



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“TÉCNICAS DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE
METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES”

Trabajo de Investigación para optar el grado académico de:
Bachiller en Ingeniería Ambiental

Presentado por:

Cleyssi Lesliberth Chuquilin Medina (0000-0001-8374-7668)

Asesor:

Elvito Fabián Villegas Silva (0000 - 0001-9783-1641)

Lima – Perú

2020

RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°259-2020-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 26 de noviembre de 2020

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **Técnicas de tratamiento para la remoción de metales pesados en aguas residuales**, presentado por:

- **Cleysi Lesliberth Chuquilin Medina**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **Técnicas de tratamiento para la remoción de metales pesados en aguas residuales** con N° de registro de la carrera: **097-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Elvito Fabián Villegas Silva** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico de Carrera
Ingeniería Ambiental

Técnicas de tratamiento para la remoción de metales pesados en aguas residuales

Cleysi Lesliberth Chuquilin Medina¹ y Elvito Fabián Villegas Silva^{1*}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.

*Autor de correspondencia: elvito@lamolina.edu.pe

Resumen

La generación de efluentes industriales está convirtiéndose en uno de los problemas ambientales más relevantes, debido a su capacidad para contaminar a los cuerpos de agua naturales. El agua residual procedente de los procesos industriales contiene cargas tóxicas de diferentes contaminantes que pueden variar en concentración, entre los cuales se encuentra a los metales pesados. Las trazas de metales pesados requieren atravesar un proceso de remoción antes que el agua residual llegue a su disposición final. Existen diversos métodos capaces de remover estos contaminantes en aguas residuales entre los que se incluyen: métodos convencionales, basados en procesos físico- químicos y; métodos no convencionales, caracterizados por ser innovadores y usar sistemas biológicos. La presente revisión evalúa la aplicabilidad de diversas técnicas de tratamiento para la eliminación de metales pesados en aguas residuales provenientes de industrias; asimismo, señala las ventajas y limitaciones de cada una de las técnicas con el fin de reconocer su efectividad.

Palabras clave: Técnicas, remoción, metales pesados, contaminantes, aguas residuales, convencional, ventajas, eficiencia.

Abstract

The generation of industrial effluents is becoming one of the most relevant environmental problems, due to its capacity to pollute natural water bodies. Wastewater from industrial processes contains toxic loads of different pollutants that can vary in concentration, among which heavy metals are found. Traces of heavy metals require going through a removal process before the wastewater reaches its final disposal. There are various methods capable of removing these pollutants in wastewater, including: conventional methods, based on physicochemical processes and; unconventional methods, characterized by being innovative and using biological systems. This review evaluates the applicability of various treatment techniques for the removal of heavy metals in wastewater from industries; likewise, it points out the advantages and limitations of each of techniques in order to recognize their effectiveness.

Keywords: Techniques, removal, heavy metals, pollutants, wastewater, conventional, advantages, efficiency.

Revisión Teórica

Introducción

El desarrollo industrial ha provocado que se generen mayores descargas de aguas residuales con alto contenido de trazas metálicas como zinc, cadmio, níquel, mercurio, plomo cobre y cromo; que son de particular preocupación por su alta toxicidad (Fu & Wang, 2011). En el agua, la presencia de metales pesados es alarmante, debido a que deterioran la calidad de esta y causan daños tanto a la flora como a la fauna que vive y se alimenta en los sistemas acuáticos (Zevallos de la Torre, 2018).

Los metales pesados cuando ingresan al agua, se combinan a través de procesos biogeoquímicos con material particulado, materia coloidal y especies disueltas, que son estables en el medio (Vicente Martorell, 2010). La materia particulada y coloidal, por su capacidad para participar en los procesos de coagulación, sedimentación y adsorción influye en los tiempos de residencia y transporte de las trazas de metal desde el cuerpo de agua a los sedimentos y a otras matrices (Reyes et al., 2016), lo cual provoca que su permanencia en el ambiente se extienda con el tiempo.

Frente a esta problemática, la comunidad científica ha desarrollado diversos métodos de remoción capaces de extraer metales pesados en aguas residuales. Sin embargo, la selección de un tratamiento en particular, dependerá de agentes como: el tipo y concentración de residuos, la heterogeneidad del efluente, el nivel requerido de limpieza, así como de factores económicos (Rajasulochana & Preethy, 2016).

El presente documento se enfocará en presentar las técnicas de tratamiento convencionales y no convencionales. El primer grupo, referido a las técnicas basadas en procesos físico - químicos para la remoción de contaminantes, mientras que el segundo grupo corresponde a los procesos innovadores que se llevan a cabo para alcanzar el mismo fin.

Técnicas de remoción de metales pesados en aguas residuales

1. Técnicas convencionales

Las técnicas convencionales para eliminar los metales pesados disueltos incluyen la precipitación química, adsorción en carbón activado, operaciones unitarias de separación por membrana, intercambio iónico, evaporaciones y tratamientos electroquímicos (Bencheikh-lehocine et al., 2003; Blöcher et al., 2003; Mohan & Pittman, 2006; Rajasulochana & Preethy, 2016). Estos métodos comúnmente usados, presentan restricciones de factibilidad técnica o económica, especialmente cuando las concentraciones de metales son bajas. Además, poseen cierta dificultad para lograr disponer los desechos producidos en el tratamiento (Albis et al., 2017; Pacheco et al., 2010; Tejada et al., 2015).

1.1. Filtración por membrana

Posee cierta relevancia en el tratamiento de efluentes por su capacidad para eliminar diversos compuestos: orgánicos, sólidos suspendidos y contaminantes inorgánicos, como metales pesados. Recientemente, esta operación unitaria de separación por membrana se ha aplicado con mayor frecuencia en el tratamiento de efluentes inorgánicos para reducir la cantidad de aguas residuales y mejorar la calidad del efluente tratado (Barakat & Schmidt, 2010). El tipo de filtración por membrana a usar dependerá del tamaño de partícula a retener. Se tiene como opciones la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa para la remoción de metales pesados en agua (Barakat, 2011).

La filtración por membrana posee dos características singulares: (1) la forma de la membrana debe ser asimétrica y la alimentación debe estar orientada por el lado donde el poro es más pequeño, para reducir la presión de la membrana y eliminar el taponamiento. (2) el flujo debe ser fuerte y cruzado, para eliminar la acumulación de la torta en el filtro (Abdel-Fatah, 2018). Las ventajas de este tipo de filtración son las siguientes: cuenta con bajos requisitos de energía, posee alta selectividad de separación y cuenta con una rápida reacción cinética (Abdel-Fatah, 2018; Abdellah et al., 2020; Widodo et al., 2020). Sin embargo, su gran limitante es que genera grandes

cantidades de lodos con contenido de metales pesados (Caviedes et al., 2015). Sin embargo, las operaciones unitarias también se pueden complementar con procedimientos biológicos para el tratamiento óptimo de residuos (Sepehri & Sarrafzadeh, 2018)

a. Ultrafiltración (UF)

Separa macromoléculas, metales pesados y sólidos suspendidos de la solución inorgánica conforme al tamaño del poro y el peso molecular (Marais et al., 2018). En resumen, la UF permite el paso del agua y solutos de bajo peso molecular, mientras detiene a las macromoléculas más grandes que los poros de la membrana. La UF puede llegar a tener una eficiencia de remoción mayor a 90%, de acuerdo a las características de la membrana (Barakat, 2011).

Las ventajas de la UF permite operar con menor fuerza motriz y requiere menos espacio debido a su alta densidad de empaque. Sin embargo, su principal desventaja se debe al rápido taponamiento de la membrana, ya que, disminuye el rendimiento de la separación restringiendo su aplicación a una mayor escala (Wang et al., 2008). Los efectos adversos causados por el taponamiento o ensuciamiento de la membrana son la disminución del flujo, el aumento de la presión transmembrana (TMP) y la degradación de los materiales de la membrana; lo cual genera un mayor costo debido al mantenimiento (Amy, 2008; Gao et al., 2011; Wang et al., 2008)

Ósmosis inversa (OI)

Es una operación unitaria de membrana impulsado por presión hidrostática, donde el agua pasa a través de la membrana mientras retiene los compuestos catiónicos de la solución de alimentación (Ricci et al., 2017). La OI funciona eficazmente en un amplio rango de pH de 3–11 y a una presión comprendida entre 4,5–15 bares, siendo este el parámetro que afecta en mayor medida la remoción de metales pesados: a mayor presión, mayor eficiencia de remoción y, con ello, mayor consumo energético (Kurniawan et al., 2006). Las ventajas de usar OI incluyen: alta entrada de agua, resistencia mecánica y al ataque biológico, estabilidad química y alta resistencia térmica (Kurniawan et al., 2006). Además, permite que las aguas provenientes de los procesos industriales puedan reutilizarse y, que los usuarios industriales puedan cumplir con los límites permisibles de descarga de efluentes exigidos por normativa ambiental (Kurniawan et al., 2006).

A pesar de sus amplios beneficios, la OI tiene algunas limitaciones: (1) La membrana tiene que ser reemplazada en forma constante, debido a que los poros son más propensos a ensuciarse, lo cual incrementa los costos operativos (Li et al., 2017). (2) El rendimiento de la membrana disminuye con el tiempo, lo que resulta en la disminución del caudal de permeado (Ning, 2002). (3) Alto consumo de energía. (4) La necesidad de personal experimentado para ejecutar el procedimiento (Slater et al., 1983) .

1.2. Electrodialisis (ED)

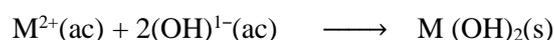
Es una operación unitaria de separación de membrana en la que las especies ionizadas en la solución pasan a través de una membrana de intercambio iónico, bajo la influencia de un campo eléctrico continuo que funciona como fuerza directora (Barakat, 2011; López, 2005). Las membranas son láminas de materiales plásticos que funcionan como compartimentos delgados dispuestos de manera intercalada que cuentan con características aniónicas o catiónicas haciendo posible el movimiento de los iones. Las láminas catiónicas permiten el paso a los cationes mientras que las láminas aniónicas ceden el paso a los aniones; de esta forma, algunos compartimentos van quedándose sin iones (diluido) y otros compartimentos van teniendo cada vez mayor cantidad de iones (concentrado) (López García, 2005).

La ED ofrece ventajas para el tratamiento de aguas residuales con carga de metales pesados, pues tiene la capacidad de producir una corriente altamente concentrada para la recuperación y el rechazo de impurezas no deseadas del agua. Algunos metales valiosos como el cobre y cromo pueden ser recuperados. Debido a que la ED es una operación de membrana, es necesario que la alimentación no se encuentre contaminada, se opere de manera adecuada y se le brinde mantenimiento periódico para evitar daños en la pila (Barakat, 2011). Las desventajas de este tratamiento es que el rendimiento de la celda no depende de los iones a trabajar y va de la mano de las condiciones operativas y la estructura de la celda. Asimismo, posee altos costos operativos por el consumo masivo de energía.

1.3. Precipitación química

Es uno de los procesos más utilizados para la eliminación de iones metálicos en agua (Chen et al., 2018; Ku & Jung, 2001). El proceso de precipitación consiste en la adición de químicos, sea hidróxido o sulfuro, que reaccionan con los iones dispersos en el agua formando precipitados insolubles (Chen et al., 2018), que luego son removidos del agua por otros procesos físicos como sedimentación, flotación o filtración (Fu & Wang, 2011). Estos procesos dependen del tamaño, la densidad y la carga superficial de las partículas a eliminar (Chen et al., 2009; Demopoulos, 2009; Mokone et al., 2010)

Una ecuación sencilla para entender el proceso de eliminación de metales pesados es la siguiente:



Donde M^{2+} y $(OH)^{1-}$ representan al ion metálico y ion no metálico, disueltos y el $M(OH)_2$ es el precipitado o el hidróxido metálico insoluble.

La precipitación por hidróxido es la más usada debido a su relativa simplicidad, siendo eficaz en un amplio rango de temperatura, bajo costo operativo y facilidad en el control del pH (Chen et al., 2018; Huisman et al., 2006). Se utiliza una variedad de hidróxidos para precipitar metales de las aguas residuales; sin embargo, la cal (CaO) es el agente más usado como precipitante en entornos industriales (Fu & Wang, 2011). La precipitación por cal puede emplearse para tratar eficazmente los efluentes inorgánicos con una concentración de metal superior a 1000 mg / L. El factor que más influye en el tratamiento de efluentes es el pH, pues cuando es ajustado a condiciones básicas (pH 9-11) mejora la eliminación de metales pesados.



$$K_{ps}(Ca(OH)_2) = 6.5 \times 10^{-6}$$

Las ventajas de la precipitación por cal incluyen la simplicidad del proceso, el requerimiento de equipos de bajo costo y las operaciones convenientes y seguras (Kurniawan et al., 2006). La desventaja de este tratamiento es que requiere grandes cantidades de químicos para reducir la concentración de metales a un nivel permitido para la descarga. A ello se le suma la producción

de lodos que requieren tratamiento adicional, la lenta precipitación de metales, un asentamiento deficiente de precipitados, la agregación de precipitados metálicos y los impactos ambientales debido a la eliminación de lodos a largo plazo (Barakat, 2011).

1.4. Coagulación – floculación

Es una técnica empleada para el tratamiento de efluentes inorgánicos con una concentración de metal inferior a 100 mg / L o superior a 1000 mg / L. El proceso de coagulación desestabiliza las partículas coloidales y produce sedimentación. Luego, en la floculación aumenta el tamaño de las partículas inestables en flóculos voluminosos (Semerjian & Ayoub, 2003) . El enfoque general para esta técnica incluye el ajuste del pH e implica la adición de sales de hierro y aluminio como coagulante para superar las fuerzas repulsivas entre las partículas. Al igual que la precipitación química, se ha encontrado que el pH óptimo debe estar comprendido entre 11.0 a 11.5, es efectivo para mejorar la eliminación de metales pesados por coagulación-floculación.

Las ventajas de la coagulación-floculación son que mejora la sedimentación del lodo, la capacidad de inactivación bacteriana y la estabilidad del lodo. Las limitaciones de la coagulación-floculación son los altos costos operativos y el mayor volumen de lodos generados que puede dificultar su adopción como una estrategia global para el tratamiento de aguas residuales (Kurniawan et al., 2006)

2. Técnicas no convencionales

2.1. Bioadsorción

Es una operación unitaria de transferencia de masa que se lleva a cabo a través de biomasa, por el cual un contaminante es retenido en la parte externa de un material adsorbente formando una lámina molecular. El procedimiento incluye al adsorbente y el adsorbato: el adsorbente es el material donde se concentra la sustancia que se piensa remover y puede ser de tipo orgánico o inorgánico; mientras que el adsorbato es la sustancia que se desea concentrar y conservar en la superficie del adsorbente (Cabañas & Zepeda, 2013; Lagos, 2016). Normalmente la adsorción se efectúa mediante fuerzas físicas de atracción, enlaces químicos o intercambio catiónico (Rodríguez et al., 2013).

Los materiales más empleados como bioadsorbente son los derivados de materiales lignocelulósicos: lignina y holocelulosa (celulosa y hemicelulosa), que al ser polímeros ramificados son capaces de capturar y/o intercambiar iones metálicos (Cardona et al., 2013; Pacheco et al., 2010; Tejada et al., 2015). La cantidad de compuestos orgánicos relacionados con los grupos funcionales caracterizan al bioadsorbente, tales como: taninos, polialginatos, péptidoglucanos, polisacáridos, glicoproteínas, fucanoides, compuestos heterocíclicos y flavonoides, con gran influencia en la capacidad de bioadsorción debido a que cuenta con centros atrayentes de cationes formados por átomos de los grupos funcionales amino, hidroxilo, carboxilato, fosfato y sulfhidrilos, conocidos por su potencial nucleofílico (Pacheco et al., 2010). Bautista (2008) indica que un bioadsorbente ideal para la recuperación de metales debe cumplir con los siguientes criterios: (1) Debe captar al metal de forma eficiente y rápida a bajas concentraciones (≤ 10 mg/L) y altas (≥ 100 mg/L). (2) Debe ser producido a bajo costo. (3) Debe tener una alta versatilidad para operar bajo un amplio intervalo de valores de pH, temperatura y otras condiciones de la disolución. (4) Debe ser selectivo, deseable para separar metales específicos de una disolución que contenga varias especies metálicas. (5) Pueda ser reusado en otro ciclo en actividades de bioadsorción.

Las variantes físicas y químicas que influyen en la captación de los iones metálicos en el agua son pH, temperatura, concentración inicial del metal pesado y, la cantidad y tamaño del bioadsorbente (Lagos, 2016; Tejada et al., 2015). Sin embargo, el pH es el parámetro más influyente, debido a que interviene en la bioadsorción: al adsorbato por su especiación y al bioadsorbente por su disponibilidad en puntos de enlace (Tejada et al., 2015). Otros factores que participan en la adsorción de metales pesados son el tipo de material adsorbente, propiedades del metal y las condiciones de los alrededores (Lagos, 2016).

La principal ventaja de la bioadsorción es que permite recuperar los iones metálicos de las descargas de efluentes e integrarlos a un nuevo ciclo productivo (Albis et al., 2017). Además, comparado con otras técnicas, es considerado un método favorable por su alta eficiencia y su facilidad para remover metales iónicos en bajas concentraciones, como 1mg/L. (Altun & Pehlivan, 2012; Quiñones et al., 2013).

2.2. Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica usada para tratar problemas ambientales relacionados con altas concentraciones de metales pesados en el agua. Existen diversos procesos de fitorremediación, sin embargo, para el tratamiento de agua los más factibles son la fitoextracción y la fitofiltración. La fitoextracción, también conocida como fitoacumulación, se le denomina al proceso que realizan las plantas para absorber los contaminantes del suelo o agua por medio de las raíces para translocarlas y acumularlas en la biomasa aérea, es decir, los brotes (Covarrubias & Peña, 2017). La traslocación de metales a los brotes es un proceso bioquímico crucial y es deseable en una fitoextracción eficaz porque la cosecha de biomasa de raíces generalmente no se aprovecha. Por otro lado, la fitofiltración se enfoca en eliminar los contaminantes de las aguas superficiales o aguas residuales, por el cual los contaminantes se absorben o adsorben para minimizar su movimiento a las aguas subterráneas (Ali et al., 2013)

Las ventajas de este tipo de tratamiento es que posee una alta efectividad para extraer metales pesados del ambiente, su alta tolerancia a los efectos tóxicos de los metales pesados, buena adaptación a las condiciones ambientales y climáticas imperantes. Sin embargo, aunque la fitorremediación es un enfoque prometedor, su principal limitación es que la eficiencia de los acumuladores de metales pesados se ve obstaculizada por la lenta tasa de crecimiento y cantidad de biomasa (Ali et al., 2013).

Conclusiones

La contaminación por metales pesados en aguas residuales es un problema que afecta al hombre y al ambiente por todas las implicaciones e impactos negativos en la salud del ser humano y en la naturaleza. Debido a eso, existen tratamientos que tienen como finalidad remover esos contaminantes del agua para cumplir con las regulaciones ambientales exigidas. Si bien todos los tratamientos de remoción, son empleados para eliminar los metales pesados en efluentes industriales; se debe de considerar que su aplicabilidad no solo debe de depender de los resultados a obtener, sino también de cada una de las ventajas y limitaciones inherentes. Los métodos convencionales eliminan los metales pesados y son usados por su simplicidad operativa y costo económico; sin embargo, se debe tomar en cuenta que existen otros métodos como los tratamientos no convencionales, capaces de obtener los mismos resultados con impactos controlados al ambiente y costos económicos razonables.

Referencias bibliográficas

- Abdel-Fatah, M. A. (2018). Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 3077–3092. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2018.08.001>
- Abdellah, M. H., Scholes, C. A., Liu, L., & Kentish, S. E. (2020). Efficient degumming of crude canola oil using ultrafiltration membranes and bio-derived solvents. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 59(August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102274>
- Albis, A., Martínez, J., Severiche, M., & Garcia, J. (2017). Remoción de plomo de soluciones acuosas usando cáscara de yuca modificada con ácido cítrico. *Avances Investigación En Ingeniería*, 13(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.254>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.01.075>
- Altun, T., & Pehlivan, E. (2012). Removal of Cr(VI) from aqueous solutions by modified walnut shells. *Food Chemistry*, 132(2), 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.099>
- Amy, G. (2008). Fundamental understanding of organic matter fouling of membranes. *Desalination*, 231(1–3), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.11.037>
- Barakat, M. A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 4(4), 361–377. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2010.07.019>
- Barakat, M. A., & Schmidt, E. (2010). Polymer-enhanced ultrafiltration process for heavy metals removal from industrial wastewater. *Desalination*, 256(1–3), 90–93. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2010.02.008>
- Bautista Hernández, D. (2008). *Bioadsorción de metales pesados mediante el uso de biomasa bacteriana aislada de jales mineros*.

- Bencheikh-lehocine, M., Arris, S., Meniai, A.-H., Morcellet, M., Bacquet, M., Martel, B., & Mansri, A. (2003). Study and Identification of Retention Process of Heavy Metals by Adsorption on Agricultural Byproducts. *Engineering in Life Sciences*, 3(9), 351–360. <https://doi.org/10.1002/elsc.200301634>
- Blöcher, C., Dorda, J., Mavrov, V., Chmiel, H., Lazaridis, N. K., & Matis, K. A. (2003). Hybrid flotation—membrane filtration process for the removal of heavy metal ions from wastewater. *Water Research*, 37(16), 4018–4026. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00314-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00314-2)
- Cardona Gutiérrez, A. F., Cabañas Vargas, D. D., & Zepeda Pedreguera, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados , Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 17(1), 1–9. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46729718001>
- Caviedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13(1), 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- Chen, Q., Luo, Z., Hills, C., Xue, G., & Tyrer, M. (2009). Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: Sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Research*, 43(10), 2605–2614. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.007>
- Chen, Q., Yao, Y., Li, X., Lu, J., Zhou, J., & Huang, Z. (2018). Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates. *Journal of Water Process Engineering*, 26(October), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.003>
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33, 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>

- Demopoulos, G. P. (2009). Aqueous precipitation and crystallization for the production of particulate solids with desired properties. *Hydrometallurgy*, 96(3), 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.10.004>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2010.11.011>
- Gao, W., Liang, H., Ma, J., Han, M., Chen, Z. lin, Han, Z. shuang, & Li, G. bai. (2011). Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review. *Desalination*, 272(1–3), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.051>
- Huisman, J. L., Schouten, G., & Schultz, C. (2006). Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry. *Hydrometallurgy*, 83(1–4), 106–113. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2006.03.017>
- Ku, Y., & Jung, I.-L. (2001). Photocatalytic reduction of Cr(VI) in aqueous solutions by UV irradiation with the presence of titanium dioxide. *Water Research*, 35(1), 135–142. www.elsevier.com/locate/watres
- Kurniawan, T. A., Chan, G. Y. S., Lo, W.-H., & Babel, S. (2006). Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 118(1–2), 83–98. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2006.01.015>
- Lagos Araujo, L. K. (2016). Bioadsorción de cromo con borra de café en efluentes de una industria curtiembre local. In *Tesis de Licenciatura*.
- Li, Y., Xu, Z., Liu, S., Zhang, J., & Yang, X. (2017). Molecular simulation of reverse osmosis for heavy metal ions using functionalized nanoporous graphenes. *Computational Materials Science*, 139, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.07.032>
- López García, U. M. (2005). *Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua*.

[https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicación de la electrodiálisis en agua..pdf](https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicación_de_la_electrodialisis_en_agua..pdf)

Marais, S. S., Ncube, E. J., Msagati, T. A. M., Mamba, B. B., & Nkambule, T. T. I. (2018). Comparison of natural organic matter removal by ultrafiltration, granular activated carbon filtration and full scale conventional water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6282–6289. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.002>

Mohan, D., & Pittman, C. U. (2006). Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 762–811. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2006.06.060>

Mokone, T. P., van Hille, R. P., & Lewis, A. E. (2010). Effect of solution chemistry on particle characteristics during metal sulfide precipitation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 351(1), 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.06.027>

Ning, R. Y. (2002). Arsenic removal by reverse osmosis. *Desalination*, 143(3), 237–241. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00262-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00262-X)

Pacheco Tanaka, M. E., Pimentel Frisancho, J. P., & Villanueva Roque, W. F. (2010). Cinética de la bioadsorción de iones cadmio (II) y plomo (II) de soluciones acuosas por biomasa residual de café (*Coffea arabica* L.). *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 76(3), 279–292. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2010000300009

Quiñones, E., Tejada, C., Arcia, C., & Ruiz, V. (2013). *Remoción de plomo y níquel en soluciones acuosas usando biomasas lignocelulósicas: una revisión*. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v16n2/v16n2a23.pdf>

Rajasulochana, P., & Preethy, V. (2016). Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. *Resource-Efficient Technologies*, 2(4), 175–184. <https://doi.org/10.1016/J.REFFIT.2016.09.004>

- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>
- Ricci, B. C., Ferreira, C. D., Marques, L. S., Martins, S. S., Reis, B. G., & Amaral, M. C. S. (2017). Assessment of the chemical stability of nanofiltration and reverse osmosis membranes employed in treatment of acid gold mining effluent. *Separation and Purification Technology*, 174, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.007>
- Rodríguez, V., Vargas, C., Marrufo, G., & Benetton, M. (2013). Evaluación del proceso de biosorción con cáscaras de naranja para la eliminación del colorante comercial Lanasol Navy CE en aguas residuales de la industria textil. *Ingeniería*, 13(3), 39–43.
- Semerjian, L., & Ayoub, G. M. (2003). High-pH–magnesium coagulation–flocculation in wastewater treatment. *Advances in Environmental Research*, 7(2), 389–403. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00009-6)
- Sepehri, A., & Sarrafzadeh, M. H. (2018). Effect of nitrifiers community on fouling mitigation and nitrification efficiency in a membrane bioreactor. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 128(March), 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.04.006>
- Slater, C. S., Ahlert, R. C., & Uchrin, C. G. (1983). Applications of reverse osmosis to complex industrial wastewater treatment. *Desalination*, 48(2), 171–187. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(83\)80015-0](https://doi.org/10.1016/0011-9164(83)80015-0)
- Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, Á., & Garcés Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109–123.
- Vicente Martorell, J. J. (2010). *Biodisponibilidad De Metales Pesados En Dos Ecosistemas Acuáticos De La Costa Suratlántica Andaluza Afectados Por Contaminación Difusa*. Universidad de Cádiz.

- Wang, L., Wang, X., & Fukushi, K. ichi. (2008). Effects of operational conditions on ultrafiltration membrane fouling. *Desalination*, 229(1–3), 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.08.018>
- Widodo, S., Khoiruddin, K., Ariono, D., Subagjo, S., & Wenten, I. G. (2020). Re-refining of waste engine oil using ultrafiltration membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103789>
- Zevallos de la Torre, S. (2018). *Calidad de agua, bioacumulación de metales pesados y niveles de estrés en la trucha arcoíris (oncorhynchus mykiss) en Callhuahuacho, Apurímac* [Universidad Peruana Cayetano Heredia]. http://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/upch/3645/Calidad_ZevallosDeLaTorre_Samanta.pdf?sequence=1&isAllowed=y