**Biosorción de metales pesados** **provenientes de agua residual de minas de la Rinconada con biomasa de Waraqqo (Echinopsis maximiliana)**

Mamani Ccallo Soledad1 ,Quinto Manottupa Yaneli Yovisa2

[soledad.mamani.c@upeu.edu.pe](mailto:soledad.mamani.c@upeu.edu.pe) [yaneli.quinto@upeu.edu.pe](mailto:yaneli.quinto@upeu.edu.pe)

*E.P. de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión Juliaca-Perú.*

**Resumen**

La contaminación de aguas residuales mineras por metales pesados representa una de las principales problemáticas ambientales en zonas de alta actividad extractiva como La Rinconada (Puno, Perú), afectando de forma crítica la calidad del agua y la salud pública. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la biomasa de Waraqqo (Echinopsis maximiliana) como bioadsorbente para la remoción de metales pesados (Hg, Pb, Zn y Cr) presentes en aguas residuales mineras. Se recolectó biomasa de Waraqqo en la provincia de Espinar (Cusco), la cual fue secada, molida y utilizada como material bioadsorbente, a tres niveles de pH (10, 11 y 12), con tiempos de contacto de 15 minutos. Las muestras de agua fueron tomadas en un efluente minero del distrito de Ananea. Se midieron las concentraciones iniciales y finales de los metales mediante análisis en laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano. Los resultados indican que la remoción de plomo fue del 100% a pH 10, mientras que el mercurio mostró una eficiencia máxima del 23% a pH 10. El zinc tuvo remociones entre 40 y 50%, y el cromo alcanzó una remoción del 100% a pH 10. La biomasa de Waraqqo demostró ser una alternativa bioadsorbente eficiente y ecoamigable, especialmente para Pb en condiciones alcalinas. Si bien se lograron reducciones significativas, en algunos casos no se alcanzaron los Límites Máximos Permisibles (LMP), por lo que se recomienda su uso dentro de sistemas de tratamiento complementarios. Esta investigación aporta evidencia sobre el potencial del uso de recursos vegetales autóctonos en tecnologías de remediación ambiental.

**Palabras clave:** *Bioadsorción, metales pesados,* Waraqqo*, aguas residuales mineras.*

### **Abstract**

The contamination of mining effluents with heavy metals represents one of the main environmental problems in areas of intense extractive activity such as La Rinconada (Puno, Peru), critically affecting water quality and public health. This study aimed to evaluate the efficiency of Waraqqo (Echinopsis maximiliana) biomass as a bioadsorbent for the removal of heavy metals (Hg, Pb, Zn, and Cr) present in mining wastewater. Waraqqo biomass was collected in the province of Espinar (Cusco), then dried, ground, and used as a bioadsorbent material at three pH levels (10, 11, and 12) with contact times of 15 minutes. Water samples were obtained from a mining discharge in the Ananea district. Initial and final metal concentrations were measured by laboratory analysis at the National University of the Altiplano. Results indicate that lead removal reached 100% at pH 10, while mercury achieved a maximum efficiency of 23% at pH 10. Zinc removals ranged between 40% and 50%, and chromium reached 100% removal at pH 10. Waraqqo biomass proved to be an efficient and ecofriendly bioadsorbent, especially for Pb under alkaline conditions. Although significant reductions were achieved, in some cases the values did not meet the Maximum Permissible Limits (MPL), so its use is recommended within complementary treatment systems. This research provides evidence of the potential for using endemic plant resources in environmental remediation technologies.

**Keywords:** *Biosorption, heavy metals,* Waraqqo*, mining wastewater.*

1. **Introducción**

Las actividades mineras pueden provocar importantes afecciones sobre el medio ambiente, al poder constituir fuentes potenciales de contaminación. (Pacheco, 2014). Para Obiri et al. (2016) el sector minería acarrea una serie de repercusiones ambientales y socioeconómicos negativos en las sociedades de acogida asociados con la extracción metalúrgica que ensombrecen los beneficios económicos obtenidos. (MINEM, 2018).

Se considera que los metales pesados son en particular contaminantes peligrosos. Su presencia en el agua residual de varios procesos, como galvanizado, purificación de metales, trabajo metalúrgico, residuos químicos de confección, minería, manufactura de baterías entre otros, han causado preocupaciones medioambientales debido a su alta toxicidad a concentraciones bajas. (Singh, et.al., 2021)

En la zona de Ananea se desarrolla una intensa actividad minera. Esto ha provocado un aumento de los niveles de metales pesados al ciclo hidrológico del río Ananea. Boletín 5-E (INGEMMET 2008; Zavala 2005).

“El mercurio es un contaminante mundial, que viene ocasionando efectos irreversibles sobre el medio ambiente (agua, suelo, aire) y la salud de las personas” (Weinberg, 2010).El uso indiscriminado e ineficiente del mercurio para amalgamar el oro, ocasiona que grandes cantidades de esta sustancia se pierda en forma de gas o liquida en el ambiente ocasionando contaminación al medio ambiente y los cuerpos de agua, etc. (Apaza, 2016). El Hg induce al estrés oxidativo, causando apoptosis en las células, lo cual es un factor de riesgo para el TEA. La exposición principal en el estudio fueron los alimentos, el agua y el polvo que contenían niveles contaminantes del metal. (Reuben et al., 2020)

El plomo (Pb) es un metal brillante, inodoro, gris azulado, ocurre naturalmente en el lecho rocoso. (Health Canada, 2013). El plomo es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. (APAZA, 2015) Puede causar varios efectos no deseados, como: perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, incremento de la presión sanguínea, daño a los riñones, abortos y abortos sutiles, perturbación del sistema nervioso, daño al cerebro, disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma, disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños, perturbación en el comportamiento de los niños, como es agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad. (Ramalho, 2003)

El zinc es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. Se encuentra en el aire, el suelo y el agua, y en todos los alimentos. La forma metálica fue utilizada para hacer latón y el óxido de zinc fue usado en la medicina. Los síntomas agudos por envenenamiento por zinc son inicialmente gastrointestinales (Burke & Krieger, 2001). Los síntomas incluyen nausea, vómitos, dolor abdominal, diarrea y hematemesis. (ALEGRE, 2022).

El cromo (Cr) es un metal que puede encontrarse principalmente en dos estados de oxidación en el ambiente: trivalente (Cr³⁺) y hexavalente (Cr⁶⁺). El Cr⁶⁺ es altamente tóxico, soluble en agua y considerado cancerígeno, mutagénico y teratogénico, mientras que el Cr³⁺ tiene una toxicidad significativamente menor y, en pequeñas cantidades, cumple funciones biológicas esenciales (Saha & Orvig, 2010). Las principales fuentes de contaminación con cromo incluyen actividades industriales como la galvanoplastía, el curtido de cuero, la manufactura de pigmentos y procesos mineros (Baral & Engelken, 2002). En medios acuáticos, el Cr⁶⁺ presenta alta movilidad y persistencia, lo que favorece su bioacumulación y entrada en las cadenas tróficas (WHO, 2011).

En el Diario oficial el peruano, publicado el Decreto Supremo (D.S. Nº 010-MINAM, 2010) menciona las 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. Estos límites son: zinc (Zn) con un valor máximo de 1,5 mg/L, mercurio (Hg) 0,002 mg/L, plomo (Pb) 0,2 mg/L, fierro (Fe) 2,0 mg/L, cromo (Cr) 0,1 mg/L, cobre (Cu) 0,5 mg/L y cadmio (Cd) 0,05 mg/L.

La bioadsorción es un método económico y efectivo para la descontaminación de metales pesados en el agua, que está basada en la adsorción de los iones del metal por biomasa muerta o viva puede ser activada y no activada, la bioadsorción es una tecnología que consiste en la utilización de residuos orgánicos como material adsorbente para la disminución de concentraciones de metales pesados en cuerpos de aguas. (Verdugo, 2017).

El objetivo de este estudio fue determinar la capacidad de adsorción de Waraqqo (Echinopsis maximiliana) para la remoción de Hg, Pb, Zn y Cr en agua residual de la mina La Rinconada, evaluando la eficiencia a distintos niveles de pH (10, 11 y 12) en condiciones de laboratorio.

1. **Materiales Y Métodos**
   1. **Ubicación**

La muestra fue tomada en un efluente minero del distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, Región Puno, con fecha 18 de mayo del presente año, cuyas coordenadas UTM son: Norte: 8383304.00 m; Sur: 451702.00 m.

**Figura 1.**

Ubicación del efluente minero La Rinconada



Fuente: Google Earth

* 1. **Obtención del Bioadsorbente**

El Waraqqo (Echinopsis maximiliana), se recolecto en la Provincia de Espinar, Distrito Coporaque, con las siguientes coordenadas 218796E 8371847N y a una altitud de 3998.6 m.s.n.m. (Ver Figura 3)

Se selecciono las muestras más representativas, y se procede a pelar con la finalidad de retirar las espinas del Waraqqo (Echinopsis maximiliana). (Ver Figura 4)

El secado se realizó en una estufa a 60 °C por 12 h, con la finalidad de eliminar la humedad de la muestra, al concluir el secado la muestra queda con una contextura delgada y se procede la molienda en un mortero. (Ver Figura 5)

* 1. **Proceso de pruebas de remoción de metales pesados**

Para los ensayos de bioadsorción, primero las muestras fueron filtradas a través de papel filtro (ver figura 7), después se vertió 150mL de muestra del efluente en vasos de precipitados de 500mL, donde se ajusto el pH a 10, 11 y 12 con una solución de HNO3 0,3 N y con una solución de NaOH 0,9 M. Se procedió a pesar 0.6 del bioadsorbente y seguido de ello colocar en cada uno de los vasos para después ser sometidos al agitador magnetico a 3.5 stirrer, a temperatura ambiente por un tiempo de 15 min, posteriormente se procede a filtrar, rotular y se lleva al análisis respectivo a Laboratorios de la Universidad Nacional del Altiplano.

* 1. **Cálculo de capacidad de adsorción**

La capacidad de adsorción se determinó aplicando la ecuación 1:

Donde:

Qe: capacidad de adsorción (mg/g)

Ci: concentración inicial (mg/L)

Cf: concentración final (mg/L)

V: volumen de solución (L) = 0.150 L

m: masa del adsorbente (g) = 0.6 g

Los porcentajes de adsorción en cada caso fueron estimados a partir de la siguiente ecuación 2:

1. **Resultados y Discusión**

**Tabla 1.**

*Características del pH del agua residual y del bioadsorbente*

|  |  |
| --- | --- |
| **Parámetro** | **Resultado** |
| pH bioadsorbente | 7 |
| pH agua residual | 13.4 |

El bioadsorbente que se empleó se obtuvo un pH neutro de 7, mientras que para el agua residual de la minería La Rinconada presento un pH de 13.4.

* 1. **Pruebas de remoción y porcentaje de iones de metales pesados**

Se ha obtenido los resultados de Bioadsorción y porcentaje remoción de metales, de acuerdo a los resultados del INFORME DE ANALISIS Nº 006-LA136**,** aplicando las ecuaciones 1 y 2 y considerando como parámetros óptimos de operación los siguientes valores:

* Volumen agua residual: 150 mL
* Agitación: 3.5 stirrer
* Temperatura Ambiente: (16,9 oC)
* Dosis de bioadsorbente: 0,6 g

**Tabla 2.**

*Resultados de la bioadsorción de metales pesados con Waraqqo (Echinopsis maximiliana)*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **N.º** | **Parámetro** | **Ci (mg/L)** | **pH** | **t(min)** | **Cf (mg/L)** | **Qt (mg/g)** | **%Adsorción** | **LMP (mg/L)** |
| 1 | Mercurio (Hg) | 13 | 10 | 15 | 10 | 0.75 | 23.08 | 0.002 |
| 2 | 13 | 11 | 15 | 12 | 0.25 | 7.69 |
| 3 | 13 | 12 | 15 | 13 | 0 | 0 |
| 4 | Plomo (Pb) | 3 | 10 | 15 | 0 | 0.75 | 100 | 0.2 |
| 5 | 3 | 11 | 15 | 3 | 0 | 0 |
| 6 | 3 | 12 | 15 | 3 | 0 | 0 |
| 7 | Zinc (Zn) | 10 | 10 | 15 | 5 | 1.25 | 50 | 1.5 |
| 8 | 10 | 11 | 15 | 5 | 1.25 | 50 |
| 9 | 10 | 12 | 15 | 6 | 1 | 40 |
| 10 | Cromo (Cr) | 5 | 10 | 15 | 0 | 1.25 | 100 | 0.1 |
| 11 | 5 | 11 | 15 | 3 | 0.5 | 40 |
| 12 | 5 | 12 | 15 | - | - | - |

1. Mercurio (Hg):

El mercurio presentó una remoción máxima del 23.08% a pH 10, con una disminución progresiva a pH 11 del 7.69% y pH 12 del 0%. La biosorción de Hg es más efectiva en condiciones ligeramente alcalinas, mientras que la eficiencia decrece significativamente en medios altamente básicos, mientras que su eficiencia decrece significativamente a pH más elevados. Esta disminución puede atribuirse a la desprotonación de los grupos funcionales activos (carboxilos, hidroxilos, entre otros) que participan en la unión con el metal, reduciendo así la afinidad de la superficie del bioadsorbente por los iones mercúricos (Singh et al., 2021; Verdugo, 2017). Se puede decir que el mercurio (Hg) es más fácilmente adsorbido en condiciones menos básicas.

2. Plomo (Pb):

La remoción de plomo fue total del 100% a pH 10, mientras que a pH 11 y 12 no se observó adsorción alguna. Este comportamiento sugiere una alta especificidad de la biomasa para Pb(II) en condiciones moderadamente alcalinas. La pérdida de eficiencia a pH más altos podría explicarse por la formación de complejos no adsorbibles o por competencia con otros iones presentes en la solución (Ramalho, 2003; Singh et al., 2021).

1. Zinc (Zn):

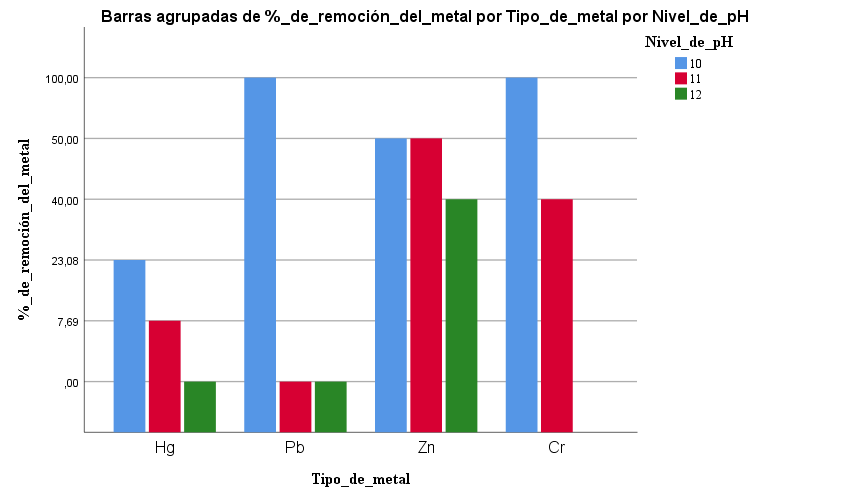
El zinc presentó una remoción constante del 50% a pH 10 y 11, descendiendo ligeramente al 40% a pH 12. Estos resultados indican una eficiencia intermedia de la biomasa para este metal, sin alcanzar remoción total en ningún caso, la remoción de Zn depende no solo del pH, sino también de factores como la competencia iónica y la concentración inicial (Burke & Krieger, 2001).

1. Cromo (Cr):

Pese a la ausencia del valor de concentración inicial en pH 12, los datos disponibles muestran una remoción completa del 100% a pH 10 y una reducción a 40% a pH 11. Esta tendencia está en concordancia con lo reportado por Verdugo (2017), quien indica que el Cr(VI) es más fácilmente adsorbido en medios levemente alcalinos, donde los grupos funcionales protonados de la biomasa favorecen las interacciones electrostáticas con los aniones de cromo. La disminución a pH 11 puede reflejar una reducción de dicha interacción por desprotonación, afectando la retención del metal.

**Figura 2.**

*Porcentaje de remoción de metales pesados a diferentes niveles de pH.*



Fuente: IBM SPPS Statistics 25

La eficiencia de remoción de metales pesados mediante la biomasa de Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*), depende significativamente del nivel de pH. Los resultados muestran que el **pH 10 es óptimo**, logrando una remoción completa de plomo y cromo, y la mayor eficacia para mercurio y zinc. Por el contrario, a pH 12, la remoción disminuye en todos los casos.

1. **Conclusiones**

El presente estudio evidenció que la biomasa de Waraqqo (Echinopsis maximiliana), procesada mediante un método de secado y molienda controlada, posee un potencial significativo como bioadsorbente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales provenientes de actividad minera en la zona de La Rinconada, Puno. Los resultados obtenidos en condiciones experimentales de laboratorio demuestran que la eficiencia de biosorción de la biomasa depende de manera crítica del pH del medio, lo cual afecta la disponibilidad de los sitios activos de adsorción y la especiación química de los metales en solución.

Entre los principales hallazgos destaca la remoción total del plomo (Pb) a pH 10, lo cual sugiere una afinidad específica del Waraqqo hacia este ion metálico bajo condiciones moderadamente alcalinas. Para el mercurio (Hg), la remoción fue moderada (23%) en pH 10, pero decayó completamente a pH 12, lo cual sugiere una interacción menos favorable entre el bioadsorbente y este elemento en condiciones alcalinas extremas.

Respecto al zinc (Zn), se logró una remoción intermedia de entre 40% y 50% en todos los niveles de pH ensayados, sin alcanzar nunca una eficiencia total. El comportamiento del cromo (Cr), aunque limitado por la ausencia de datos iniciales, mostró remoción completa a pH 10, indicando que el bioadsorbente es capaz de retener eficientemente cationes metálicos trivalentes en condiciones adecuadas.

En comparación con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por el Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM, los valores iniciales de concentración de metales superan ampliamente los límites legales, en particular para mercurio (0.002 mg/L) y plomo (0.2 mg/L). Aunque la biomasa logró reducir significativamente las concentraciones, en varios casos los valores post-tratamiento aún se encuentran por encima de los estándares permitidos, lo cual indica que, si bien el Waraqqo representa una alternativa eficiente, debe considerarse dentro de un esquema complementario o de tratamiento en múltiples etapas para asegurar el cumplimiento normativo.

Desde un enfoque ambiental, la implementación de esta tecnología basada en residuos vegetales autóctonos puede representar una solución sustentable, de bajo costo para comunidades afectadas por actividades extractivas. Además, su uso contribuiría a la valorización de recursos biológicos locales y a la mitigación de los impactos derivados de la minería informal en los ecosistemas altoandinos.

Finalmente, se recomienda realizar investigaciones complementarias que evalúen parámetros como el tiempo de contacto, la dosis óptima del bioadsorbente, la interferencia de otros iones presentes en matrices complejas, y la regeneración del material, a fin de escalar esta solución a sistemas reales de tratamiento y potenciar su aplicabilidad industrial.

**REFERENCIAS**

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.”* <https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/12183/Evaluacion_AlegreBustamante_Laura.pdf?sequence=1>

APAZA ASQUI DERLY WILLER. (2015). *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA*.

APAZA PORTO HERNÁN RÓMULO. (2016). *DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MERCURIO EN AGUA Y  SEDIMENTOS DEL RIO SUCHES-ZONA BAJO PARIA COJATA - PUNO.*

Baral, S. S., & Engelken, R. D. (2002). Chromium-based regulations and greening in metal finishing industries in the USA. Environmental Science & Policy, 5(2), 121–133. <https://doi.org/10.1016/S1462-9011(02)00025-5>

Canada, H. (2013). *Risk Management Strategy for Lead*. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/contaminants/prms_lead->

De, C., & Ambiental, I. (n.d.). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA*.

*Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM - Normas y documentos legales - Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano*. (n.d.). Retrieved May 19, 2025, from <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/317458-010-2010-minam>

Loaiza Choque, E., & Galloso Carrasco, A. (2008). *Implicancias ambientales por la actividad minera de la zona de Ananea en la cuenca del río Ramis - [Boletín E 5]*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/352/14/E-005-MAPA_10_MAPA_DE_MUESTREO_DE_SEDIMENTOS_POR_ARS%c3%89NICO.pdf>

MINEM. (2018). *Mineria Sostenible en el Perú. Contribución al Desarrollo Nacional.  Ministerio de Energías y Minas.* . <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5216957/DESCARGAR.pdf>

Obiri, S., Mattah, P. A. D., Mattah, M. M., Armah, F. A., Osae, S., Adu-Kumi, S., & Yeboah, P. O. (2016). Assessing the environmental and socio-economic impacts of artisanal gold mining on the livelihoods of communities in the Tarkwa Nsuaem municipality in Ghana. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *13*(2). <https://doi.org/10.3390/IJERPH13020160>,

Ramalho Rubens Sette. (2003). *Tratamiento de aguas residuales · Colección Abierta · Biblioteca Digital*. <https://biblioteca.ucuenca.edu.ec/digital/s/biblio-open/ark:/25654/4299#?c=&m=&s=&cv=>

Reuben, A., Frischtak, H., Berky, A., Ortiz, E. J., Morales, A. M., Hsu-Kim, H., Pendergast, L. L., & Pan, W. K. (2020). *Elevated Hair Mercury Levels Are Associated With Neurodevelopmental Deficits in Children Living Near Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Peru*. <https://doi.org/10.1029/2019GH000222>

Saha, B., & Orvig, C. (2010). Biosorption of hexavalent chromium by biomass and biochar: a review. Chemical Reviews, 110(7), 3760–3804. <https://doi.org/10.1021/cr900365f>

Singh, S., Kumar, V., Singh Dhanjal, D., Datta, S., Singh, S., & Singh, J. (2021). Biosorbents for heavy metal removal from industrial effluents. *Bioremediation for Environmental Sustainability: Approaches to Tackle Pollution for Cleaner and Greener Society*, 219–233. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820318-7.00010-1>

Verdugo, M. (2017). Tecnologías de remoción de metales pesados con biomasa. Revista Colombiana de Biotecnología, 19(2), 135–147.

Weinberg Jack. (n.d.). *Introducción a la Contaminación  por Mercurio  para las ONG*. Retrieved May 26, 2025, from <https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-es.pdf>

World Health Organization. (2011). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241548151>

Xavier Jumbo Pacheco, P., & Alejandro Nieto Monteros, D. (2014). *Tratamiento químico y biológico de efluentes mineros cianurados a escala laboratorio*.

**Anexos**

|  |  |
| --- | --- |
| Figura 3. Waraqqo (Echinopsis maximiliana). | Figura 4. Extraccion de las espinas del Waraqqo (Echinopsis maximiliana). |
| Figura 5. Secado del Waraqqo (Echinopsis maximiliana). | Figura 6. Biomasa del Waraqqo (Echinopsis maximiliana). |
| Figura 7. Filtración del agua residual | Figura 8. Ajuste del ph del agua residual |
| Figura 9. Medición y lectura del ph del agua residual | Figura 10. Agitacion magnetica a una “Stirrer de 3.5” |
| Figura 11. Filtracion las muestras para luego ser llevadas para su analisis a laboratorio. | |
| Figura 12. Resultados iniciales de metales pesados. | |