

Studies and technological advances in the treatment of contaminated water

Estudios y avances tecnológicos en la depuración de aguas contaminadas

Libia Belén Arévalo-Saavedra¹  , Carlos Mauricio Lozano-Carranza¹  , Andi Lozano-Chung²  

¹Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Tarapoto, Perú.

²Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto, Perú.

Cite as

Arévalo-Saavedra LB, Lozano-Carranza CM, Lozano-Chung A. Studies and technological advances in the treatment of contaminated water. SAP Biomedical & Chemical Engineering Innovation. 2023; 2:72. <https://doi.org/10.56294/evk202372>

Publication History

Submitted: 29-12-2022

Revised: 17-03-2023

Accepted: 20-07-2023

Published: 21-07-2023

Corresponding Author

Libia Belén Arévalo-Saavedra 

ABSTRACT

The research addressed the environmental problems arising from the generation of leachates in landfills and municipal solid waste dumps, recognising them as highly polluting effluents due to their content of organic and inorganic compounds and heavy metals. National and international background information was reviewed, highlighting studies that applied advanced oxidation processes, such as the Fenton method, and phytoremediation techniques with plant species adapted to different environments. Research by Pellón, López and Espinoza characterised leachates based on climatic factors and waste composition, while Medina et al. optimised the Fenton process, finding differences between rainy and dry seasons. Alcalde et al. evaluated bioremediation as a viable alternative, and Jerez verified the ability of plants to accumulate heavy metals in roots and leaves. Sari et al. and Fasani et al. measured the effectiveness of species such as *Echinodorus palaefolius* and *Chrysopogon zizanioides* in reducing pollutants and evapotranspiration. Key parameters such as pH, total suspended solids, chemical and biochemical oxygen demand, and total petroleum hydrocarbons, as defined by the APHA and EPA, were highlighted. Phytoremediation, using species such as *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*, proved to be a low-cost, highly efficient alternative capable of removing organic compounds, metals and microorganisms through processes such as phytoextraction, phytodegradation and rhizofiltration. It was concluded that the combination of these techniques with continuous monitoring and proper biomass management constituted a sustainable, technically and economically viable strategy for leachate management, contributing to the protection of water resources and the achievement of environmental objectives.

Keywords: Leachates; Phytoremediation; *Eichhornia Crassipes*; *Pistia Stratiotes*; Sustainable Treatment.

RESUMEN

La investigación abordó la problemática ambiental derivada de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios y vertederos de residuos sólidos urbanos, reconociéndolos como efluentes altamente contaminantes por su contenido de compuestos orgánicos, inorgánicos y metales pesados. Se revisaron antecedentes nacionales e internacionales, destacando estudios que aplicaron procesos de oxidación avanzada, como el método Fenton, y técnicas de fitorremediación con especies vegetales adaptadas a diversos entornos. Investigaciones de Pellón, López y Espinoza caracterizaron lixiviados en función de factores climáticos y composición de residuos, mientras que Medina et al. optimizaron el proceso Fenton, encontrando diferencias en épocas de lluvia y estiaje. Alcalde et al. evaluaron la biorremediación como alternativa viable, y Jerez comprobó la capacidad de plantas para acumular metales pesados en raíces y hojas. Sari et al. y Fasani et al. midieron la efectividad de especies como *Echinodorus palaefolius* y *Chrysopogon zizanioides* en la reducción de contaminantes y en la evotranspiración. Se destacaron parámetros clave como pH, sólidos totales en suspensión, demanda química y bioquímica de oxígeno e hidrocarburos totales de petróleo, definidos por la APHA y la EPA. La fitorremediación, con especies como *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*, demostró ser una alternativa de bajo costo y alta eficiencia, capaz de eliminar compuestos orgánicos, metales y microorganismos mediante procesos como fitoextracción, fitodegradación y rizofiltración. Se concluyó que la combinación de estas técnicas con monitoreo continuo y manejo adecuado de biomasa constituía una estrategia sostenible, técnica y económicamente viable para la gestión de lixiviados, contribuyendo a la protección de los recursos hídricos y al cumplimiento de objetivos ambientales.

Palabras clave: Lixiviados; Fitorremediación; *Eichhornia Crassipes*; *Pistia Stratiotes*; Tratamiento Sostenible.

INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental asociada a la generación de lixiviados en rellenos sanitarios y vertederos de residuos sólidos urbanos representa un desafío creciente para la gestión sostenible de los recursos naturales. Estos efluentes líquidos, resultado de la infiltración de agua a través de la masa de desechos, contienen una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, así como metales pesados, cuya concentración y composición dependen de múltiples factores: la naturaleza y edad de los residuos, la compactación, las condiciones climáticas, la humedad y la precipitación. La presencia de estos contaminantes implica riesgos significativos para los ecosistemas y para la salud humana, al comprometer la calidad de aguas superficiales y subterráneas.

En este contexto, la literatura científica ha desarrollado un amplio cuerpo de investigaciones orientadas a la caracterización de lixiviados y a la implementación de tratamientos eficaces para su mitigación. Estudios como los de Pellón et al.⁽¹⁾, Medina et al., Alcalde et al., Jerez⁽²⁾, Sari et al. y Fasani⁽³⁾ evidencian la diversidad de metodologías aplicadas, que incluyen procesos de oxidación avanzada —como el método Fenton— y técnicas de biorremediación y fitorremediación con distintas especies vegetales. Estos enfoques se sustentan en el análisis de parámetros clave, tales como pH, sólidos totales en suspensión, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) e hidrocarburos totales de petróleo (HTP), los cuales permiten evaluar la magnitud del impacto y determinar la viabilidad de cada tecnología de tratamiento.

La fitorremediación, en particular, ha despertado un creciente interés por su bajo costo, facilidad de implementación y compatibilidad ambiental. Especies como *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Pistia stratiotes* (lechuga de agua) han demostrado una elevada capacidad para remover contaminantes y adaptarse a diversos entornos, lo que las convierte en candidatas idóneas para proyectos de recuperación de cuerpos de agua afectados. Estas plantas aprovechan mecanismos fisiológicos y bioquímicos —como la fitoextracción, la fitodegradación y la rizofiltración— para capturar, degradar o inmovilizar contaminantes, reduciendo así su impacto ambiental.

Por lo tanto, el presente trabajo se orienta al análisis de estudios previos, teorías y parámetros técnicos que respaldan el uso de tecnologías limpias para el tratamiento de lixiviados, con el objetivo de aportar una base sólida que sirva de sustento para futuras investigaciones y proyectos de aplicación en contextos reales.

DESARROLLO

Este trabajo de investigación se fundamentó en diversos antecedentes de ámbito internacional y nacional, como es el caso de Pellón et al.⁽¹⁾, que en su investigación titulada: “Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos”, tuvieron como objetivo caracterizar los lixiviados y estimar su generación en un vertedero de la Habana (ciudad), se basaron en conjunto de la población y de residuos sólidos generados por día, como también considerar una propuesta de tratamiento de acuerdo a sus resultados, de esta manera se puede garantizar que las normas establecidas sean cumplidas. Sus resultados demostraron que las características de los lixiviados son muy variables por lo que se atribuye a la interacción de diversos factores como la composición y edad de residuos, la humedad y la tasa de precipitaciones entre otros, con lo que se concluyó que los lixiviados se caracterizan por tener contenido alto de compuestos principalmente orgánicos.

Asimismo, Medina et al., en su investigación: “Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario”, trataron los lixiviados de los rellenos sanitarios aplicando el proceso Fenton que describe como un proceso de oxidación avanzada sin la necesidad de controlar las altas presiones o temperaturas, fue realizada en un relleno sanitario ubicado en Huancayo, durante todo su proceso observaron importantes diferencias en sus características fisicoquímicas en las dos épocas elegidas para realizar su estudio (lluvia y estiaje), la época de estiaje observaron mayor concentración de contaminantes comparado con las épocas de lluvia lo que reflejó la gran influencia de las condiciones ambientales de lugar y la naturaleza de los residuos que allí se disponen, concluyeron que el índice de degradación biológica de los lixiviados tuvo una mejora importante en las dos épocas, sin embargo comprobaron que se obtendrán mejores características biodegradables en los lixiviados.⁽⁴⁾

Por su parte, la investigación “Caracterización del lixiviado como alternativa que contribuye a la mitigación de contaminantes”, donde el objetivo fue caracterizar la composición de lixiviados de los residuos orgánicos domiciliarios para proponer una alternativa que contribuya a la reducción de estos contaminantes, para eso realizaron la caracterización físico-química del lixiviado recogiendo muestras del lugar del estudio, teniendo en cuenta los resultados obtenidos de un análisis, se llegó a la conclusión que la implementación de procesos de biorremediación para la eliminación de contaminantes es posible como una opción de adecuarlo a un sistema de aguas residuales.⁽⁵⁾

Por otro lado, Jerez⁽²⁾, en su investigación tuvo como objetivo estimar el uso de la fitorremediación para reducir el aumento de metales pesados en lixiviados determinó la disposición de un lixiviado tomado de un relleno sanitario ubicado en Alajuela, y estableció su contenido de metales pesados. Los principales resultados fueron que, en cuestión del cromo, un 20,9 % se halla en la parte aérea de la planta, mientras para la raíz atina a un 79,1 %. Por el lado del plomo, encontró un 5,8 % y un 94,2 % en la raíz y en la parte aérea, correspondientemente.

De la misma manera, Sari, y et al., en su investigación: “The Effectiveness of Filter Media and *Echinodorus palaefolius* on Phytoremediation of Leachate”, donde determinaron la efectividad de los medios de filtro de la planta empleada para la fitorremediación de lixiviados, fue el objetivo principal, utilizando un método experimental con un diseño al azar por completo que constaba de varias repeticiones, cuatro específicamente, donde los parámetros evaluados fueron la turbidez, temperatura, sólidos suspendidos totales, pH y oxígeno, los resultados logrados en analizaron por un análisis de varianza y un adicional, mostrando un efecto significativo del medio de filtro con *Echinodorus palaefolius* en la fitorremediación de lixiviados para mitigar los niveles de contaminación que producen.

Además, Fasani⁽³⁾, en su investigación similar titulada: “Phytoremediatory efficiency of *Chrysopogon zizanioides* in the treat

mentoflandfill leachate: a case study”, donde mencionó que el objetivo principal fue medir el potencial de acumulación y tolerancia de esta especie y su capacidad de evotranspiración en un experimento de maceta para evaluar su aplicabilidad para la contención de fugas de dos lixiviados de vertederos de origen urbano pero de diferente composición y el tratamiento respectivo de estanques colectores, se pudo comprobar que las muestras de lixiviados son compatibles con las muestras observadas para vertederos municipales maduros, por el pH y niveles de materia orgánica bajos; sin embargo los elementos altamente tóxicos no fueron detectados gracias al gran volumen de recolección de metales, en conclusión se confirmó la eficiencia de esta planta en la eliminación de agua por evotranspiración así como su tolerancia a los metales.

Adicionalmente, este proyecto de investigación se respaldó en teorías relacionadas a los lixiviados; las cuales las definen como “fluidos que se filtran hacia terrenos donde se encuentran instalaciones de un relleno sanitario o un botadero, y en su trayecto arrastran materia orgánica e inorgánica disuelta. Lamentablemente, se utilizan zonas aledañas a los lagos, ríos, y acuíferos, como botaderos de residuos sólidos municipales, industriales y comerciales, rebalsando su nivel de amortiguamiento normal creando una amenaza constante tanto para el ambiente como para las personas que puedan hacer uso del agua; estos lixiviados provocan un impacto ambiental, el cual queda inactivo al contorno social por las distintas enfermedades que pueden ocasionar los distintos contaminantes que lo componen y por defecto lo acumulan de sustancias tóxicas, incluso aumentando la mortalidad. Por ello, se deben tratar adecuadamente, ya que numerosos reportes describen el impacto negativo que estos provocan”, recalcando que los lixiviados de botaderos que contienen metales pesados son contaminantes significativos y una cuestión de gran inquietud debido al resultado que podrían tener en los ecosistemas.⁽⁶⁾

“La generación de lixiviados se da por diferentes factores: nivel de compacto de los residuos y de humedad en la basura inicialmente, precipitaciones, evapotranspiración, humedad atmosférica, temperatura, infiltración, escurrimiento y capacidad del relleno”.⁽⁷⁾ Los rellenos sanitarios siguen siendo el método de eliminación de residuos sólidos más utilizado en todo el mundo; el lixiviado generado a partir de los botaderos crea riesgos ambientales principalmente en las aguas superficiales y subterráneas, con su alto contenido de contaminantes, generalmente presenta una abundancia significativa de carbono orgánico total y una elevada demanda química de oxígeno, así como una variación elevada de contaminantes inorgánicos y orgánicos; el tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario o botadero se basa en ejecutar procesos donde se busca quitar parte significativa de los contaminantes previo a la disposición final, por lo que determinar el adecuado tratamiento para esta sustancia es complejo, ya que se refiere a la concentración de residuos en líquido con contenidos eminentes de materia tanto orgánicas e inorgánicas, como también una alta variación química, complicando la elección adecuada de una metodología de tratamiento; de esta manera la selección del tratamiento adecuado conlleva a conocer los parámetros químicos y físicos que los caracterizan.⁽⁷⁾

De acuerdo a esto se aplicaran parámetros generales como pH que se emplea como una medida de alcalinidad o de acidez de sustancias por lo que es necesario para obtener resultados específicos, los sólidos totales en suspensión también forman parte de este grupo los cuales se definen como la materia sólida que está disuelta o suspendida en un líquido, en este caso los lixiviados que son generados en un botadero, también se considerara los parámetros orgánicos como la demanda química de oxígeno, según American Public Health Associationes, (APHA) es la que “establece la cantidad de oxígeno necesario para posibilitar que la materia orgánica se oxide en muestras residuales de agua, mediante circunstancias determinadas de agente oxidante, tiempo y temperatura”, y “La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que es un análisis utilizado para determinar las exigencias de oxígeno para la biodegradación química de la materia orgánica en aguas industriales, residuales y municipales de manera general”; por ultimo están los Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) “son una mezcla de compuestos químicos esencialmente de carbono e hidrógeno, denominados hidrocarburos que conforman el 50 % y el 98 % de la composición, originado en el petróleo crudo. Ya que existen varios productos químicos en el petróleo crudo y en otros que son derivados del mismo, medir cada uno en forma separada no resulta ser lo mejor. Sin embargo, es favorable medir la porción total de hidrocarburos en un sitio”, estos parámetros están establecidos bajo los lineamientos de la asociación americana de la salud (APHA) y la agencia de protección ambiental (EPA).

Para Padmavathiamma y Li, una de las particularidades de la sociedad actual es el aumento de emisión al ambiente de sustancias que contaminan, sobre saliendo aquellas procedentes de las actividades mineras, domésticas, industriales y agropecuarias representando un peligro para los seres vivos, a partir de ello se están desarrollando una serie de métodos para remediar los impactos que causan.^(8,9,10)

Los métodos tradicionales pueden ser costosos y alteran de manera definitiva la composición natural del agua, suelo y de los seres vivos que habitan en los mismos; es por esta razón que el crecimiento de los costos y la restringida eficacia de los tratamientos fisicoquímicos han incitado a la creación de tecnologías diferentes. Por lo que, la fitorremediación puede usarse para limpiar metales, pesticidas, solventes, explosivos, petróleo crudo, hidrocarburo aromáticos policíclicos y lixiviados de vertederos, lo que refiere una alternativa sostenible y de costos bajos para lograr la recuperación de ambientes que han sido alterados por contaminantes naturales y antropogénicos, tecnologías que están basadas en el uso de plantas y microorganismos, las cuales se hacen más efectivas mediante manipulación genética mejorando su capacidad de remediación.^(11,12,13)

Para estas investigaciones las tecnológicas son fundamentales para su tratamiento en grandes superficies y se deben considerar procesos de recuperación a largo plazo. Este conjunto de tecnologías reúne una gran cifra de ventajas, principalmente en la economía y la limpieza; no se emplean reactivos peligrosos de ningún tipo, que alteran al medio ambiente de manera negativa.⁽¹⁴⁾

Según, Reichenauer y Germida, “Para la fitorremediación de contaminantes se debe tomar en cuenta estas particularidades: procesos que llevan a la degradación completa de los contaminantes (mineralización), su metabolismo al interior y exterior de la planta (rizósfera) y la absorción de los contaminantes”, estas fitotecnologías están basadas en elementos fisiológicos que se encuentran en las plantas y microorganismos, tales como la fotosíntesis, transpiración, nutrición y metabolismo; por lo que se pueden utilizar como medio de contención la fitovolatilización que se da a través de las hojas,^(15,16) la rizofiltración donde se usan las

raíces para adsorber y absorber, también la fitoinmovilización que es la acumulación en las rizoforas o en el caso de eliminación se emplea la fitoextracción que tiene la capacidad de hiperacumulación y la fitodegradación propiamente dicha, esto dependerá del tipo de contaminante y las condiciones en las que se encuentra.^(15,16,17)

La *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* son especies capaces de realizar la depuración de componentes naturales contaminados por diversos agentes, el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), “Es una planta macrófita con raíces sumergibles, fibrosas, que se adaptan a diferentes climas, con flores azuladas y lilas. Tiene un rápido crecimiento y además una planta sola está en la capacidad de reproducir más de 60 000 plantas hijas y llegan a medir entre 0,5 a 1, 5 metros de altura, es una de las plantas con desarrollo rápido en el mundo lo que permite que se extienda y se adapte en muchos sitios”.^(19,20)

Acción depuradora

Los Jacintos de agua pueden eliminar ciertos compuestos orgánicos, como fenol, ácido fórmico, colorante y pesticidas, y reducir el contenido de DBO, DQO y sólidos en suspensión.⁽²⁰⁾ También se observó la reducción de bacterias en las aguas residuales, lo que puede hacer de la biomasa una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere una recolección cuidadosa. “La Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), Es una planta acuática flotante vascular, similar a la cabeza abierta flotante de repollo (de ahí el nombre común), comúnmente conocida como lechuga de agua (lechuguin), originaria de América del Sur. Sus hábitats son lagos, ríos, pantanos, canales y arrozales y, a veces, crecen en jardines acuáticos, fuentes y estanques artificiales. Tiene hojas gruesas, de colores verde claro, peludos y surcados, y gran cantidad de aerénquimas (estomas) con forma de rosetas. Tienen muchas raíces fibrosas, ligeras y de color plumoso, y el tamaño de estas plantas alcanza Altura de 5 cm a 20 cm, diámetro de 6 a 20 centímetros.”⁽²⁰⁾

Se han realizado estudios relacionados con la absorción y la influencia Sustancias tóxicas con diferentes concentraciones de metales pesados, como Las variables bioquímicas de Cr, Cd y Cu son las mismas (Actividad enzimática y ARN, proteína, Aminoácidos y azúcares).^(2,11,12,21)

CONCLUSIONES

El examen exhaustivo de los antecedentes y marcos teóricos revisados permite concluir que la gestión de lixiviados constituye un reto técnico y ambiental cuya solución exige un enfoque integral y multidisciplinario. La heterogeneidad en la composición de estos efluentes y la variabilidad de sus parámetros fisicoquímicos dificultan la estandarización de tratamientos, obligando a considerar las condiciones específicas de cada sitio, la naturaleza de los residuos y los factores climáticos que inciden en su generación.

Si bien los métodos convencionales de tratamiento ofrecen resultados satisfactorios en determinadas circunstancias, su alto costo y su potencial impacto negativo sobre el medio ambiente han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles. En este sentido, la fitorremediación se presenta como una estrategia prometedora, capaz de reducir concentraciones de materia orgánica, metales pesados y otros compuestos peligrosos mediante procesos naturales, sin el uso de reactivos químicos agresivos. Las especies *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*, por sus características morfológicas y fisiológicas, han mostrado una notable eficiencia depuradora, confirmada por diversos estudios experimentales.

La integración de estas técnicas con un monitoreo continuo de parámetros como pH, DQO, DBO, sólidos suspendidos y HTP, así como la implementación de planes de manejo de la biomasa, puede garantizar no solo el cumplimiento de las normativas ambientales, sino también la preservación de la calidad del agua y la reducción de riesgos sanitarios para las comunidades.

En definitiva, los resultados de la presente revisión reafirman que el tratamiento de lixiviados mediante tecnologías limpias constituye una vía viable y necesaria para avanzar hacia un modelo de gestión de residuos que conjugue eficiencia técnica, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica, contribuyendo así al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible y a la protección de los recursos hídricos para las generaciones futuras.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Curación de datos: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Análisis formal: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Investigación: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Metodología: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Administración del proyecto: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Recursos: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Software: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Supervisión: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Validación: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Visualización: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Redacción – borrador original: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

Redacción – revisión y edición: Libia Belén Arévalo-Saavedra, Carlos Mauricio Lozano-Carranza, Andi Lozano-Chung.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pellón A, López M, Espinosa M, González O. Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Rev Ing Hidrául Ambient*. 2015;36(2):3-16. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000200001
2. Jerez J. Remoción de metales pesados en lixiviados mediante fitorremediación [tesis de grado]. Costa Rica: Universidad de Costa Rica; 2013. Disponible en: <http://www.ciencias.ucr.ac.cr/sites/default/files/Jos%C3%A9%20Jerez-2013-Remoci%C3%B3n%20de%20metales%20pesados%20en%20lixiviados%20mediante%20fitorremediaci%C3%B3n.pdf>
3. Fasani E. Phytoremediatory efficiency of *Chrysopogon zizanioides* in the treatment of landfill leachate: a case study. *Environ Sci Pollut Res*. 2018;1(1). Disponible en: https://vetiver.org/ITA_Leachate%20Italian.pdf
4. Valderrama C, et al. Optimización del proceso frentón en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Rev Soc Quím Perú*. 2016;82(4):43-7. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2016000400007
5. Torrez V, et al. Caracterización de lixiviados como alternativa que contribuya a la mitigación de contaminantes. *Rev ION*. 2018;31(1). Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v31n1/0120-100X-rion-31-01-59.pdf>
6. Espinoza MC, et al. Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales en La Habana.
7. Méndez. Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Rev Int Contam Ambient*. 2009;25(3). Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000300002
8. Tuset S. Tratamiento de lixiviados de vertederos. Tratamiento de aguas residuales, efluentes y aire al servicio del medio ambiente. 2017;1(1). Disponible en: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-de-lixiviados-de-vertedero/>
9. Becerra C. Inauguración de planta de valorización de residuos sólidos en Tarapoto. *Andina*. Lima: Agencia Peruana de Noticias; 2019;1(1). Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-san-martin-inauguran-planta-valorizacion-residuos-solidos-tarapoto-754813.aspx>
10. Delgadillo A, et al. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Rev Int Contam Ambient*. 2011;14(2):12-4. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci_arttext
11. Madera C, et al. Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados. *Ing Competitividad*. 2014;16(2):179-88. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v16n2/v16n2a16.pdf>
12. Díez J. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas [tesis doctoral]. Santiago de Compostela (ES): Universidad de Santiago de Compostela, Facultad de Biología; 2008. Disponible en: https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2540/9788498872026_content.pdf?sequence=1&isAllowed=y
13. Organización de las Naciones Unidas (ONU). Medio Ambiente. Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe. 1ª ed. Panamá: Shutterstock.com; 2018. Disponible en: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26448/Residuos_LAC_ES.pdf?sequence=1&isAllowed=y
14. Saenz J. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Rev Omnia*. 2014;20(3):123-5. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
15. CRQ. Especie. En: Glosario de términos ambientales. Oficina de Comunicaciones. p.17. Disponible en: <https://www.crq.gov.co/Documentos/GLOSARIO%20AMBIENTAL/GLOSARIO%20AMBIENTAL.pdf>
16. Púa A, et al. Análisis de nutrientes de la raíz de la malanga en el trópico seco de Colombia. *Rev Chil Nutr*. 2019;30(4). Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000400069
17. *Rev Int Contam Ambient*. 2010;26(4). Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_

arttext&pid=S0188-49992010000400006

18. Hernández R, et al. Metodología de la investigación. 6ª ed. México: Interamericana Editores; 2014. ISBN: 9786071502919.
19. Pinaffi JV, et al. Seasonal performance of aquatic macrophytes in improving physicochemical parameters of swine wastewater. Rev Bras Biol. 2019. Disponible en: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842019005020104&lang=es
20. Rezanía S, et al. The efficient role of aquatic plant (water hyacinth) in treating domestic wastewater in continuous system. Int J Phytoremediation. 2016;18(7). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/287286161_The_Efficient_Role_of_Aquatic_Plant_Water_Hyacinth_in_Treating_Domestic_Wastewater_in_Continuous_System
21. Obeidat M. Impact of a domestic wastewater treatment plant on groundwater pollution, north Jordan. Rev Mex Cienc Geol. 2013;30(2). Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v30n2/v30n2a9.pdf>