

Biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina la Rinconada con biomasa de Waraqqo (*echinopsis maximiliana*) 2022 – 2023

Biosorption of total heavy metals from wastewater from the la Rinconada mine with Waraqqo biomass (*echinopsis maximiliana*) 2022 – 2023

Delfín León Hancco^{1,*}

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Resumen

El presente estudio, trata de biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina la Rinconada, el agua residual se vierte directamente a las escorrentías y ríos; para tal efecto, como objetivo de estudio se planteó evaluar el nivel de concentración inicial y concentración final de metales pesados totales de agua residual antes y después del uso de biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*), como hipótesis se planteó la eficiencia de biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*) durante la biosorción de metales pesados totales tiene un rendimiento “Alto”. El estudio se llevó a cabo durante el periodo de 2022 – 2023; la muestra fue tomada de agua residual de la laguna de Lunar de oro. El método utilizado, se pesó 0,3 gramos de biosorbente y se activó en dos etapas con solución hidrólisis ácida de HNO_3 0,3N y alcalina con NaOH 0,9M, luego se agregó un volumen de 150 mL de muestra de agua residual, se ajustó a pH 10,0 y 12,10 y en tiempo de 60 minutos. Como resultado se logró remover: Al un 85,97 % (19,1 a 2,68 mg/L), Fe un 99,51 % (11,6 a 0,06 mg/L), Mn un 97,49 % (6,7095 a 0,17 mg/L), Zn un 99,85 % (2,04 a 0,0031 mg/L), As un 83,24 % (0,179 a 0,03 mg/L), Pb un 96,84 % (0,0822 a 0,0026 mg/L) y Hg un 95,40 % (0,0087 a 0,0004 mg/L). El uso de biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*) es eficiente en la biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina.

Palabras clave: agua residual, biosorción, biomasa, mina la Rinconada, metales pesados totales, Waraqqo.

Abstract

The present study deals with biosorption of total heavy metals from wastewater from the Rinconada mine, the wastewater is discharged directly into runoff and rivers; For this purpose, the objective of the study was to evaluate the level of initial concentration and final concentration of total heavy metals in wastewater before and after the use of Waraqqo biomass (*Echinopsis maximiliana*), as a hypothesis the efficiency of Waraqqo biomass was proposed (*Echinopsis maximiliana*) during the biosorption of total heavy metals has a “High” performance. The study was carried out during the period 2022 – 2023; The sample was taken from residual water from the Lunar de Oro lagoon. The method to follow, 0.3 grams of biosorbent was weighed and activated in two stages with acidic hydrolysis solution of 0.3N HNO_3 and alkaline with 0.9M NaOH, then a volume of 150 mL of residual water sample was added. It was adjusted to pH 10.0 and 12.10 and in a time of 60 minutes. As a result, it was possible to remove: Al 85.97% (19.1 to 2.68 mg/L), Fe 99.51% (11.6 to 0.06 mg/L), Mn 97.49%. (6.7095 at 0.17 mg/L), Zn 99.85% (2.04 at 0.0031 mg/L), As a 83.24% (0.179 to 0.03 mg/L), Pb 96.84% (0.0822 to 0.0026 mg/L) and Hg 95.40% (0.0087 to 0.0004 mg/L). The use of Waraqqo biomass (*Echinopsis maximiliana*) is efficient in the biosorption of total heavy metals from mine wastewater.

Keyword: biomass, biosorption, la Rinconada mine, residual water, total heavy metals, Waraqqo.

Recibido: 13 ene. 2024

Aceptado: 05 my. 2024

Publicado: 30 jun. 2024

*Autor para correspondencia: dleonh@unap.edu.pe

Cómo citar:

Leon Hancco, D. (2024). Biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina la Rinconada con biomasa de Waraqqo (*echinopsis maximiliana*) 2022 – 2023. *Revista de Investigaciones*, 13(2), 77-90. <https://doi.org/10.26788/ri.v13i2.6195>

Introducción

En el presente trabajo, se investigó la biosorción de metales pesados en aguas residuales de la mina, utilizando biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*), para tal efecto, se sustenta que la biosorción es un proceso de control ambiental biológico que consiste en la eliminación de contaminantes utilizando biomasa inerte; este proceso tiene lugar a través de fenómenos físicos (adsorción) y fenómenos químicos (intercambio iónico), este método ha demostrado ser muy eficaz en la eliminación de especies metálicas plomo, cobre, plata, hierro (Areco, 2011). Asimismo, el proceso involucra una fase sólida (biosorbente) y una fase líquida (solvente) que contiene los solutos (adsorbato) a ser adsorbidos debido a que el biosorbente tiene una alta afinidad por el adsorbato (Mori, et al., 2013); del mismo modo, es el método que requiere unos minutos de tratamiento; además, el procedimiento es muy eficaz en la eliminación de sustancias metálicas (Obelholser y Garrity, 1992). Por tanto, la “biosorción” implica la remoción de contaminantes en base a características de tipos específicos de biomasa viva o muerta a través de fenómenos físicos como adsorción, intercambio iónico o procesos metabólicos, este método es muy eficaz para eliminar trazas metálicas y puede ser preciso y selectivo que solo tarda unos minutos el proceso de tratamiento (Obelholser y Garrity, 1992).

La biosorción, según (Fomina y Gadd, 2014) se define como un proceso fisicoquímico en el que se capturan compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en soluciones acuosas para retirarlos o recuperarlos del medio en el que se encuentran; asimismo, (Rayson y Williams, 2011) considera que la capacidad de los biosorbentes para adsorber especies de metales iónicos en soluciones acuosas es adecuada para la biorremediación y regeneración de aguas residuales industriales contaminadas con metales pesados; por otra parte, según (He y Chen, 2014) sostiene que la mayoría de grupos funcionales más importantes en el proceso de biosorción son carboxilo, hidroxilo, sulfato, fosfato y amina; del mismo modo, (Won, et al., 2014) sostiene que los grupos carboxilo son los más importantes para capturar iones metálicos, seguidos de los sulfatos unidos a polisacáridos y proteínas.

Por otro lado, los metales pesados, según (Fergusson, 1990) es considerado como “aquejlos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua y cuyas concentraciones en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas”; del mismo modo, según (Alonso, 2008), señala “Cualquier catión que tenga un peso atómico superior a 23, se considera un metal pesado; entre ellos, se puede destacar el níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro, mercurio, entre otros” y por otra parte (OEFA, 2015) señala que el agua residual, es aquel agua cuyas propiedades originales han sido modificadas por la actividad humana y debido a su calidad, requiere un tratamiento previo antes de su reutilización, vertido en cuerpos de agua naturales o sistemas de alcantarillado. Asimismo, los metales pesados son un grupo de elementos con propiedades metálicas como los metales de transición, algunos semimetálicos, lantánidos y actinídos. El criterio de clasificación más común es la gravedad específica, dependiendo de si un elemento con una densidad superior a 5 g/cm³ pertenece a este grupo; sin embargo, algunos autores consideran inapropiada esta definición, ya que la gravedad específica no indica la reactividad o toxicidad del metal (Duffus, 2002). Por consiguiente, (Alloway, 2013) sostiene el término “metal”, se refiere a cualquier metal o metaloide que pueda causar problemas de toxicidad; siendo así, los metales pesados son uno de los contaminantes ambientales más peligrosos, porque no son biodegradables y pueden acumularse en el cuerpo. Se consideran a los siguientes metales cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn). (Basterrechea et al., 2003) y, asimismo, (Calderon, 1997) . Los metales pesados son elementos químicos con pesos atómicos entre 63,55 (Cu) y 200,59 (Hg) y pesos específicos superiores a 4 g/cm³ (Baird y Cann, 2014).

Por otra parte, Carreño et al. (2018) las aguas residuales son las aguas recolectadas en los sistemas de alcantarillado o vertidas directamente al medio ambiente debido a la actividad humana y animal, así como las precipitaciones; debido a que se componen principalmente de metales pesados (Pb, Hg, Cd, Zn, etc.) y metaloides o semimetálicos (Sb y As), los efluentes de las minas se consideran los más contaminantes y de mayor riesgo para su uso o disposición.

Según (OEFA, 2015) estas aguas, cuyas propiedades originales han sido alteradas por la intervención humana, necesitan un tratamiento previo antes de poder ser reutilizadas, vertidas a cuerpos de agua naturales o vertidas a sistemas de alcantarillado.

Para la Norma Técnica de Edificaciones (OS.90, 2006) “agua que ha sido usada por una comunidad o industria y que contiene material orgánico o inorgánico disuelto o en suspensión” es lo que se conoce como agua residual.

Respecto a los absorbentes naturales, también conocidos como biosorbentes, absorbentes no convencionales o verdes, se producen no solo a partir de materia viva o biomasa, sino también de residuos alimentarios, agrícolas y ganaderos. De igual forma (Cañizares, 2000) consideró el uso de sistemas biológicos para la remoción de metales pesados de medios líquidos, un proceso eficiente y de bajo costo (Valladares *et al.*, 2017) estas consideraciones también se corroboran con (Fernandez, 2004) el término “biomasa” se define como un conjunto de materiales orgánicos caracterizados por su origen (vegetal o animal) y sus propiedades, también incluye residuos y desechos orgánicos que pueden ser aprovechados. Asimismo, para García *et al.* (2011) la capacidad de los biosorbentes para adsorber especies de metales iónicos en soluciones acuosas es apropiada para la biorremediación y regeneración de aguas residuales industriales contaminadas con metales pesados.

Al respecto, se han llevado a cabo numerosos estudios para evaluar los contaminantes y evaluar el impacto ambiental de la minería, en efecto (Fernández, 2019) encontró metales pesados en el río Puyango Tumbes con concentraciones de mercurio (Hg) 0,0001 mg/L, plomo (Pb) 0,029 mg/L, arsénico (As) 0,012 mg/L y una cantidad de cianuro (CN^-) de 0,561 mg/L. (Sanga, 2007) realizó estudios de remoción de metales pesados, utilizando pectina como material biodegradable. También (Campos y Rios, 2021) examinó la eficiencia de *Opuntia Ficus Indica* (L.) Miller y *Echinopsis Pachanoi* en la remoción de plomo (II) en la cuenca alta del río Moche, Trujillo, se

descubrió que la especie *Opuntia ficusindica* (L.) Miller “nopal” tenía la mayor eficiencia de remoción, con un 69,28 %. Del mismo modo, (Del Carpio, 2017) realizó estudio de biosorción de Pb (II) y Cd (II) utilizando como biomasa *E. coli* aislada de agua contaminada del río Huatanay en la ciudad de Cusco. (Flores, 2016) realizó estudios de evaluación de la relación entre las concentraciones de metales pesados y la actividad minera en las aguas del Río Grande, se demostró que el plomo es el único metal que supera los estándares ambientales nacionales para agua clase A3. (Gonzales y Moreno, 2016) realizó un estudio sobre el efecto de la velocidad y temperatura de agitación en la adsorción de plomo (Pb) y zinc (Zn) con la cáscara de plátano (*Musa sapientum*) en aguas residuales de un laboratorio de análisis químico. (Vega, 2012) realizó un estudio del nivel de contaminación con metales pesados (Pb, Cu, Hg, As, Fe) en el río el Toro del distrito de Huamachuco de Sánchez-Carrón entre los años 2009 – 2010, por lo tanto, precisa que la concentración de metales pesados superó el límite máximo permisible (MLP) y por otra parte (Cañizares, 2000) realizó estudios de biosorción de metales pesados utilizando biomasa microbiana y concluyó que el sistema microbiano para la recuperación de metales pesados depende de muchos factores, incluida la capacidad biosorbente, la eficiencia y la selectividad, la facilidad de recuperación y el tratamiento físico y químico. Respecto a aluminio (Garbosa, 1996) señala que a dosis más altas de aluminio disminuyen el volumen del bulbo y la concentración de hemo, aumentan la resistencia osmótica y acortan la vida media de los glóbulos rojos

En el Diario oficial el peruano, publicado el Decreto Supremo (D.S. No 010-MINAM, 2010) cargas Máximas Permitidas para la descarga de efluentes líquidos de Operaciones Mineras y Metalúrgicas, están establecidos los Límites Máximos de metales pesados totales en cualquier momento: Zinc 1,5 mg/L, Mercurio 0,002 mg/L, Plomo 1 0,2 mg/L, Fe 2 ml/L, Cobre 0,5 mg/L, cadmio 0,05 mg/L, arsénico 0,1 mg/L y entre otros se observa en la tabla 1.

Tabla 1

Límites Máximos Permisibles (LMP) para descarga de efluentes

Parámetro	Unidad (mg/L)
Zinc (Zn)	1,5
Mercurio (Hg)	0,002
Plomo (Pb)	0,2
Fierro (Fe)	2,0
Cromo (Cr)	0,1
Cobre (Cu)	0,5
Cadmio (Cd)	0,05
Arsénico (As)	0,1

Fuente: Diario Oficial el Peruano – D.S. N° 010 – 2010 – MINAM

Los Límites Máximos Permisibles para descarga de efluentes, publicados en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM, publicado en el Diario Oficial el Peruano (Tabla 1).

Asimismo, según el Decreto Supremo (D.S. N° 004-2017-MINAM, 2017) están establecidos el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Agua en sus diferentes categorías.

La importancia del estudio se centra en la alta concentración de metales pesados y su acumulación continua en los seres vivos, que es una de las alternativas para el proceso de biosorción, que involucra materiales biológicos y se considera como un mecanismo para la eliminación de metales pesados. La contaminación del agua se entiende como los cambios desfavorables que sufre el agua cuando se le añaden una serie de sustancias que alteran sus condiciones naturales y suponen graves riesgos para la salud y el bienestar humanos. De particular peligro son la contaminación con altas concentraciones de algunos metales pesados y el aumento de los efectos nocivos causados por los fenómenos de persistencia y biomagnificación debidos a las actividades humanas (Branco *et al.*, 1984).

Con el uso de biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*), se investigó la biosorción de metales pesados en aguas residuales de operaciones mineras, la investigación se enfoca en la detección, evaluación y gestión de impactos ambientales a través de un proceso de monitoreo basado en la educación ambiental y bajo el compromiso

de salvaguardar los recursos hídricos, cuidar y preservar el medio ambiente, para lo cual, la técnica de biosorción fue exitosa en la remoción de metales pesados.

Métodos

El lugar de investigación está ubicado en la laguna del centro poblado de Lunar de Oro de la mina la Rinconada de la región de Puno (14°37'24"; 69°26'54").

Figura 1

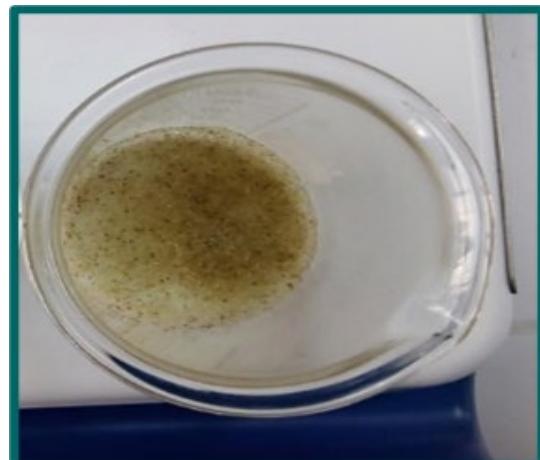
Ubicación de toma de muestra de agua residual



Los procedimientos operativos se realizaron en las instalaciones del laboratorio de aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – PUNO, durante el periodo de 2022 – 2023, ubicado a 4873 msnm, debido a que la institución cuenta con suficiente ambiente y materiales; las muestras fueron enviadas a Laboratorios Analíticos del Sur, Laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de la Calidad (INACAL) de la ciudad de Arequipa.

Figura 2

Activación acida



Se observa la activación ácida del Biosorbente (Figura 2), se observa activación alcalina del biosorbente (Figura 3).

Figura 3
Activación alcalina



Ilustra el proceso de biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina (Figura 4).

Figura 4
Proceso de biosorción



Descripción de Métodos

La muestra de estudio se consideró 4 litros de agua residual efluente de la mina, aplicando el tipo de muestreo simple o puntual, siguiendo los procedimientos establecidos en la Resolución Jefatural (R.J. No 010-2016-ANA, 2016); el cual, consiste en tomar una cantidad de agua en un lugar o momento específico para su análisis individual. La muestra representativa para la biosorción, se

consideró 0,3 gramos de biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*).

Los siguientes materiales, insumos e instrumentos fueron calibrado por el personal técnico especializado de laboratorio de aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – PUNO.

Materiales de Vidrio y otros: Vaso precipitado de 200 mL y 50 mL, probetas, pipetas, mortero y Papel filtro Whatman N° 42.

Sustancias: Agua destilada y Agua residual.

Reactivos: Ácido nítrico (HNO_3) en una proporción de 1:1 e Hidróxido de Sodio (NaOH) al 99,99 %.

Instrumentos: Se utilizo el Potenciómetro THERMO CIENTIFIC; Modelo: ORION STAR A211 y balanza analítica METTLER TOLEDO; Modelo: AB 204, componente electrónico pasivo que actúa como un resistor variable.

Equipos: Estufa: VWR, Modelo: 1.300U-2; agitador: Thermo, Modelo: STAR A211 y Espectrofotómetro Infrarrojo (FTIR), instrumento utilizado para generar luz infrarroja que atraviesa o interactúa con la muestra.

VARIABLES ANALIZADAS

Variable independiente: Biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*).

Variable dependiente: Capacidad de biosorción de metales pesados totales de agua residual (Tabla 2).

Objetivo específico 1: “Evaluar el nivel de concentración inicial de metales pesados totales de agua residual ANTES de la biosorción con biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*)”.

Objetivo específico 2: “Evaluar el nivel de concentración final de metales pesados totales de agua residual DESPUÉS de la biosorción con biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*)”.

El presente estudio, corresponde al diseño experimental de post-test y control. El diseño Posprueba únicamente, se representa a través del siguiente esquema:

Donde:

Gc ----- () ----- O1

Ge ----- (X) ----- O1

O: Prueba. **(X):** Experimento. **Gc:** Grupo de control y **Ge:** Grupo experimental.

Hipótesis Alterna: $H_i: \mu_d > 0$: El Warraqqo (*Echinopsis maximiliana*) es eficiente y tiene un rendimiento alto en la biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina la Rinconada.

Se aplicó las siguientes ecuaciones:

$$S_d = \sqrt{\frac{(d_i - \bar{d})^2}{n-1}} = \text{Desviación Estandar muestral (1)}$$

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d / \sqrt{n}} = \text{Estadístico de Prueba (2)}$$

Donde:

gl = (n-1) = Grados de Libertad. **t(1-α)(n-1)** = Valor crítico. **p – Valor** = Probabilidad. asociado. **A** = 5% de margen de error. **đ** = Promedio diferencial y **n** = Cantidad a observar de metales.

Prueba Estadística

Para llevar a cabo la prueba estadística, se aplicó el procedimiento de prueba de hipótesis para dos parámetros, específicamente, la prueba “t” de Student para muestras relacionadas. Esto se conoce como la Prueba “t” de prueba.

Hipótesis nula: $H_0: \mu_d \leq 0$: El Warraqqo (*Echinopsis maximiliana*) no es eficiente para la biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina la Rinconada.

Tabla 2

Resultados de determinación de metales pesados totales

Metales totales	Agua residual de la mina la Rinconada Resultados de análisis (mg/L)	LMP (mg/L)		ECA (mg/L)
		D.S. No 010 – 2010 – MINAM	D.S. No 004–2017– MINAM	
Aluminio (Al)	19,1	—	—	0,9
Boro (B)	14,63	—	—	1,0
Hierro (Fe)	11,6	2,0	—	0,3
Manganoso (Mn)	6,7095	—	—	0,2
Zinc (Zn)	2,04	1,5	—	0,12
Estroncio (Sr)	1,479	—	—	—
Níquel (Ni)	0,5525	—	—	0,02
Litio (Li)	0,3423	—	—	2,5
Cobalto (Co)	0,2133	—	—	0,05
Arsénico (As)	0,179	0,1	—	0,01
Bario (Ba)	0,1569	—	—	0,7
Fósforo (P)	0,1151	—	—	—
Plomo (Pb)	0,0822	0,2	—	0,01
Cobre (Cu)	0,0216	0,5	—	0,1
Cromo (Cr)	0,0157	0,1	—	0,05
Mercurio (Hg)	0,0087	0,002	—	0,001
Titanio (Ti)	0,0083	—	—	—
Vanadio (V)	0,0075	—	—	0,1
Berilio (Be)	0,0059	—	—	0,012
Antimonio (Sb)	0,0057	—	—	0,02
Plata (Ag)	0,0056	—	—	0,01

Fuente: Informe de ensayo LAS 01 – AG – AC – 22 – 00457.

Resultados y Discusión

Concentración Inicial de Metales Pesados Totales

Análisis de agua residual

Se obtuvo los resultados de análisis de determinación de metales totales y elementos de trazas en agua residual por el método de alto rendimiento de Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP – OES), en Laboratorios Analíticos del Sur, de la ciudad de Arequipa, acreditado por Instituto Nacional de Calidad (INACAL), (Tabla 2).

A partir de los resultados obtenidos, la concentración de metales totales encontrados en agua residual de la laguna de Lunar de Oro de la mina la Rinconada es mayor a los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por el D.S. N° 010 – 2010 – MINAN y el D.S. N° 004 – 2017 – MINAN. A la vez, estos resultados guardan relación con lo que sostiene (Basterrechea, *et al.*, 2003) y por lo mismo, (Calderon, 1997), quienes consideran a los metales pesados como los más peligrosos y a la vez no son biodegradables tales como Cd, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn. Los metales pesados encontrados en agua residual de la mina la Rinconada, se considera como metales altamente tóxicos, así como señala (Alloway, 2013) metales o metaloides con potencial de causar problemas de toxicidad; evaluando éstos aspectos (Wood, 1974) clasificó los metales pesados en tres categorías: No críticos, tóxicos pero muy insolubles y muy tóxicos relativamente disponibles; en efecto, dentro de las categorías consideradas; según la tabla 2 se han encontrado dichos metales pesados en el análisis de la muestra de agua residual de la laguna de Lunar de Oro.

Los metales encontrados en agua residual de la Laguna de Lunar de Oro de la mina la Rinconada, es producto del vertimiento directo de agua residual al cuerpo natural de agua y a las escorrentías, sin antes haber sido tratadas, estos resultados también guarda relación con lo que sostiene el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2015) son considerada como aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad

requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas aun cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado.

En los estudios realizados por (Fernández, 2019) en el naciente río Binacional Puyango –Tumbes (Perú – Ecuador; determinó la cantidad de mg/L de los metales pesados, siendo < 0,0001 mg/L de Mercurio (Hg), 0,029 mg/L de Plomo (Pb) y 0,012mg/L de Arsénico (As) y la cantidad de Cianuro (CN⁻), siendo de 0,561 mg/L en el Rio Puyango Tumbes; en cambio, en agua residual de la laguna de Lunar de Oro, se encontró 0,0087 mg/L de Hg, 0,082 mg/L de Pb y 0,179 mg/L de As; estas diferencias se deben, que en un rio natural con el caso del rio Binacional Puyango – Tumbes, no existe presencia de actividades antropogénica; sin embargo, en la mina la rinconada existe la acción humana, principalmente la actividad minera, donde las aguas residuales y lixiviados llegan por arrastre a los manantiales o aguas de los ríos.

Asimismo, (Flores, 2016) encontró metales pesados en aguas del río Grande de Cajamarca, tales como Aluminio con 1,048 mg/L , seguido por el Hierro con 0,780 mg/L, Manganeso con 0,253 mg/L y zinc con 0,086 mg/L; además (Vega, 2012) en su trabajo de investigación encontró metales pesados en el río Toro de Huamachuco tales como Pb, Cu, Hg, As y Fe; estos resultados difieren, con los resultados que se obtuvo en el presente trabajo de estudio en la tabla 2, según el reporte del informe de análisis de Laboratorios Analíticos del Sur, estos resultados encontrados en aguas de la laguna de lunar de oro, se deben a la actividad informal de la minería y no existe control alguna al respecto de segregación de Residuos Sólidos.

En el año 2010, en el diario el Peruano “Normas legales” se publicó el Decreto Supremo (D.S. No 010-MINAM, 2010), para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero Metalúrgicas, dicho decreto obliga que no debe ser excedidos en ningún momento por encima de los Límites Máximos Permisibles (LMP) los siguientes metales: Hierro (Fe) 2,0 mg/L, Zinc (Zn) 1,5 mg/L, Plomo (Pb) 0,2 mg/L, Arsénico (As) 0,1 mg/L, Cobre (Cu) 0,5 mg/L, Cromo (Cr) 0,1 mg/L y Mercurio (Hg) 0,002 mg/L; comparando los resultados según tabla 2, agua residual de la mina la Rinconada presenta alto contenido de metales pesados, se

encuentran en rango mayor a Límites Máximos Permisibles establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente, esto implica, incumplimiento e infracción a la normativa vigente.

Del mismo modo, en la tabla 2, se observa una comparación de los resultados de análisis de agua residual con el Estándar de Calidad Ambiental para Aguas (ECA), publicado en el Decreto Supremo (D.S. No 004-2017-MINAM, 2017) la concentración de metales pesados de agua residual de la laguna de Lunar de Oro, se encuentra por encima de Estándar de Calidad Ambiental para Aguas; por lo tanto, las actividades mineras de las cooperativas mineras del centro poblado de la mina la Rinconada, infringen el cumplimiento de las normativas establecidas por el estado Peruano en materia Ambiental.

Concentración Final de Metales Pesados Totales

Los resultados de biosorción y porcentaje de remoción de metales pesados totales, se desarrolló de acuerdo al reporte del informe de ensayo de Laboratorios Analíticos del Sur LAS 01 – AG – AC – 22 – 00459, asimismo, para el presente estudio se consideró como parámetros óptimos de operación los siguientes valores:

- Muestra del volumen agua de la mina: 150 mL
- Agitación de biosorción: 150 rpm
- Temperatura de agitación (Ambiente): 14,4 °C
- Cantidad de biosorbente: 0,3 gramos

Tabla 3
Resultados de biosorción según los parámetros de diseño

Metales totales	Ci (mg/L)	LMP	ECA	pH: 10 y t: 30 min	pH: 12,10 y t: 60 min
		D.S. No 010 – 2010 – MINAM	D.S. 004– 2017-MINAM	Cf (mg/L)	Cf (mg/L)
Aluminio (Al)	19,1	—	0,9	2,97	2,68
Hierro (Fe)	11,6	2,0	0,3	0,378	0,057
Manganoso (Mn)	6,7095	—	0,2	0,4632	0,1683
Zinc (Zn)	2,04	1,5	0,12	0,039	0,0031
Estroncio (Sr)	1,479	—	—	1,411	1,410
Níquel (Ni)	0,5525	—	0,02	0,2033	0,0305
Cobalto (Co)	0,2133	—	0,05	0,0303	0,0133
Arsénico (As)	0,179	0,1	0,01	0,0601	0,0300
Bario (Ba)	0,1569	—	0,7	0,1265	0,1489
Plomo (Pb)	0,0822	0,2	0,01	0,0026	0,0026
Cobre (Cu)	0,0216	0,5	0,1	0,0045	0,002
Cromo (Cr)	0,0157	0,1	0,05	0,0036	0,0007
Mercurio (Hg)	0,0087	0,002	0,001	0,0004	0,0004
Titanio (Ti)	0,0083	—	—	0,0006	0,0006
Berilio (Be)	0,0059	—	0,012	0,00007	0,00007
Plata (Ag)	0,0056	—	0,01	0,0077	0,0053

Fuente: Informe de ensayo LAS 01 – AG – AC – 22 – 00459.

Los resultados del análisis se comparan con la normativa ambiental de Estándar de Calidad de Agua (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP), (Tabla 3).

Los resultados de biosorción de tres determinaciones, según los parámetros del diseño de estudio; la biosorción de metales pesados en

un pH de 10 y tiempo de 30 min, es menor al respecto de un pH 12,10 en un tiempo de 60 min. Asimismo, se observa también que a medida va aumentando el pH durante la remoción, va reduciendo la concentración de metales pesados, debido a que, los parámetro de pH y tiempo, es fundamental en el tratamiento de aguas residuales de la mina con el uso de biomasa de Waraqqo

(*Echinopsis maximiliana*), por lo tanto, la capacidad de biosorción depende de los parámetros del diseño de pH y tiempo, es decir, a mayor pH y a mayor tiempo, es mayor la capacidad de biosorción de

metales pesados, así como señala Reyes *et al.* (2006) la capacidad de adsorción depende de las variables operativas y el proceso depende en gran medida del pH. Estos resultados, se observa en la tabla 4.

Tabla 4

Resultados de biosorción de metales pesados según parámetros óptimos

Metales totales	C_i (mg/L)	VARIABLE INDEPENDIENTE	VARIABLE DEPENDIENTE	
		Biomasa de Waraqqo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	Biosorción de metales pesados	% Remoción
Aluminio (Al)	19,1	2,68	8210	85,97
Hierro (Fe)	11,6	0,057	5771,5	99,51
Manganoso (Mn)	6,7095	0,1683	3270,6	97,49
Zinc (Zn)	2,04	0,0031	1018,45	99,85
Estroncio (Sr)	1,479	1,41	34,5	4,67
Níquel (Ni)	0,5525	0,0305	261	94,48
Cobalto (Co)	0,2133	0,0133	100	93,76
Arsénico (As)	0,179	0,0300	74,5	83,24
Bario (Ba)	0,1569	0,1489	4,0	5,10
Plomo (Pb)	0,0822	0,0026	39,8	96,84
Cobre (Cu)	0,0216	0,002	9,8	90,74
Cromo (Cr)	0,0157	0,0007	7,5	95,54
Mercurio (Hg)	0,0087	0,0004	4,15	95,40
Berilio (Be)	0,0059	0,0001	2,915	98,81
Plata (Ag)	0,0056	0,0053	0,15	5,36
Titánio (Ti)	0,0083	0,0006	3,85	92,77

Fuente: Informe de ensayo LAS 01 – AG – AC – 22 – 00459.

Los resultados en el presente estudio guardan relación con los resultados que obtuvo (Del Carpio, 2017) en soluciones acuosas de Pb (II) y Cd (II) fueron puestas en contacto con el biosorbente bacteriano (biomasa de la cepa RHC-06), pero en lo que no concuerda el estudio se llevó a cabo con una solución simulada; por otra parte, (Gonzales y Moreno, 2016) realizó un estudio sobre plomo (Pb) y zinc (Zn) con la cáscara de plátano (*Musa sapientum*) en aguas residuales de un laboratorio de análisis químico con concentraciones iniciales de Pb y Zn ,se redujeron con éxito de 1,659 y 12,80 mg/L respectivamente a 0,337 y 4,303 mg/L.

Por otra parte, (Fernández, 2019) realizó un estudio de metales pesados y obtuvo como resultado Mercurio (Hg) de 0,0001 mg/L, Plomo (Pb) de 0,029 mg/L, Arsénico (As) de 0,012 mg/L, Cianuro (CN) de 0,561 m/L en el río Puyango Tumbes, asimismo, (Vega, 2012) realizó un estudio

del nivel de contaminación con metales pesados (Pb, Cu, Hg, As, Fe), sin embargo, ninguno de los autores han realizado tratamiento alguno para remover los metales pesados encontrados y a la vez, los resultados no han sido certificados por ningún laboratorio acreditado.

Según los resultados que se obtuvo, la biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*) se considera como un biosorbente eficiente en la biosorción de metales pesados, asimismo, los hallazgos en el presente estudio tienen relación con (Sanga, 2007) quien utilizó pectina como material biodegradable en la remoción de metales pesados y logró remover el Cu, Ni, Zinc, Cd y Pb, por otra parte (Campos y Rios, 2021) obtuvo la mayor eficiencia de remoción de plomo (II) con la especie *Opuntia ficus indica* (L.) Miller “nopal” con un 69,28% de remoción con muestras de agua de la cuenca alta del río Moche – Trujillo.

Además, los grupos funcionales como grupo hidroxilo, cetona, éster, ácido carboxílico y sulfato en la biomasa Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*) contienen electrones libres, es decir, existe una alta afinidad entre los grupos funcionales de la biomasa y los contaminantes con metales, lo que demuestra que los resultados son consistentes con los valores correspondientes obtenidos por (Cañizares, 2000) sostiene que la remoción de metales pesados de medios líquidos mediante el uso de sistemas biológicos es un proceso eficiente y económicamente viable.

Según la caracterización química del biopolímero natural de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*) presenta grupos funcionales de carboxilos, hidroxilos, sulfatos y aminas, estos resultados tienen concordancia con los restudios realizados por (He y Chen, 2014) los biosorbentes contienen grupos amina, hidroxilo, carboxilo, fosfato y sulfatos” y además después del proceso de activación Acida y Básica generan electrones libres para la protonación con metales pesados y por ser una biomasa de carácter Gel también generan espacios vacíos para encapsular los metales.

Observando los resultado de la tabla 4, se infiere, que la biosorción de metales pesados a partir de una concentración alta a baja, se debe a la unión de los metales con biomasa, tal como sostiene (Del Carpio, 2017) el mecanismos se da entre el intercambio iónico, adsorción, complejación, microprecipitación y cristalización en paredes

celulares, principalmente físicos (fuerzas de London y/o Van Der Waals) o químicos (Enlace iónico o covalente) entre adsorbente y adsorbato; por consiguiente, los resultados de este estudio de investigación demuestran que el empleo de biomasa de Waraqqo (*Echinopsis Maximiliana*) en el tratamiento de aguas residuales de la mina resulta ser un método eficiente y efectivo para la remoción de metales pesados, además estos resultados se corrobora con (Areco, 2011) que ciertos tipos de biomasa viva o muerta para la remoción requiere de pocos minutos de tratamiento.

Asimismo, el uso de biomasa natural a partir de celulosa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*) produce ligandos libres cuando es activada por hidrólisis ácida, mientras que la activación alcalina produce porosidad con alta capacidad para encapsular metales pesados.

Resultados Estadísticos

Para los resultados estadísticos se aplicó la prueba “t” de Student, planteado por William Sealy Gosset, es una prueba estadística paramétrica con la finalidad de comparar los promedios en dos grupos de muestras relativamente pequeñas y que cumplen con los supuestos de normalidad y homocedasticidad para dos muestras relacionadas, es decir, cuando una variable dependiente es medida en la misma muestra; para tal efecto, la diferencia “d” (Tabla 5).

Tabla 5

Datos de análisis estadístico por diferencias

Metales totales	Antes del tratamiento: Ci (mg/L)	Después del tratamiento: Cf (mg/L)	Diferencia: d
Aluminio (Al)	19,1	2,68	16,42
Hierro (Fe)	11,6	0,057	11,543
Manganese (Mn)	6,7095	0,1683	6,5412
Zinc (Zn)	2,04	0,0031	2,0369
Níquel (Ni)	0,5525	0,0305	0,522
Cobalto (Co)	0,2133	0,0133	0,2
Arsénico (As)	0,179	0,03	0,149
Plomo (Pb)	0,0822	0,0026	0,0796
Cobre (Cu)	0,0216	0,002	0,0196
Cromo (Cr)	0,0157	0,0007	0,015
Mercurio (Hg)	0,0087	0,0004	0,0083
Berilio (Be)	0,0059	0,00007	0,00583
Titanio (Ti)	0,0083	0,0006	0,0077
Magnesio (Mg)	38,19	0,1436	38,0464

Contrastación de Hipótesis

Para la contrastación de la hipótesis se planteó la hipótesis unilateral con cola a la derecha en función a las diferencias.

Hipótesis nula: $H_0: \mu_d \leq 0$: El Warraqo (*Echinopsis maximiliana*) no es eficiente para la biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina la Rinconada.

Hipótesis Alterna: $H_1: \mu_d > 0$: La Biomasa de Warraqo (*Echinopsis maximiliana*) es eficiente y tiene un rendimiento alto en la biosorción de metales pesados totales de agua residual de la laguna Lunar de Oro del centro poblado de la mina la Rinconada.

Aplicando las ecuaciones (1) y (2) se tiene los siguientes datos:

Donde:

$$g_1 = (n-1) = 13. t(1-\alpha) (n-1) = 1,771. p - \text{Valor} = 0,040. \alpha = 0,05. \bar{d} = 5,400 . n = 14$$

$$S_d = 10,704 \quad t = 1,887$$

Según los datos, se tiene la siguiente figura:

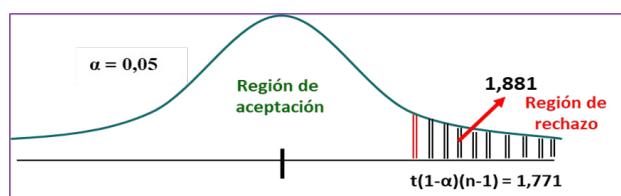


Figura 5. Estadística de prueba.

Para la contrastación de estadística de prueba de hipótesis se planteó la hipótesis unilateral con cola a la derecha, con el siguiente escenario en función a las diferencias:

Hipótesis nula: $H_0: \mu_d \leq 0$

Hipótesis Alterna: $H_1: \mu_d > 0$:

Regla de decisión: Según la prueba de hipótesis, no se acepta la Hipótesis nula (H_0). La diferencia promedio de biosorción de metales pesados con

biomasa de Warraqo (*Echinopsis maximiliana*) es mayor a cero, es decir, la concentración inicial de los 14 metales es mayor a la concentración final, luego de haber aplicado la biomasa de Warraqo (*Echinopsis maximiliana*) en la biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina la Rinconada.

Conclusiones

El uso de biomasa de Warraqo (*Echinopsis maximiliana*) es eficiente en un 95% en la biosorción de metales pesados totales en agua residual efluente de la mina la Rinconada, el estudio se desarrolló por exposición del material de biomasa de 0,3 gramos en un volumen de 150 mL de agua residual; el rendimiento es alto, debido a que los grupos funcionales como el grupo hidroxilo, la cetona, el éster, el ácido carboxílico y los sulfatos en la biomasa contienen electrones libres, lo que significa que, existe una gran afinidad entre los grupos funcionales de la biomasa y las aguas residuales de la mina con metales pesados presentes.

El agua residual, efluentes de las actividades de la mina la rinconada, antes del tratamiento tiene un alto contenido de metales pesados como elementos de traza tales como Al (19,1 mg/L), Fe (11,6 mg/L), Mn (6,7095 mg/L), Zn (2,04 mg/L), Ni (0,5525 mg/L), Co (0,2133 mg/L), As (0,179 mg/L), Cr (0,0157mg/L), Pb (0,0822 mg/L) y Hg (0,0087 mg/L); los cuales, se encuentran en un rango mayor de los Límites Máximos Permisibles de Estándar de Calidad Ambiental (ECA). Asimismo, los metales pesados de Fe, Zn, As y Hg, se encuentran en un rango mayor de los Límites Máximos Permisibles (LMP) para descargar aguas residuales líquidas de operaciones mineras y metalúrgicas.

El agua tratada de efluentes de las actividades de la mina la rinconada, después de la biosorción tiene menor concentración de metales pesados de elementos de traza, y fueron removidos los metales como Al un 85,97% (19,1 a 2,68 mg/L), Fe un 99,51% (11,6 a 0,06 mg/L), Mn un 97,49 % (6,7095 a 0,17 mg/L), Zn un 99,85% (2,04 a 0,0031 mg/L), Ni un 94,48 % (0,5525 a 0,0305 mg/L), Co un 93,76 % (0,2133 a 0,0133 mg/L), As un 83,24% (0,179 a 0,03 mg/L), Pb un 96,84% (0,0822 a 0,0026 mg/L), Cu un 90,74% (0,0216 a 0,0020 mg/L), Cr un 95,54%

(0,0157 a 0,0007 mg/L), Hg un 95,40% (0,0087 a 0,0004 mg/L), Be un 98,81 % (0,0059 a 0,00007 mg/L) y Ti un 92,77 % (0,0083 a 0,0006 mg/L).

Referencias

- Alloway, B. (2013). *Heavy metals in soils, trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3ra ed.). Londres: Springer. Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Alonso, J. (2008). *Los metales pesados en las aguas residuales*. Retrieved from <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>
- Areco, M. M. (2011). *Métodos alternativos para el tratamiento de la contaminación ambiental por metales pesados*. Tesis Doctoral: Universidad de Buenos Aires. Retrieved from http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n4811_Areco
- Baird, C., & Cann, M. (2014). *Química Ambiental* (5ta ed.). Barcelona. Bogotá. Buenos Aires. Caracas. México: REVERTÉ. doi:9788429179156
- Basterrechea, C., Pérez, A., Gonzales, M., Rodriguez, F., & Alfayate, J. (2003). *Contaminación Ambiental*. España: Thopson Editores Spain.
- Branco, F., Gomez, J., & Fernandez, P. (1984). *Bioquímica de soluciones acuosas contaminadas con metales pesados*. Madrid, España.
- Calderon, C. (1997). *Serie Autodidacta en Materia de Normas Técnicas Relacionadas con la Inspección y Verificación*. Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Campos, E., & Rios, C. (2021). *Eficiencia de Opuntia ficus-indica (L.) Miller y Echinopsis pachanoi en la remoción de plomo (II) de la cuenca alta del río Moche-Trujillo 2019-2020*. Universidad Privada del Norte, Trujillo–Perú. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11537/29347>
- Cañizares, V. R. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericano de Microbiología*, 42, 131-143. Retrieved from <https://www.medicgraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2000/mi003f.pdf>
- Carreño, A., Antonio, E., & Lucas, L. (2018). Sistema de tratamiento de aguas Superficiales para consumo Humano en la Microcuenca del río Carrizal, Ecuador. *Revista Ciencia Unemi*, 11(28), 76-87. Retrieved from <https://www.redalyc.org/journal/5826/582661251007/>
- D.S. No 004-2017-MINAM. (2017, Junio 07). *Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua*. Retrieved from Normas Legales el Peruano.
- D.S. No 010-MINAM. (2010, Agosto 21). *Límites Máximos Permisibles Para la descarga de efluentes Líquidos de actividades Minero-Metalurgicas*. Retrieved from Normas Legales el Peruano.
- Del Carpio, C. (2017). *Estudio de la bioadsorción de Pb(II) y Cd(II) usando como biomasa a Escherichia coli aislada de las aguas contaminadas del Río Huatanay de la Ciudad del Cusco*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa., Arequipa–Perú. Retrieved from <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5361>
- Duffus, H. (2002). “HEAVY METALS”—A MEANINGLESS TERM? (IUPAC Technical Report). 74(5), 793-807. Retrieved from <https://publications.iupac.org/pac/2002/pdf/7405x0793.pdf>
- Fergusson, J. (1990). *Los elementos pesados: Química, impacto ambiental y efectos sobre la salud* (1ra ed.). Inglaterra: Pergamon Press.
- Fernandez, F. (2004). Energias Renovables para todos. *Energías Renovables*, 135.
- Fernández, J. (2019). *Nivel de contaminación por metales pesados: Hg, Pb, As y Cianuro (CN-), en el naciente río Binacional Puyango –Tumbes (Perú – Ecuador)*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.14414/13007>

- Flores, H. (2016). *Evaluación de la concentración de metales pesados en las aguas del río grande y su relación con la actividad minera. Tesis Maestría en Ciencias*. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1299>
- Fomina, M., & Gadd, G. (2014). Biosorción: Perspectivas actuales sobre el concepto, definición y aplicación. *Tecnología Bioambiental*, 160, 3-14. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>
- Garbosa, G. (1996). *Mecanismos de la anemia de la insuficiencia renal crónica: Toxicidad de Aluminio. Tesis Doctoral*. Universidad de Buenos Aires, Argentina. Retrieved from http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n2862_Garbosa
- García, V., Yipmantin, A., Guzmán, E., Pumachagua, R., & Maldonado, H. (2011). Estudio de la cinética de biosorción de iones plomo en pectina reticulada proveniente de cáscaras de cítricos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(3).
- Gonzales, A., & Moreno, J. (2016). *Influencia de la velocidad de agitación y la temperatura sobre la adsorción de plomo (Pb) y zinc (Zn) con cáscara de plátano (Musa Sapientum), en las aguas residuales de laboratorios de análisis químico. Tesis de Investigación*. Universidad NACIONAL de Trujillo, Trujillo, Perú. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.14414/8756>
- He, J., & Chen, J. (2014). Una revisión exhaustiva sobre la biosorción de metales pesados por biomasa de algas: Materiales, rendimiento, química y herramientas de simulación de modelos. *Bioresource technology*, 160, 67-78. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.068>
- Mori, C., Maldonado, G., Guzman, L., Eyras, C., Bernardille, V., & Donati, E. (2013). Estudio Cinético e Isotérmico de la biosorción de Zin (II) y cadmio (II) para un sistema monometálico por un dariapinnatifida. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 16(2). Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/104176>
- Obelholser, K., & Garrity, J. (1992). Interaction of metals and protons with algae III: Marine algae, Whit emphasis on lead and aluminium. *Revista Environ. Sci. Technol.*, 26(3), 496-502. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es00027a007>
- OEFA. (2015). *Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales*. OEFA.
- OEFA. (2015). *Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales*. San Isidro-Lima-Perú.
- OS.90. (2006, Mayo Martes 23). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. *Normas Legales el Peruano*, pp. 84-104.
- R.J. No 010-2016-ANA. (2016, Enero 11). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. Retrieved from Normas Legales el Peruano.
- Rayson, G., & Williams, P. (2011). Comparative Metal Ion Binding to Native and Chemically Modified Datura Innoxia Immobilized Biomaterials. *Biomater Phys. Chem.*, 141-158. doi:10.5772/24925
- Reyes, E., Cerino, f., & Suárez, M. (2006). Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. *Universidad Autónoma de Nuevo Leon*, 9(31), 59-64. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/10323>
- Sanga, W. (2007). *Remoción de metales pesados utilizando la pectina como material biodegradable. Tesis de Maestría*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/584>
- Valladares, M., Valerio, C., De la Cruz, P., & Melgoza, R. (2017). Adsorbentes no-concencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista*

- Ingenierías Universidad de Medellín, 16(31), 55-73. doi: 10.22395/RIUM.V16N31A3
- Vega, J. (2012). *Nivel de contaminación por metales pesados (pb, cu, hg, as y fe) en el río el toro, distrito de huamachuco de la provincia de sánchez carrión durante año 2009–2010. Tesis de Maestría.* Universidad Nacional de Trujillo., Trujillo, Perú. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.14414/5812>
- Won, S., Kotte, P., Wei, W., Lim, A., & Yun, Y. (2014). Biosorbents for recovery of precious metals. *Bioresour Technol*, 160, 203-212. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.121>
- Wood, J. (1974). Ciclos biológicos de los elementos tóxicos en el medio ambiente. *Science*, 183(4129), 1049-1052. Retrieved from <https://www.science.org/doi/10.1126/science.183.4129.1049>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>