

Tratamiento para aguas contaminadas con metales pesados

Una revisión

Miguel Ángel López-Ramírez¹, Gerardo González-Gómez², Carlos Posadas-Cano¹,
Olaya Pirene Castellanos-Onorio³

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre, Ingeniería Ambiental

² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre, Ingeniería en Gestión Empresarial

³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz

Resumen

Los tratamientos para aguas contaminadas con metales pesados incluyen diversas técnicas físicas, químicas y biológicas para eliminar o reducir la concentración de estos contaminantes. Entre los métodos físicos se encuentran la filtración, la sedimentación y la adsorción, que se basan en la separación de los contaminantes del agua mediante procesos físicos. Los tratamientos químicos, como la precipitación, la coagulación-floculación y el intercambio iónico, implican reacciones químicas que transforman los metales pesados en formas menos solubles o los precipitan para su posterior eliminación.

Los tratamientos para aguas contaminadas con metales pesados, empleando procesos de oxidación avanzada (POA), constituyen una estrategia efectiva y avanzada en la remediación de estos cuerpos de agua.

La elección del método de tratamiento depende de factores como la naturaleza de los metales pesados presentes, la concentración de contaminantes, el caudal de agua a tratar y consideraciones económicas.

Abstract

Treatments for water contaminated with heavy metals include various physical, chemical and biological techniques to remove or reduce the concentration of these contaminants. Physical methods include filtration, sedimentation and adsorption, which are based on the separation of contaminants from water by physical processes. Chemical treatments, such as precipitation, coagulation-flocculation and ion exchange, involve chemical reactions that transform heavy metals into less soluble forms or precipitate them for subsequent removal.

Treatments for waters contaminated with heavy metals, using advanced oxidation processes (AOPs), constitute an effective and advanced strategy in the remediation of these water bodies.

The choice of treatment method depends on factors such as the nature of the heavy metals present, the concentration of contaminants, the flow of water to be treated and economic considerations.

Palabras Clave: Tratamientos; Metales Pesados; Método

Keywords: Treatment; Heavy Metals; Method

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación se produce con la introducción excesiva de agentes tóxicos que en concentraciones determinadas afectan las propiedades físicas, químicas, y biológicas del aire, suelo y agua, afectando directamente a la biosfera. Estos agentes tóxicos son generados por industrias como la minería, fundición de metales, producción de combustibles a partir del petróleo, industria de fertilizantes y pesticidas, e industria de curtido del cuero. Todas estas actividades antropogénicas contienen metales pesados con efectos perjudiciales para la vida (González y Delgado, 2021).

Los metales pesados son contaminantes que por su persistencia y transporte a grandes distancias alcanzan con cierta facilidad los cuerpos de aguas superficiales, manifestando un riesgo potencial para la biota. La elevada toxicidad de metales tiende a bioacumularse en la biota e ingresar a la cadena trófica al biomagnificarse hasta llegar a los organismos superiores, incluyendo el hombre (Flores et al., 2018).

Los sistemas de producción industrial actuales usan metales pesados para la extracción de un material o como elemento en la refinación de un producto en particular lo que en principio resulta en la obtención del producto deseado con relativos bajos costos de producción. Sin embargo, usar estos metales presenta un grave problema a nivel ambiental debido a sus altos niveles de toxicidad para los organismos con los que interactúen una vez descargados. Por tanto, se han desarrollado diversos métodos para tratar con estos metales una vez están en el agua y los métodos para analizarlos. Es evidente el hecho de que la principal fuente de metales pesados radica en las actividades industriales realizadas por la humanidad, esto afecta de forma considerable no solo la vida humana si no a los animales, las plantas, las fuentes hídricas y los suelos, en otras palabras, afecta toda la cadena trófica debido a la descarga de metales pesados al ambiente (Pabón et al., 2020).

El incremento de la concentración de metales pesados en el agua se debe principalmente la descarga de efluentes industriales, lo cual se ha convertido en el mayor problema de contaminación en todo el mundo, puesto que las concentraciones de metales en agua han excedido los límites permitidos. La descarga de aguas residuales altamente contaminadas con metales pesados, como Pb (II) y Ni (II), a ambientes naturales genera efectos tóxicos en humanos, animales, plantas y ecosistemas urbanos. Así mismo, la presencia de metales pesados puede inhibir el crecimiento de ciertos organismos acuáticos, afectando el beneficio de estos en cuerpos de agua; además, los iones metálicos y los complejos formados por estos podrían acumularse en el cuerpo de peces y otros organismos acuáticos, y finalmente podrían llegar al cuerpo humano por bioacumulación, bioconcentración y biomagnificación (Tejeda et al., 2016).

El níquel es liberado al medio ambiente a partir de una gran variedad de fuentes naturales y antropogénicas. Dentro de las fuentes industriales, una cantidad considerable deriva de la combustión del carbón, petróleo, y otros combustibles fósiles. También contribuyen la fabricación de aleaciones de níquel (acero), los procesos de galvanoplastia, la incineración de residuos y las aguas residuales. Por lo general, la porción más grande de níquel y sus compuestos que se liberan al medio ambiente se adsorben sobre los sedimentos o partículas del suelo y, por tanto, se inmovilizan, pudiendo captarse por las plantas allí cultivadas y a través de los alimentos llegar al ser humano. No obstante, en los suelos ácidos su movilidad aumenta debido a una mayor solubilidad pudiéndose filtrar a las aguas subterráneas. El hecho de que el níquel pueda llegar al medio ambiente a partir de una gran variedad de fuentes hace que la mayoría de los organismos vivos estén expuestos a sus efectos tóxicos en un momento u otro durante sus vidas (Olivares et al., 2015).

2. ESTADO DEL ARTE

Contaminación del agua por metales pesados

Los metales pesados son tóxicos ambientales muy peligrosos. Sus características más comunes son: persistencia, bioacumulación, biotransformación y elevada toxicidad, todo lo cual hace que se encuentren en los ecosistemas por largos periodos, ya que su degradación natural es difícil. Los metales pesados son emitidos por diferentes fuentes, por cuanto provienen de su presencia en los suelos donde se han acumulado durante

la formación de las capas terrestres; asimismo, son empleados en varios procesos industriales y se dice que forman parte del quehacer del hombre (Rodríguez, 2017).

Específicamente, la contaminación del agua por metales pesados ocasionada por vía antrópica y natural está afectando drásticamente la seguridad alimentaria y salud pública. Estudios recientes reportan la presencia de metales pesados y metaloides tales como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr) en hortalizas tales como la lechuga, repollo, calabaza, brócoli y papa. Esta contaminación, proviene, entre otros causales, del uso para riego de aguas afectadas. Por su elevada toxicidad, el impacto causado en salud por exposición prolongada o por bio-acumulación de metales pesados resulta alarmante. Dependiendo del tipo de metal o metaloide, se producen afecciones que van desde daños en órganos vitales hasta desarrollos cancerígenos. A nivel global, se han reportado casos que dan cuenta de las afecciones en la salud por causa del consumo de alimentos contaminados por metales pesados (Reyes et al., 2016).

Tipos de metales pesados

Níquel (Ni). El níquel está presente en el medio ambiente de manera natural, siendo esencial para el crecimiento de muchas especies de microorganismos y plantas y para algunas especies de vertebrados. Entonces, se puede suponer que una exposición a este metal en dosis reducidas no es nociva para el ser humano, sin embargo, una exposición continuada a ambientes altamente contaminados puede potenciar la aparición de patologías como dermatitis, fibrosis pulmonar, enfermedades cardiovasculares o de riñón e incluso cáncer. Debido al uso extensivo de este metal en la industria, se liberan grandes cantidades de Ni a la atmósfera, aguas y suelos. Las fuentes de contaminación más comunes incluyen los procesos de producción y procesado de sus derivados, el reciclaje de productos que contienen este metal y la eliminación de residuos y lodos activados conteniendo Ni. El níquel mayormente entra en el medio ambiente a través del aire, siendo liberado por las chimeneas industriales y adhiriéndose a las partículas de polvo. Su entrada al medio acuático se puede dar a través de la degradación física y química de rocas y suelos, la deposición de partículas de la atmósfera que lo contienen y las descargas de aguas residuales tanto industriales como municipales, además las condiciones ácidas de los suelos favorecen su movilización y filtración hacia las aguas subterráneas (Soler, 2014).

Plomo (Pb). el Pb genera alteraciones en el estatus iónico celular y estrés oxidativo, lo que trae como consecuencia disrupciones endócrinas, inhibición de la actividad enzimática, muerte celular, genotoxicidad y problemas inflamatorios. También se ha atribuido al Pb la inhibición de la síntesis de hemoglobina, generando anemia, incremento de la presión sanguínea, daño renal, perturbaciones en el sistema nervioso central y cáncer de estómago y pulmones. Además, los niños son muy sensibles al Pb, el cual genera retraso en el desarrollo mental e intelectual. En los animales el Pb genera retardos en la maduración, afecta la cantidad y calidad de la esperma y produce cambios conductuales en mamíferos, invertebrados y en las aves puede ser mortal a bajas concentraciones (Pernía et al., 2018).

Cadmio (Cd). El Cd puede acumularse en los riñones, donde afecta el mecanismo de filtración causando la excreción de proteínas esenciales y azúcares del cuerpo y el consecuente daño de los riñones, también genera daño en el sistema nervioso central, inmune, y posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer. Así, el Cd es reconocidos como tóxicos acumulativos y su concentración en aguas de consumo humano según la EPA no puede ser superior a $0.005 \text{ mg L}^{-1} \text{ Cd}$, $0.015 \text{ mg L}^{-1} \text{ Pb}$ (Macías et al., 2017).

Efectos tóxicos por Níquel

Las investigaciones indican que los efectos de la toxicidad del Ni en el hombre son neurológicos, reproductivos y carcinogénicos. Se deben tomar particulares cuidados en la industria del Ni, ya que es sumamente tóxico cuando se inhala. De tal forma que los procesos industriales en que se utiliza este metal, así como el carbón y el petróleo, se consideran fuentes contaminantes (Muñiz et al., 2015).

Dermatitis. La dermatitis por contacto es una reacción eczematosa en piel causada por la exposición repetida y directa de un alérgeno. Metales como el níquel, cobalto, cromo y cinc tienen una amplia distribución en la naturaleza y forman parte de numerosos objetos utilizados en la vida diaria como la joyería, industria metalúrgica y manufactura de instrumental médico, entre otros. El níquel es la causa más importante de dermatitis ocupacional, además de que presenta reactividad a otros metales, principalmente cromo y cobalto (Román et al., 2019).

Asma crónica. En pequeñas cantidades el níquel es esencial, pero cuando es ingerido en muy altas cantidades puede ser peligroso para la salud humana. La exposición a este provoca afecciones en la piel cuando se produce el contacto con agua contaminada y la toma de altas cantidades puede provocar mareos después de la exposición al gas de níquel, embolia de pulmón y fallos respiratorios. También provoca defectos de nacimiento, asma, bronquitis crónica, desórdenes del corazón y reacciones alérgicas como son erupciones cutáneas; mayormente de las joyas (Rodríguez, 2017).

Efectos cancerígenos. En la industria de la minería interesa destacar la mayor incidencia del cáncer del pulmón, así como las neumoconiosis, que son las enfermedades causadas por la inhalación del polvo inorgánico. Las complicaciones de la silicosis incluyen la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC); infección por mycobacterias tuberculosis (Silicotuberculosis); infección por hongos oportunistas; artritis reumatoide y esclerodermia y riesgo aumentado de cáncer de pulmón (2 a 6 veces mayor), independiente de la asociación al tabaquismo (Cabrera et al., 2014).

Tratamientos para metales pesados

La implementación de metales en los procesos industriales ha permitido que grandes concentraciones de metales pesados potencialmente tóxicos sean emitidas a la atmósfera y vertidos en los ambientes acuáticos y terrestres. La toxicidad de los metales pesados depende de su movilidad en el medio, que, a su vez, depende de su especiación química, persistencia y tendencia de acumulación o bioacumulación (Rubio et al., 2015).

Filtración por membranas. En la tecnología de membrana se aprovecha una diferencia de presión a través de la membrana para superar el gradiente de presión osmótica. Bajo estas condiciones, los iones no pueden atravesar la membrana y así son separados del disolvente. La filtración con membrana ha recibido considerable atención en el tratamiento de efluentes inorgánicos, debido a su capacidad de remover no solo sólidos suspendidos y compuestos orgánicos, sino también contaminantes inorgánicos tales como los metales pesados. Dependiendo del tamaño de partículas que quieran ser retenidas se pueden emplear varios tipos de membranas tales como ultrafiltración, nanofiltración y osmosis reversa para remover metales pesados presentes en aguas residuales (Sarria et al., 2020).

Carbón activado. Uno de los materiales más usados para la remoción de metales es el carbón activado, debido a su alta superficie específica, estabilidad química y durabilidad. La remoción de iones y otros metales de aguas

ha sido reportada como eficiente mediante la preparación de carbón activado a partir de aserrín, cáscaras de arroz, fibra de coco, bagazo de caña, entre otros. Su utilización para la adsorción de metales pesados en gran medida se basa en la acidez de la superficie y la funcionalidad especial de la superficie, en donde los mecanismos de eliminación pueden comprender el intercambio de iones, interacción y la coordinación de grupos funcionales, aunque su preparación para utilizarse como adsorbente en algunos casos suele resultar un poco costosa (Tejeda et al., 2014).

Electrodiálisis. La electrodiálisis es un proceso de separación por electromembrana que se aplica para eliminar contaminantes iónicos de soluciones acuosas. Normalmente, la corriente de alimentación en las unidades de electrodiálisis es una solución salina que se convierte en dos flujos de productos: una solución desalada y una solución concentrada. La fuerza motriz para la transferencia de iones es una diferencia en el potencial eléctrico eléctrica y la transferencia de masa tiene lugar a través de las membranas de intercambio iónico, que tienen dos funciones diferentes: separar las diferentes corrientes acuosas y facilitar el transporte de iones desde los compartimentos diluidos hacia los concentrados (Cueva, 2022).

Electrocoagulación. La electrocoagulación consiste en la desestabilización de compuestos suspendidos, emulsificados o disueltos en una celda electrolítica. La corriente eléctrica que fluye por los electrodos proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Dichas moléculas se mueven a través del campo eléctrico aplicado y pueden formar componentes ionizados, electrolizados, hidrolizados o radicales libres siendo hidrofóbicos que se adhieren a las paredes del electrodo, precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario (Rojas et al., 2020).

Tratamientos de oxidación avanzada

En las últimas décadas, las tecnologías de oxidación avanzada se han consolidado como una alternativa eficiente en la destrucción de sustancias tóxicas, incluyendo las orgánicas, inorgánicas, metales o patógenos. En general, en el tratamiento de aguas las tecnologías de oxidación avanzada se utilizan cuando los efluentes contaminados tienen una alta estabilidad química o una baja biodegradabilidad. Es cada vez más común el uso de la oxidación avanzada en los tratamientos terciarios y, especialmente, en las plantas depuradoras de ciertas industrias. Estas tecnologías se han utilizado en la remediación de suelos contaminados, aguas subterráneas o superficiales y sustancias gaseosas (López et al., 2021).

En general, el mecanismo de acción de los radicales hidroxilos se basa en que los contaminantes orgánicos interactúan con el radical hidroxilo a través de vías de adición o extracción de hidrógeno, dando como resultado un radical centrado en el carbono, el cual posteriormente reacciona con el oxígeno molecular para formar un radical peroxilo que experimenta reacciones posteriores, generando una gran cantidad de productos de oxidación como cetonas, aldehídos o alcoholes (Rodríguez y Barrera, 2020).

Procesos Homogéneos

Los POA son caracterizados por la generación de radicales hidroxilos ($\text{HO}\bullet$) y por el potencial de transformación de una amplia gama de moléculas orgánicas en compuestos no nocivos como CO_2 , y H_2O . Dentro de algunos tipos de POA se encuentran la degradación foto catalítica homogénea y heterogénea. Los procesos homogéneos emplean ozono y peróxido de hidrógeno para la descomposición catalítica en un medio ácido y en presencia de iones ferrosos (reacción de Fenton y Foto-Fenton) (Cortés, 2018).

Ozonización catalítica. La ozonización catalítica (OC) es una tecnología prometedora en términos de eficiencia y costo energético como tratamiento de efluentes industriales que poseen contaminantes de preocupación emergentes, ya que mejora las capacidades oxidativas del ozono a través de catalizadores que promueven su descomposición y la generación de especies radicales oxidantes, los cuales reaccionan con prácticamente cualquier compuesto presente en los efluentes (Ospina y Martínez, 2022).

Fotocatálisis heterogénea. La fotocatálisis heterogénea es una tecnología avanzada de oxidación que permite la degradación y la mineralización de gran variedad de compuestos orgánicos. El proceso se basa en la excitación de un fotocatalizador sólido, normalmente semiconductor de banda ancha, sumergido en una solución, el cual, mediante la absorción de energía radiante (visible o UV), origina reacciones simultáneas de oxidación y reducción en diferentes zonas de la región interfacial; además el catalizador más utilizado es la forma cristalina anatasa del dióxido de titanio (TiO₂), ya que por ser económico, inerte y resistente a la fotocorrosión ampliamente utilizado para reacciones fotocatalíticas (Castaño, 2020).

Procesos Heterogéneos

En específico las reacciones Fenton y fotoFenton (FF) comprenden un conjunto de reacciones donde se remueven los contaminantes en el agua, mediante la acción catalítica del hierro, de un agente oxidante y la radiación ultravioleta (UV) para el proceso FF. Estas reacciones involucran la generación de radicales OH[•], que tienen la capacidad de mineralizar una serie de compuestos contaminantes de manera no selectiva. Los catalizadores empleados con mayor frecuencia en los procesos de oxidación avanzada de tipo fotoquímica como el fotoFenton son las sales y óxidos de hierro, promoviendo una reacción de óxido-reducción que genera una alta actividad catalítica ya que posee una buena superficie específica (Centeno y Jiménez, 2018).

Procesos Heterogéneos con Energía. Electro-Fenton, se puede englobar dentro de los procesos de oxidación avanzada electroquímicos (EAOP). Este proceso se basa en la reacción Fenton junto con dos electrodos (un cátodo y un ánodo), que generan los iones necesarios para la degradación del compuesto orgánico a eliminar, es decir, los contaminantes se mineralizan mediante reacciones de transferencia directa de electrones o por la acción de especies radicales (radicales hidroxilos, mayormente) formadas en la superficie del electrodo (Pelayo, 2018).

Procesos Heterogéneos sin Energía. Proceso con Peróxido de Hidrogeno, es un agente oxidante de gran poder, pero a la vez versátil, seguro y efectivo, en cierta forma es uno de los que mayormente se usan para tratamiento de aguas, ya que no genera compuestos clorados, ni precipitados, y su descomposición da como resultado agua y oxígeno (Huchani, 2023).

3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Ramos, K. en el 2008 realizó experimentaciones para tratar aguas con metales pesados demostrando que existen alternativas tecnológicas que permiten la depuración de los mismos, tal como la precipitación química y el intercambio iónico y que al menos, a nivel de laboratorio, son factibles.

Por otro lado, Escudero et al. (2010) menciona que es posible la limpieza de efluentes contaminados con los metales pesados cobre, plomo y níquel mediante la precipitación de especies modificando solamente el valor de pH del medio.

Sin embargo, Mercado-Martínez et al. (2017) demostró que la electrocoagulación es un tratamiento capaz de retirar el contenido de níquel presente en las aguas residuales industriales no domésticas del sector automotriz obteniendo resultados superiores a los anteriores autores.

Por otro lado, Piña-Soberanis y colaboradores en el 2011 recomendaron que en futuras investigaciones se definan, además de los contaminantes que se pretenden remover, de manera clara y completa el control de variables de operación de mayor relevancia en los procesos electroquímicos, como son el voltaje, la densidad de corriente, el material de los electrodos, la distancia entre los electrodos, el tipo de conexión entre éstos, su tamaño y área activa, así también se deben establecer las características fisicoquímicas del electrolito como son el pH, la conductividad y la temperatura, ya que actualmente en la presente investigación esta fue una de las barreras primordiales, ya que muchas de las experimentaciones no aborda a profundidad, por lo que, esto traería complicaciones para realizar a nivel laboratorio o escalamientos corridas experimentales.

4. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (COVEICyDET) por el financiamiento de este proyecto con registro CP 1011 2110/2023 y a los estudiantes Carlos Posadas Cano y Ana Concepción Ramos Martínez del ITS Martínez de la Torre.

REFERENCIAS

- [1] Angel-Ospina, A. C. y Machuca-Martínez, F. (2022). Ozonización catalítica en el tratamiento de contaminantes de preocupación emergente en aguas residuales: un análisis bibliométrico. Scielo. Revista de Ingeniería y Competitividad, 24(1). <https://n9.cl/dj8sp>
- [2] Cabrera-Marutz, C. D., Velásquez-Alcalá, S., Vrhovac-Biljesko, J. (2014). Enfermedades profesionales en la industria: extracción, manufactura y reciclaje. Scielo. Medicina y seguridad del trabajo, 60(237), 756-778. <https://n9.cl/hxa35>
- [3] Castaño, L. I. (2020). Revisión sistemática del proceso de degradación de contaminantes orgánicos persistentes en aguas residuales, provenientes de la industria farmacéutica por fotocatalisis heterogénea [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://n9.cl/nfqae8>
- [4] Centeno-Bordones, G. y Jiménez, Y. (2018). Uso de Lodos Rojos como catalizador en los procesos de oxidación avanzada: una aproximación al estado del arte. Tekhné. Revista de la Facultad de Ingeniería, 21(4), 026-040. <https://n9.cl/9ra34>
- [5] Cortés-González, V. H. (2018). Eliminación de contaminantes emergentes de aguas residuales hospitalarias mediante procesos de oxidación avanzada [Tesis de Ingeniería, Universidad Estatal Amazónica]. <https://n9.cl/ftxzv>
- [6] Cueva-Nazario, A. (2022). Eficiencia del proceso de electrodiálisis en la eliminación de plomo en aguas del río Torres [Tesis de Ingeniería, Universidad de Huánuco]. <https://n9.cl/9p8wl>
- [7] Escudero, R., Tavera, F. J. y Chávez, J. A. (2010). Precipitación de especies de plomo, cobre y níquel en efluentes contaminados. IBEROMET XI.
- [8] Flores, Carmen M., Del-Angel, Ebelia, Frías, Dora M., & Gómez, Ana L. (2018). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. Tecnología y ciencias del agua, 9(2), 39-57. <https://n9.cl/rfrzl>
- [9] Huchani-Laura, L. (2023). Diseño y simulación del proceso de tratamiento de aguas residuales provenientes de industria textil, utilizando el método de oxidación avanzada, ozono/peróxido de hidrogeno/uv [Tesis de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés]. <https://n9.cl/h9vuo>
- [10] López-Ramírez, M. A., Castellanos-Onorio, O. P., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. R., Montoya-Mendoza, J., Sosa-Villalobos, C. A., Ortiz-Muñiz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. Scielo. Enfoque UTE, 12(4), 76-87. <https://n9.cl/cch1z>
- [11] Macías-Socha, C., García-Colmenares, M., Chaparro, P. (2017). Determinación electroquímica de plomo y cadmio en aguas superficiales. Scielo. Luna Azul, 44, 27-38. <https://n9.cl/y2m2c>
- [12] Mercado-Martínez, I., Toro-Gómez, M. y Aragon-Ruiz, A. Tratabilidad por electrocoagulación de las aguas residuales no domésticas de la

- industria automotriz. Memorias III Seminario Internacional de Ciencias Ambientales SUE-Caribe, 71-73.
- [13] Muñiz-Ugarte, O., Rodríguez-Alfaro, M., Montero-Álvarez, A., Estévez-Álvarez, J., Aguiar-Accioly, A. M., Araujo-Nascimento, W. (2015). El níquel en suelos y plantas de Cuba. Redaly. Revista Cultivos Tropicales, 36, 25-33. <https://n9.cl/jwp6z>
- [14] Naula-González, L. A. y Zúñiga-Delgado, P. A. (2021). Remoción de metales pesados (cromo, zinc, aluminio, arsénico, níquel y cobre) en aguas industriales utilizando algas coimmobilizadas con alginato de sodio [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca Ecuador]. <https://n9.cl/1caot>
- [15] Olivares-Arias, V., Valverde-Som, L., Quiros Rodríguez, V., García-Romero, R., Muñoz, M., Navarro-Alarcón, M., Cabrera-Vique, C. (2015). Níquel en alimentos y factores influyentes en sus niveles, ingesta, biodisponibilidad y toxicidad: una revisión. Cyta. Journal of Food, 13(1), 87-101. <https://n9.cl/mri7v>
- [16] Pabón, SE, Benítez, R., Sarria, RA, & Gallo, JA. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. Entre Ciencia e Ingeniería, 14 (27), 9-18. <https://n9.cl/asyb4>
- [17] Pelayo-Torices, D. (2018). Procesos de oxidación avanzada: avances recientes y tendencias futuras [Tesis de Ingeniería, Universidad de Cantabria]. <https://n9.cl/o3jox>
- [18] Pernía, B., Mero, M., Cornejo, X., Ramírez, N., Ramírez, L., Bravo, K., López, D., Muñoz, J., Zambrano, J. (2018). Determinación de Cadmio y Plomo en agua, sedimento y organismos bioindicadores en el Estero Salado, Ecuador. Scielo. Enfoque UTE, 9(2), 89-105. <https://n9.cl/8ftzk>
- [19] Piña-Soberanis, M., Martín-Domínguez, A., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Guevara-Lara, A. y García-Espinoza, J. E. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. Revista Mexicana, 10(82), 257-271.
- [20] Ramos, K. (2008). Tratamiento de desechos líquidos tóxicos de una industria de recubrimiento metálico por precipitación e intercambio iónico. Avances en Química, 3(3), 87-93. <http://www.redalyc.org/html/933/93315408002/>
- [21] Soler-Viladrich, L. (2014). Estudio del proceso de biosorción del níquel de aguas residuales mediante residuos de raspo de uva [Archivo PDF]. <https://n9.cl/mtgao>
- [22] Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Dialnet. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, 16(2), 66-77. <https://n9.cl/zdoz>
- [23] Rodríguez-Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. Scielo. Medisan, 21(12), 3372-3385. <https://n9.cl/yjlp5>
- [24] Rodríguez-Peña, M. y Barrera-Díaz, C. E. (2020). Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [25] Rojas-Vargas, A., Ricardo-Riverón, A., Penedo-Medina, M., Ojeda-Arnaignac, E. (2020). Remoción de níquel por electrocoagulación del sistema Ni (II)-NH₃-CO₂-SO₂-H₂O con electrodos de aluminio. Scielo. Revista de Tecnología Química, 40(2), 393-412. <https://n9.cl/8zq4b>
- [26] Román-Razo, E. A., O'Farrill, P. M., Cambray, C., Herrera, A., Mendoza-Revilla, D. A., Aguirre, D. (2019). Dermatitis de contacto alérgica a cobalto y níquel en un trabajador de la industria metalúrgica. Scielo. Revista Alergia México, 66(3), 371-374. <https://n9.cl/cmvxz>
- [27] Rubio-Caviedes, D. I., Muñoz-Calderón, R. A., Perdomo-Gualtero, A., Rodríguez-Acosta, D., Sandoval-Rojas, I. J. (2015). Tratamiento para la remoción de metales pesados, comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Dialnet. Revista Ingeniería y Región, 13(1), 73-90. <https://n9.cl/l4tpe>
- [28] Sarria-Villa, R. A., Gallo-Corredor, J. A., Benítez-Benítez, R. (2020). Tecnologías para remover metales pesados presentes en aguas. Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. Journal de Ciencia e Ingeniería, 12(1), 94-109. <https://n9.cl/wksfx>
- [29] Tejada, C., Herrera, A., Ruiz, E. (2016). Utilización de biosorbentes para la remoción de níquel y plomo en sistemas binarios. Scielo. Revista Ciencia en Desarrollo, 7(1), 31-36. <https://n9.cl/bouqpm>
- [30] Tejada-Benítez, L., Tejada-Tovar, C., Marimón-Bolívar, W., Villabona-Ortiz, A. (2014). Estudio de modificación química y física de Biomasa para la adsorción de metales pesados en solución. Scielo. Luna azul, 39, 124-142. <https://n9.cl/a1dmm>

Correo de autor de correspondencia: miguel.lr@martineztorre.tecnm.mx