Conferences*, 112, 03031.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911203031>

Bravo, C. P., & Quispe, L. S. (2018). METALES PESADOS: FUENTES Y SU TOXICIDAD SOBRE LA SALUD HUMANA. *Ciencias*, 2(1), Article 1.
<https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.842>

Burakov, A. E., Galunin, E. V., Burakova, I. V., Kucherova, A. E., Agarwal, S., Tkachev, A. G., & Gupta, V. K. (2018). Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater

- treatment purposes: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 702-712. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.034>
- Calderón, M. G. B. (2018). *INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE ENZIMAS EXÓGENAS Y Saccharomyces cerevisiae EN LAS DIETAS DE OVINOS SOBRE LA FERMENTACIÓN RUMINAL in vivo E in vitro DE FORRAJES FIBROSOS*.
- Chai, W. S., Cheun, J. Y., Kumar, P. S., Mubashir, M., Majeed, Z., Banat, F., Ho, S.-H., & Show, P. L. (2021). A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126589. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.12.6589>
- Chakraborty, R., Asthana, A., Singh, A. K., Jain, B., & Susan, A. B. H. (2022). Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: A review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2), 342-379. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722811>
- Correa Cuba, O. (2021). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS DE LA MICROCUENCA AGROPECUARIA DEL RÍO HUANCARAY- PERÚ. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(1), 26-38. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320>
- Demirbas, A. (2008). Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2), 220-229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.024>
- Dimitrijević, J., Jevtić, S., Marinković, A., Simić, M., Koprivica, M., & Petrović, J. (2023). Ability of Deep Eutectic Solvent Modified Oat Straw for Cu(II), Zn(II), and Se(IV) Ions Removal. *Processes*, 11(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/pr11051308>
- Dorin, I., Diaconescu, C., & Topor, D. I. (2014). The Role of Mining in National Economies. *International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences*, 4(3), Pages 155-160. <https://doi.org/10.6007/IJARAFMS/v4-i3/1116>
- Duany-Timosthe, S., Arias-Lafargue, T., Bessy-Horrutiner, T., Rodríguez-Heredia, D., Duany-Timosthe, S., Arias-Lafargue, T., Bessy-Horrutiner, T., & Rodríguez-Heredia, D. (2022a). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 42(1), 94-113.
- Duany-Timosthe, S., Arias-Lafargue, T., Bessy-Horrutiner, T., Rodríguez-Heredia, D., Duany-Timosthe, S., Arias-Lafargue, T., Bessy-Horrutiner, T., & Rodríguez-Heredia, D. (2022b). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 42(1), 94-113. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852022000100094&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Efice buena química. (s. f.). Ácido Clorhídrico. *Efice*. Recuperado 16 de agosto de 2023, de <https://www.efice.uy/producto/acido-clorhidrico/>
- Equipo editorial. (s. f.). Celulosa—Concepto, historia, función, usos y propiedades. *Concepto*. Recuperado 16 de agosto de 2023, de <https://concepto.de/celulosa/>
- Espectrometría ICP*. (2019, octubre 23). Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/cnea/cab/laboratorios-e-instalaciones/quimica/espectrometria-icp>
- Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN* (Sexta edición).
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 26, 141-153. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1137-66272003000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- García, M. M. (2011). *Disturbios del estado ácido-básico en el paciente crítico*.
- Hatiya, N. A., Reshad, A. S., & Negie, Z. W. (2022). Chemical Modification of Neem (*Azadirachta indica*) Biomass as Bioadsorbent for Removal of Pb²⁺ Ion from Aqueous Waste Water. *Adsorption Science & Technology*, 2022, e7813513. <https://doi.org/10.1155/2022/7813513>
- Jelena Dimitrijevi. (s. f.). *Processes | Free Full-Text | Ability of Deep Eutectic Solvent*

- Modified Oat Straw for Cu(II), Zn(II), and Se(IV) Ions Removal*. Recuperado 2 de agosto de 2023, de <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/5/1308>
- Liu, Q., Li, Y., Chen, H., Lu, J., Yu, G., Möslang, M., & Zhou, Y. (2020). Superior adsorption capacity of functionalised straw adsorbent for dyes and heavy-metal ions. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 121040. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121040>
- Melgar, R. E. R. (s. f.). *PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:*
- Meseldzija, S., Petrovic, J., Onjia, A., Volkov-Husovic, T., Nestic, A., & Vukelic, N. (2019). Utilization of agro-industrial waste for removal of copper ions from aqueous solutions and mining-wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75, 246-252. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.031>
- Mesias, G. G., Shakai, G. S., Martínez, S. P., & Pilco, C. J. (2022). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados: Uso de subproductos agroindustriais para bioadsorção de metais pesados. *STUDIES IN ENVIRONMENTAL AND ANIMAL SCIENCES*, 3(3), Article 3. <https://doi.org/10.54020/seasv3n3-022>
- Muhammad, A., Lee, D., Shin, Y., & Park, J. (2021). Recent Progress in Polysaccharide Aerogels: Their Synthesis, Application, and Future Outlook. *Polymers*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/polym13081347>
- Ogunlalu, O., Oyekunle, I. P., Iwuzor, K. O., Aderibigbe, A. D., & Emenike, E. C. (2021). Trends in the mitigation of heavy metal ions from aqueous solutions using unmodified and chemically-modified agricultural waste adsorbents. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100188>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A., 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. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Paul, D. (2017). Research on heavy metal pollution of river Ganga: A review. *Annals of Agrarian Science*, 15(2), 278-286. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.04.001>
- Ramírez, R. R. R. (2017). *Metodología para la investigación y redacción*.
- Remigio, A. C. (2015). *IMPACTO DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN EL RECURSO HÍDRICO DE LA MICROCUENCA QUEBRADA PÁRAC, DISTRITO DE SAN MATEO DE HUANCHOR, LIMA*.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz Lagos, M., & González Jimenez, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+D*, 16(2), 66-77.
- Sanchez-Silva, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benitez, F. J., Fonseca-Cantabrana, Á., Sanchez-Silva, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benitez, F. J., & Fonseca-Cantabrana, Á. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 23. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261>
- Tahiruddin, N. S. M., Aziz, R. A., Ali, R., & Taib, N. I. (2023). Potential of using jackfruit peel (*Artocarpus heterophyllus*) as green solution for removal of copper (II) and zinc (II) from aqueous solution: Adsorption kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109953. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109953>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015a). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109-123.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015b). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109-123.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-77992015000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Timothy, N., & Tagui Williams, E. (2019). Environmental Pollution by Heavy Metal: An Overview. *International Journal of Environmental Chemistry*, 3(2), 72. <https://doi.org/10.11648/j.ijec.20190302.14>

ULA), I. P. (Licentiate, Professor. (2021, diciembre 17). ¿Qué es la protonación? *YuBrain*. <https://www.yubrain.com/ciencia/quimica/protonacion-definicion/>

Vallarino, I. C. C. (2011). *DETECCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUA*.