

Edición especial 25 años del doctorado en ingeniería

Una revisión sobre el tratamiento para lixiviados de rellenos sanitarios mediante el acople de procesos avanzados de oxidación y biológicos

A review on the treatment of landfill leachate by coupling advanced oxidation and biological processes

Dorance Becerra-Moreno^{1,2}, Yrany M. Rubio-Gomez¹, Andrés F. Barajas-Solano¹, Luisa F. Ramírez Ríos¹, Fiderman Machuca-Martínez²

¹ Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Norte de Santander, Colombia

² Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, Cali, Colombia

Cómo citar: Becerra-Moreno, D., Rubio-Gómez, Y.M., Barajas-Solano, A.F., Ramírez Ríos, L.F., Machuca-Martínez, F. Ingeniería y Competitividad. 25(4) ,e-30211626. doi: 10.25100/ijc.v25i4.11626

Resumen

El tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios requiere de procesos que permitan la remoción eficaz de los diferentes contaminantes presentes en este tipo de residuos líquidos. Para el tratamiento de este tipo de residuos se han empleado una gran diversidad de procesos biológicos, los cuales aprovechan la capacidad de transformar los diferentes componentes del medio líquido en biomasa, sin embargo, estos procesos poseen limitaciones debido a las características intrínsecas del lixiviado. En los últimos años se ha impulsado la integración de los procesos biológicos con los Procesos Avanzados de Oxidación, lo cual permitiría reducir significativamente las características tóxicas de estos residuos para así cumplir con las condiciones legales para ser vertidos al ambiente sin que se produzcan daños. En la presente revisión se investigan los trabajos recientes (2015 a 2021) referentes al tratamiento biológico y con procesos Avanzados de Oxidación (basados en ozono, procesos electroquímicos y fotocatalisis). Estos procesos se analizan en combinación, para describir las condiciones óptimas en las que se reducen las cargas contaminantes de los lixiviados de rellenos sanitarios. Finalmente es posible identificar que los procesos de tratamiento en estudio son tecnologías que pueden ser acopladas, registrando mayor eficacia y menor generación de subproductos de desecho o lodos.

Keywords: Electroquímico, Fotocatálisis, Lixiviado de rellenos sanitarios, Ozono, PAOs, Tratamiento biológico.

Abstract

The treatment of landfill leachate requires processes that efficiently remove the different contaminants present in this type of liquid waste. To treat this type of waste, a great diversity of biological processes has been used, which take advantage of the capacity to transform the different components of the liquid medium into biomass; however, these processes have limitations due to the intrinsic characteristics of the leachate. In recent years, the integration of biological processes with Advanced Oxidation Processes has been promoted, which would significantly reduce the toxic characteristics of these wastes to comply with the legal conditions to be discharged into the environment without causing damage. In this work, the authors present a review (2015 to 2021) concerning the biological treatment, and Advanced Oxidation Processes (based on ozone, electrochemical processes, and photocatalysis). These processes are analyzed in combination to describe the optimal conditions under which pollutant loads of landfill leachate are reduced. Finally, it is possible to identify that the treatment processes under study are technologies that can be coupled, registering higher efficiencies and lower generation of waste by-products or sludge.

Keywords: Electrochemical, Photocatalysis, landfill Leachate, Ozone, AOPs, Biological treatment.



Introducción

Los lixiviados son productos asociados a uno de los métodos de disposición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) utilizados ampliamente, como lo son los rellenos sanitarios o vertederos (1). En especial, los países en vía de desarrollo y subdesarrollados han implementado este método por su fácil operación y bajos costos relativos (2-3). Los lixiviados se generan en forma líquida de color oscuro y mal oliente (4-5-6), con alto contenido de componentes orgánicos, minerales y tóxicos. Estos líquidos complejos poseen características refractarias, altamente contaminantes para el ambiente (7-8).

La composición de los lixiviados está determinada de acuerdo con factores como la naturaleza de los residuos desechados, el clima, la frecuencia de lluvias y la edad del relleno sanitario (9). La generación de lixiviados ocurre cuando se infiltra la precipitación a través de las capas de residuos sólidos, permitiendo el transporte de los contaminantes solubles a la fase líquida, y donde a su vez, una serie de procesos químicos, físicos y biológicos, complejos ocurren simultáneamente (10). En la Figura 1 se presenta un esquema del proceso general de la generación de lixiviados en un relleno sanitario.

Los rellenos sanitarios deben estar equipados de un revestimiento que evite el paso de los lixiviados al suelo, de manera que sean conducidos y recolectados para someterse a un tratamiento adecuado. Las normas generalmente expedidas por entidades ambientales buscan proteger los recursos naturales, estableciendo límites permisibles para realizar descargas de los lixiviados tratados (4). La cantidad y características complejas de los lixiviados (contenidos de metales pesados, compuestos xenobióticos, compuestos biorefractarios, ácidos húmicos y fúlvicos) (11), representan un desafío, frente al cual se deben buscar alternativas de tratamiento que permitan el cumplimiento de las normativas y, por consiguiente, se proteja al ambiente y la población (12-13).

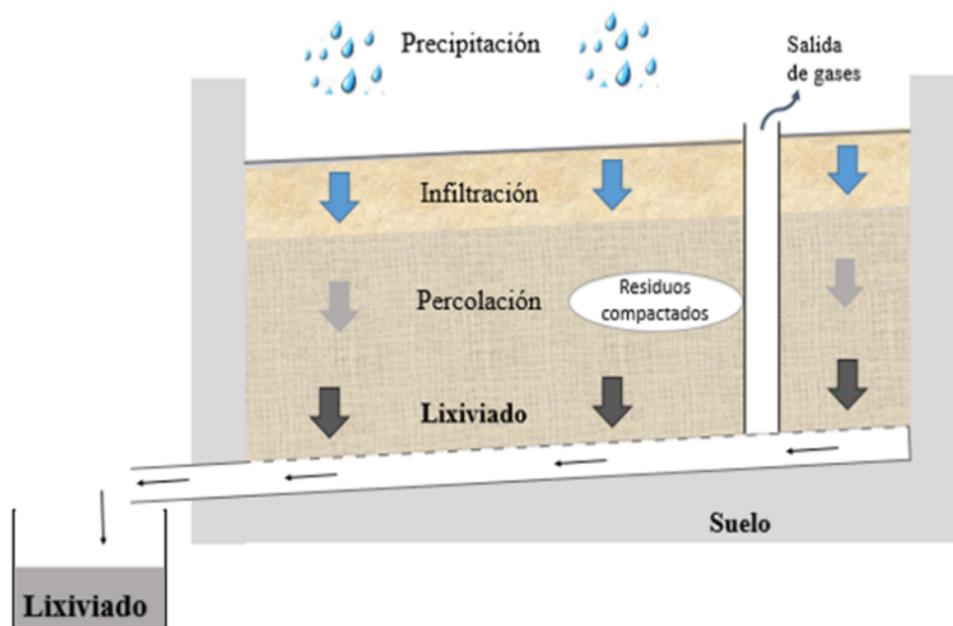


Figura 1. Generación de lixiviados en un relleno sanitario. Fuente: Autor.

Los rellenos sanitarios deben estar equipados de un revestimiento que evite el paso de los lixiviados al suelo, de manera que sean conducidos y recolectados para someterse a un tratamiento adecuado. Las normas generalmente expedidas por entidades ambientales buscan proteger los recursos naturales, estableciendo límites permisibles para realizar descargas de los lixiviados tratados (4). La cantidad y

características complejas de los lixiviados (contenidos de metales pesados, compuestos xenobióticos, compuestos biorefractarios, ácidos húmicos y fúlvicos) (11), representan un desafío, frente al cual se deben buscar alternativas de tratamiento que permitan el cumplimiento de las normativas y, por consiguiente, se proteja al ambiente y la población (12-13).

Entre los tratamientos principales para lixiviados generados en los rellenos sanitarios se encuentran, la recirculación y evaporación; coagulación-floculación; tratamientos biológicos aerobios, anaerobios y facultativos; tecnologías de membrana como microfiltración, ultrafiltración y osmosis inversa; y los Procesos Avanzados de Oxidación (14). Los rellenos sanitarios han implementado estos tratamientos de manera individual, o acoplados para conseguir la remoción de los contaminantes y aumentar la biodegradabilidad (7-15-16).

El tratamiento de lixiviados requiere ser un sistema eficiente, capaz de resistir la toxicidad del líquido y disminuirla (17). Entre los tratamientos más usados se encuentran los tratamientos biológicos (4), los cuales emplean reacciones asociadas a organismos vivos. Estos organismos crecen aprovechando los contaminantes del medio líquido como fuente de carbono o de energía (15). A pesar de que los tratamientos biológicos de lixiviados han presentado buenos resultados en cuanto a remoción de parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la mayoría de las veces no es suficiente para alcanzar los estándares permisibles que dictan las autoridades ambientales (14-17). Los procesos biológicos son susceptibles de fallar debido a que los organismos vivos empleados, pueden verse superados por la alta cantidad de componentes orgánicos refractarios y de otras sustancias nocivas (18).

Otro de los métodos de tratamiento de lixiviados que se han venido estudiando sistemáticamente en los últimos años, son los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs). Los PAOs logran degradar compuestos recalcitrantes que no son degradados fácilmente por otros tratamientos (19). También, estos tratamientos aumentan la biodegradabilidad de los lixiviados, permitiendo disminuir el potencial tóxico (20). Se ha considerado en numerosos estudios que los PAOs resultan más ventajosos cuando se usan en acople con otro tratamiento, comparado con el tratamiento único (1-7-13). Es así como los métodos de tratamiento PAOs se han estudiado en combinación con los tratamientos biológicos, obteniendo resultados prometedores en términos de remoción de parámetros fisicoquímicos (21).

Se han clasificado los PAOs en procesos electroquímicos, basados en ozono, fotoasistidos, y varios (oxidación por aire húmedo, ultrasonido, oxidación con persulfato y otros) (22). Los procesos electroquímicos se caracterizan por que eliminan el color y la DQO del lixiviado, así como por convertir los compuestos orgánicos en otros compuestos como CO_2 y H_2O (22-23). Los procesos basados en ozono han sido implementados por su capacidad para reducir la DQO, DBO, metales pesados, compuestos húmicos y fúlvicos (24). La mayor parte de los compuestos biodegradables pueden ser eliminados por los procesos fotoasistidos con tratamientos fotocatalíticos homogéneos y heterogéneos (25), los cuales son de especial interés por la posibilidad del aprovechamiento de la radiación solar en el tratamiento (22).

En este sentido, este trabajo presenta una revisión de los tratamientos de lixiviados producidos en rellenos sanitarios, particularmente del acople entre los tratamientos biológicos y los PAOs (procesos basados en ozono, proceso electroquímico, y tratamientos fotocatalíticos homogéneos y heterogéneos). Esto con el fin de evidenciar las ventajas, desventajas y condiciones de operación que se han obtenido mediante los trabajos de investigación sobre el tratamiento de lixiviados sometidos a los dos sistemas (PAOs y biológicos) como alternativas prometedoras para aumentar la eficacia en la remoción de la concentración de los contaminantes. Esta revisión es motivada por la necesidad de compilar información científica actualizada, que permita tener un panorama más detallado de la viabilidad de los tratamientos acoplados entre procesos biológicos y PAOs, con respecto a si se implementan de manera individual. También, se presentan algunas referencias para profundizar en el conocimiento del tema de estudio.

Se revisaron publicaciones entre los años 2015 y 2021 de revistas científicas de alto impacto. Una búsqueda en Scopus utilizando las palabras claves del tema de estudio (Biological treatment,

Electrochemical, Photocatalysis, landfill Leachate, Ozone, POAs, Treatment), arrojó que las revistas científicas que mayor cantidad de publicaciones registran, pertenecen al campo de las ciencias ambientales. Según esta revisión, las revistas con mayor número de publicaciones son Waste Management, Process Safety and Environmental Protection, Desalination and Water Treatment, Water Research, y Chemosphere.

Tratamiento biológico

El tratamiento biológico es ampliamente usado en la remoción de contaminantes líquidos como las aguas residuales y los lixiviados (13-17-26). Este tratamiento se caracteriza por remover altas cantidades de sustancias orgánicas. También, es un método conveniente de aplicar por su simplicidad y rentabilidad (14-27). Son dos los principales procesos que condicionan el tratamiento biológico de lixiviados, en términos de la disponibilidad de oxígeno. Uno es el tratamiento aerobio, en el cual los microorganismos utilizan los contaminantes orgánicos como alimento, es decir, degradan la materia orgánica y la convierten en dióxido de carbono (CO_2) y una importante cantidad de lodos (13). El tratamiento anaerobio es otro de los procesos dentro de los tratamientos biológicos. Los tratamientos en condiciones anaerobias degradan compuestos orgánicos para convertirlos en su mayoría, en sustancias gaseosas como el dióxido de carbono y el metano (CH_4) (14-28).

Los procesos aerobios eliminan contaminantes orgánicos biodegradables y producen la nitrificación del nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) (29). Por otra parte, en los procesos anaerobios suele presentarse una desventaja respecto a la baja reducción o incluso el aumento del $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. Sin embargo, los tratamientos en condiciones anaerobias tienen otras características que los hacen ventajosos frente a otros tratamientos, por mencionar algunas, la posibilidad de la captación y aprovechamiento del biogás CH_4 , la reducción de producción de lodos en comparación con los procesos aerobios, entre otros (30).

Los procesos de los tratamientos aerobios y anaerobios son esquematizados en la Figura 2, elaborada a partir del trabajo de Luo et al., 2020 (siglas de los nombres de los procesos en inglés).

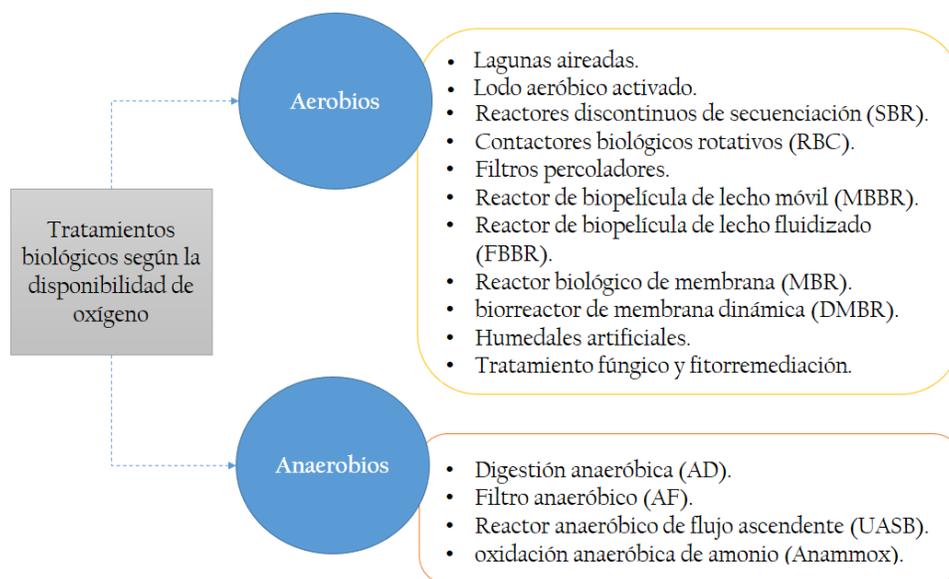


Figura 2. Procesos aerobios y anaerobios de los tratamientos biológicos. Fuente: Autor.

Se ha registrado en múltiples estudios científicos que los tratamientos biológicos son alternativas donde se obtienen buenos resultados de remoción de contaminantes en lixiviados jóvenes (<5 años) (3-21-31). Los lixiviados jóvenes contienen altas cantidades de contaminantes orgánicos biodegradables, con

baja masa molar y presentan un pH ácido (26-32). Mientras, los lixiviados de edad intermedia y maduros resultan menos favorables de tratar con procesos biológicos. Los lixiviados de rellenos sanitarios de edad intermedia (5-10 años) y los maduros (> 10 años), se caracterizan por presentar alto contenido de compuestos húmicos y fúlvicos, así como, menor biodegradabilidad en comparación con los rellenos sanitarios jóvenes (26-33). La descripción de las características de los lixiviados de rellenos sanitarios de acuerdo a la edad, se pueden consultar en el manuscrito de Peng (2017) (6).

Un tratamiento biológico realizado al lixiviado de un relleno sanitario joven mediante el proceso SBR, alcanzó una remoción de Nitrógeno Total (NT) del 99 %, DQO del 87 % y fosforo del 49 % (34). Otro estudio registró un tratamiento de lixiviados utilizando el proceso DMBR, donde se obtuvieron remociones de $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ y NT de 98 y 90 % respectivamente (35). No obstante, en el tratamiento biológico de lixiviados maduros, se ha determinado que a concentraciones de DQO > 2000 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ > 1000 mg/L y alcalinidad alta, representan líquidos de alta complejidad para someter a este tratamiento (4). También, los compuestos refractarios pueden inhibir el desarrollo de los microorganismos que descomponen los contaminantes (4-18).

En una investigación realizada para tratar un lixiviado maduro en un biorreactor continuo utilizando *Penicillium spp.* se presentaron remociones para los parámetros fisicoquímicos como DQO (52 %), Carbono Orgánico Disuelto (COD) (54 %), Carbono Total (CT) (60 %) y Carbono Orgánico Total (COT) (68 %) (36). Un tratamiento que se ha considerado recomendable para disminuir las concentraciones de NT y DQO es el Anammox (37-38). Se han alcanzado reducciones del 94 % de NT y del 62 % de DQO mediante el tratamiento de lixiviados con Anammox (39). Una mayor información acerca de los tratamientos biológicos y su eficacia según la edad del lixiviado, puede ser consultada en el trabajo de Kamaruddin et al. (2015). Además, las remociones de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en diferentes investigaciones sobre la aplicación de tratamientos biológicos, fueron recopiladas en el trabajo de Torretta et al. (2017).

Procesos Avanzados de Oxidación

Los PAOs son tratamientos que se han venido estudiando sistemáticamente en los últimos años. Éstos han sido catalogados como tratamientos prometedores debido a sus ventajas en la eliminación de contaminantes refractarios y por aumentar la biodegradabilidad (14-40-41). La formación de radicales libres u oxidantes como radicales hidroxilos ($-\text{OH}$), es la base del proceso de tratamiento de los PAOs. Otro proceso dentro del tratamiento es la reacción química de radicales producidos con compuestos orgánicos (19). Los oxidantes que se involucran en el tratamiento con los PAOs permiten aumentar el rendimiento para la remoción de contaminantes (42). Estos oxidantes tienen asociado un potencial de oxidación E° (V), los cuales se encuentran listados en trabajo de Kow et al. 2016, donde se observa que, el radical hidroxilo ($-\text{OH}$) tiene el mayor poder oxidativo (2.8 V).

Los PAOs para el tratamiento de lixiviados se dividen en cinco procesos (42), presentados en la Figura 3.



Figura 3. Procesos Avanzados de Oxidación para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Fuente: Autor.

La clasificación de los PAOs se subdivide de acuerdo al tipo de tratamiento. A los procesos basados en ozono pertenecen la ozonización, ozonización fotocatalítica, ozono/peróxido de hidrógeno, ozono/persulfato, fentozono y ozonización catalítica. Dentro de los procesos químicos se encuentran, el fenton, oxidación con persulfato y persulfato con calor. Los procesos electroquímicos pueden dividirse en oxidación electroquímica, electrocoagulación y electrofenton. En cuanto a los procesos fotoasistidos incluyen la fotocatalisis, fenton fotoasistido, persulfato/UV, Peoxono/UV, fotoelectroquímico y ozono/UV. Algunos métodos que aún se encuentran en desarrollo se clasifican como procesos varios, entre los más conocidos de este grupo, la oxidación con aire húmedo, cavitación hidrodinámica, ultrasonido y procesos asistidos con catálisis (42). En la Tabla 1 se presentan las ventajas y desventajas de acuerdo a cada PAOs.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los PAOs para el tratamiento de lixiviados.

PAOs	Ventajas	Desventajas
Procesos basados en ozono	<p>Reducen ampliamente la DQO y la DBO.</p> <p>Elimina color y olor.</p> <p>No aumenta la producción de contaminantes tóxicos.</p> <p>Baja producción de lodos.</p>	<p>Es favorable solo como tratamiento previo o posterior.</p> <p>Implican una transferencia de masa de ozono de gas a líquido que es muy baja.</p> <p>Se deben tomar medidas especiales con el manejo de ozono.</p>
Procesos Fotoasistidos	<p>Los procesos fotoasistidos mejoran los demás procesos PAOs en términos de reducción de contaminantes, aprovechando su función catalítica.</p>	<p>Alto consumo de energía, lo cual se ha estudiado para bajar estos costos con tecnologías más limpias.</p>
Procesos Electroquímicos	<p>Eficiente para la eliminación de contaminantes (concretamente orgánicos).</p> <p>El proceso se lleva a cabo a temperatura y presión ambiente y tiene una alta eficiencia de tratamiento.</p> <p>Cuando las reacciones tienen lugar en fase homogénea, entonces no hay limitaciones de transferencia de masa.</p>	<p>Uso intensivo de energía.</p> <p>Posible formación de compuestos orgánicos clorados.</p> <p>Si el lixiviado tiene un alto contenido de ácidos húmicos y fúlvicos, existe la posibilidad de que se formen trihalometanos que generen mal olor.</p>

Fuente: Adaptado de (42).

Los tratamientos PAOs han demostrado que son muy eficaces para remover aquellos contaminantes complejos de tratar con la mayoría de otros tratamientos en forma única (40). También son tratamientos avanzados, en tanto no generan cantidades excesivas de lodos (19). No obstante, los PAOs se atribuyen un alto valor en costos de tipo energético, insumos químicos, etc., e inconvenientes del control operativo en su implementación a gran escala (14). Una estimación de los costos del tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios con ozonización fue de 7.06 €/m³, el cual es mayor, comparado con el costo estimado para tratamiento biológico oxidativo de 4.0 €/m³ (43). Además, el control operativo de la dosificación para el manejo de los altos volúmenes de lixiviados generados en rellenos sanitarios, debe permitir ajustarse a las posibles fluctuaciones de caudales asegurando la mayor eficiencia (14-44).

Por consiguiente, los investigadores han estado encaminando sus estudios en el aprovechamiento de los POAs como pretratamiento o postratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios (7-16-45). Los tratamientos combinados han obtenido mayores eficiencias en términos de costos y disminución de las características contaminantes (46). Los tratamientos biológicos son los más comunes para ser acoplados con los PAOs (15). Los PAOs como pretratamiento mejoran las características de biodegradabilidad del líquido, lo cual favorece el posterior tratamiento con microorganismos, que acaban por eliminar la mayor parte de estos compuestos orgánicos (47), esto es favorable especialmente para tratar lixiviados maduros. Como postratamiento, los PAOs se encargan de pulir el tratamiento con la eliminación de la fracción recalcitrante y tóxica restante en el líquido, que no pudo ser removida por el tratamiento biológico anterior (7).

Tratamiento de acople con procesos basados en ozono y biológico

Los procesos basados en ozono generan radicales hidroxilos que le otorgan un alto poder oxidativo (40). En estos procesos se pueden obtener resultados mejorados de la generación de radicales $\cdot\text{OH}$ por medio de la adición de UV (47-48), Peróxido de hidrogeno (H_2O_2) (21-48), catalizadores (8-49), entre otros. El acoplamiento entre los procesos basados en ozono y los biológicos ha sido estudiado en su mayoría empleando un proceso basado en ozono como postratamiento, aprovechando las instalaciones comunes de tratamientos biológicos para lixiviados en los rellenos sanitarios (41-50).

Las vías de reacción del ozono (la formación / consumo de $\cdot\text{HO}$) están directamente influenciadas por el pH. El ozono tiene la capacidad de oxidar de manera eficiente la materia orgánica a un pH ligeramente alcalino, que es el pH típico de la mayoría de los lixiviados de vertederos (tratados biológicamente) (18). Operar la ozonización a pH alcalino favorece la producción de HO para acelerar la remoción de materia orgánica recalcitrante, según el proceso basado en ozono. En un tratamiento de lixiviados con procesos biológicos con lodos activados y ozonización, se obtuvieron remociones de 58 % de DQO y 35 % de COD en medio ácido, y un 30 % de DQO y 8 % de COD en medio alcalino (43). Algunos estudios han demostrado que en un tratamiento con oxígeno y peróxido de hidrogeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) puede degradar compuestos aromáticos a pH bajos (51). Se ha afirmado que la oxidación biológica funciona eficazmente como postratamiento para eliminar la fracción orgánica biodegradable resultante del $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ (52). También, el tratamiento con Fentozono ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$) en conjunto con un pretratamiento con MBR, ha resultado en remociones de 48.82 y 63.59 % de DQO y absorbentes UV254, respectivamente (53) en condiciones de operación de pH ácido (3 unidades).

Otros tratamientos como la ozonización fotocatalítica (O_3/UV) y el Ozono/Persulfato ($\text{O}_3/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) en acople con sistemas biológicos han demostrado que el pH básico tiene una relación óptima con los resultados de remoción. Por ejemplo, para el tratamiento con O_3/UV de lixiviados tratados previamente con varios procesos biológicos (lagunas aireadas, lodos activados y un proceso anaerobio), en condiciones de pH básico (9) se permitió aumentar la biodegradabilidad en hasta un 91 % (54). En otra investigación se optimizó el tratamiento de $\text{O}_3/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, cuyo afluente provenía de dos tratamientos biológicos previos, a pH de 9. Es así, los autores registraron reducción de la DQO, color y toxicidad, en hasta 85, 87 y 80 %, respectivamente, además de un aumento de 47 % de BOD_5/COD (55).

Las sustancias húmicas, incluidos el ácido húmico (HA) y el ácido fúlvico (FA), se eliminaron eficazmente junto con la descomposición de los hidrocarburos aromáticos y la disminución del grado de humificación durante el proceso de ozonización (56-57). La materia orgánica de alto peso molecular (PM) se transformó en un peso molecular bajo. La mayoría de los compuestos orgánicos de alto PM pasan como moléculas de bajo PM de 10 kDa a 1 kDa (56). En la Tabla 2 se presentan los registros de tratamientos combinados entre biológicos y los procesos basados en ozono.

Tabla 2. Tratamiento de lixiviados mediante procesos biológicos y basados en ozono.

Tipo de combinación de tratamiento	Condiciones óptimas de operación	Eficacia	Valor final del parámetro	Referencia
Biológico (eliminación de nitrógeno autótrofo) y Ozono	90 ± 5 g/m ³ de concentración de O ₃ , 5.4 g/h de suministro de O ₃ , 60 min de reacción, 6.0-7.0 de pH	26.8 % de DQO y 80.4 de NT	Aprox. un 300 mg/L de DQO, 0.01-0.06 de DBO ₅ /DQO	(20)
Proceso biológico, desinfección y Ozono/ Persulfato	0.79 g/h. de flujo másico de O ₃ , 4500 mg/L. de S ₂ O ₈ ²⁻ , 9.0 de pH., 210 min de reacción	Remoción con Ozono/ Persulfato: 85 % de DQO, 87 % de color, aumento del 0.47 % de BOD ₅ /COD, disminución de la toxicidad en 80 %	120 mg/L de DQO, 0.61 de DBO ₅ /DQO	(55)
Efluente estabilizado anaeróbicamente y Ozono catalizado con ZnSO₄	27 g/m ³ dosis de O ₃ , 1 g/6 g dosis de Zn, 4.0 de pH, 180 min de reacción	Remoción con ozono catalizado: 90 % de DQO, 99 % de color, 5 % de NH ₃ -N.		(58)
Humedal artificial y Ozonización catalítica con Zeolita	9 días de tratamiento biológico, planta Typha angustifolia, 1.5 g/L de Zeolita, 152 mg/L de Fe, pH de 8	97.76 % de DQO, cerca del 88 % de DBO	186 mg/L de DQO, 115.7 mg/L DBO, 8.1 de pH, 8.5 NTU de turbidez, 244 mg/L de sólidos totales disueltos, 0.618 de DBO ₅ /DQO	(59)

Fuente: Autor.

Tratamiento de acople con fotocátalisis y biológico

Durante las últimas décadas, la fotocátalisis de semiconductores ha atraído mucha atención debido a su excelente eficiencia para la purificación ambiental (1). Hasta ahora, se han ensayado más de 190 semiconductores como fotocatalizadores y uno de los más utilizados ha sido el TiO₂. Este semiconductor se destaca, pero a menudo no se considera una alternativa viable por sí sola (1-25). Los autores han puesto su interés en estos procesos, por el uso alternativo de energía solar como fuente de fotones junto con catalizadores de bajo costo (1-60). En la fotocátalisis es importante el tiempo de irradiación. El pH ácido y alcalino es favorable para la eliminación de contaminantes orgánicos y amoníaco respectivamente. La presencia de ciertos iones (tanto aniones como cationes) en el lixiviado del vertedero puede limitar la tasa de fotomineralización de contaminantes orgánicos (19).

Como se muestra en la Tabla 3, el pH 5 ha demostrado ser una condición óptima de tratamiento, en su mayoría posterior al tratamiento biológico, y se han obtenido valores que llegan a cumplir con la normatividad correspondiente (1). Adicionalmente, en la Tabla 3 se muestran las condiciones óptimas de tiempo radiación y energía, para cada caso, así como las eficiencias de remoción de los parámetros que caracterizan los lixiviados de rellenos sanitarios.

Tabla 3. Tratamiento de lixiviados mediante procesos biológicos y fotoasistidos.

Tipo de combinación de tratamiento	Condiciones óptimas de operación	Eficacia	Valor final del parámetro	Referencia
ARB y UV/TiO₂	1 g/ L de TiO ₂ ; pH 5, 120 minutos de reacción con UV, y energía de irradiación de 900 Kj/ kg	Remoción con ARB: 72.3 % de DQO, 82.1 % de NH ₄ -N, 92.4 de NT	92.16 mg/L de DQO	(7)
		Remoción con UV/ TiO ₂ : 82 % de DQO		
ARB y UV/S₂O₈²⁻	1.5 g/L de persulfato a pH 5, y energía de irradiación: 225 Kj/kg	Remoción con ARB: 72.3 % de DQO, 82.1 % de NH ₄ -N, 92.4 de NT	97.28 mg/L de DQO	
UV/TiO₂ y proceso aerobio	100 mg/L TiO ₂ , a un pH ácido de 3	Remoción con UV/ S ₂ O ₈ ²⁻ : 81 % de DQO, 68 % de DQO, 76 % de COD, 54.69 % de SSV	160 mg/L de DQO, pH de 7.0 y 7.3, 928 de SSV	(15)
Vertedero biológicamente estabilizado y UV/ H₂O₂	30 min de reacción, 8 de pH, 2.0 g H ₂ O ₂ /g DQO,	Remoción con UV/ H ₂ O ₂ : 6.9 % de DQO, 0.08 relación DBO/DQO	756 mg/L de DQO	(61)
SBBGR – (Sequencing Batch Biofilter Granular Reactor) y UV/H₂O₂	7 horas de degradación Biológica, 650 mg la dosis específica de H ₂ O ₂ y 7 horas por L de lixiviado tratado, el tiempo de trabajo de la lámpara UV	88.7 % de DQO, 82 % de COD, 92 % de SST, 98.6 % de NT, 99.9 % de NH ₃ , Y 93.3 % de color	261 mg/L de DQO, 156 mg/L de COD, 20 mg/L de SST, 36.2 mg/L de NT, 0.5 mg N/L de NH ₃ , y 0.025 (abs) de color	(62)

Fuente: Autor.

Tratamiento de acople con procesos electroquímicos y biológico

Se conoce el lixiviado con alta concentración de sustancias orgánicas y nitrógeno, que son extremadamente tóxicos para el medio ambiente. Recientemente, la oxidación electroquímica ha recibido mucha atención debido a su bajo costo, viabilidad, respeto al medio ambiente y excelente eliminación de contaminantes en las aguas residuales (31). Según algunos autores, un pH bajo favorece las eficiencias de eliminación de sustancias orgánicas elevadas, pero restringe las eficiencias de eliminación de amonio bajas y viceversa (34).

La oxidación electroquímica, aunque tiene eficacia en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, tiene la principal desventaja de ser un proceso que consume mucha energía y la formación de compuestos orgánicos clorados. Además, se logra una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes con electrodos metálicos de alto costo, como el diamante dopado con boro y el Ti / IrO₂-RuO₂, lo que genera altos costos operativos. Esta es la razón por la que se favorece más como paso final o como unidad auxiliar en emergencias (42).

El tratamiento con electrocoagulación ha demostrado tener la capacidad de aumentar el valor del índice de biodegradabilidad de lixiviados de 0.27 a 0.45 (63). Este proceso se caracteriza por tener un alto costo relativo de inversión inicial, con la desventaja de generar lodos y corrosión en el ánodo que sirve para

producir los iones metálicos que forman los coágulos (63). No obstante, la electrocoagulación tiene una alta eficacia en la remoción de materia orgánica, de forma rápida y de fácil manejo (64). En una investigación se sometieron lixiviados biológicamente estabilizados a electrocoagulación, obteniendo remociones de 45% para el TOC, 57.4% para DQO y 77.1% para el color, concluyendo así que, éste es un método de los procesos electroquímicos, que puede ser una buena alternativa como postratamiento (65).

Aunque la tecnología electroquímica demuestra un excelente desempeño en el tratamiento de los lixiviados de los rellenos sanitarios, el efluente aún puede presentar una elevada carga contaminante, en referencia con la permitida por la normatividad legal (42). El acople con tratamientos biológicos ha permitido que las características del lixiviado alcancen una alta disminución de la toxicidad de los lixiviados, convirtiéndolo en un líquido apto para ser vertido (31). Esto se muestra en la Tabla 4, allí se describen las condiciones óptimas de los tratamientos combinados entre biológicos y electroquímicos y se evidencian los valores finales de las características de los lixiviados tratados.

Además, la tecnología electroquímica puede reducir la toxicidad del lixiviado de vertedero, por lo que es necesario estudiar más a fondo el punto extremo de reducción de la toxicidad durante la electrólisis en investigaciones futuras, lo que puede ahorrar el costo del tratamiento desde la perspectiva de las propiedades contaminantes (66).

Tabla 4. Tratamiento de lixiviados mediante procesos biológicos y electroquímicos

Tipo de combinación de tratamiento	Condiciones óptimas de operación	Eficacia	Valor final del parámetro
Reactor granular de biofiltro por lotes de secuenciación y un reactor electrolítico con celda de tipo discontinuo	Densidad de corriente de 200 mA/cm ² ; tiempo de reacción de 8 horas el biológico y 240 min el electroquímico	82% de N- Amoniacal; 93 % de DQO	Aprox. 278 mg/L de DQO
			(17)
Sistema de aireación extendida de ciclo intermitente (ICEAS) y oxidación electroquímica utilizando Ti/BDD y Ti/RuO ₂ ánodos.	83 mA/cm, pH bajo y 8 h	Ánodo Ti/BDD: 5.17 % de DQO, 91.89 % de COT, 81.18 % de NH ₄ ⁺ -N y 63.54 % de NT	32.26 mg/L de DQO con Ti/BDD y 49.68 mg/L de DQO con Ti/RuO ₂
		Ánodo Ti/RuO ₂ : 92.57 % de DQO, 78.76 % de COT, 97.85 % de NH ₄ ⁺ -N y 72.12 % de NT	
			(31)
Proceso anaerobio y un biorreactor de Membrana electroquímica reactiva (MER)	45 minutos de tiempo de reacción	Remoción con MER: 70 - 76 % de COT; 100 % N-Amoniacal	
			(67)
Manto de lodos (UASB), proceso anóxico en un reactor anaerobio y electroquímico con un ánodo de SnO ₂ - Sb ₂ O ₅ a base de Ti.	Tiempo de retención hidráulica (TRH) de 2.75 días; Temperatura de 20-22 °C; tiempo de reacción de 40 a 80 minutos, energía de entrada al proceso electroquímico 10 kWh/m ³ .	95.4 % de DQO, 97.2 % de NH ₄ -N y 90.3 % de NT	70 mg/L de DQO, 11.3 mg/L de NH ₄ -N y 39 mg/L de NT
			(68)
Tratamiento biológico y reactor electroquímico de lecho fijo	Tiempo de reacción 12 minutos; 2.0 Voltios	82.0 % de DQO; 86.5 % de NH ₄ -N; y 76.3 % de NT; 93.4 % de cromo .	70 mg/L de DQO, 9.4 mg/L de NH ₄ -N, 25.9 mg/L de NT
			(69)
Pretratamiento biológico y proceso electroquímico con compuesto por un reactor de ánodo de hierro (IAR) y Ti / RuO ₂	Densidad de corriente de 50 mA / cm ² ; tiempo de reacción 240 minutos	90.9 ± 0.3 % de DQO; y 90.2 ± 1,0 % de NT.	
			(70)

Fuente: Autor.

Tratamientos con procesos PAOs y biológicos en Colombia

En Colombia los rellenos sanitarios son el sistema de disposición final de residuos sólidos más utilizado, sin embargo, aún no se ha establecido completamente la implementación de tecnologías para el tratamiento de los lixiviados que aseguren una gestión ambientalmente viable (71). Dentro de los procesos comunes a nivel nacional para el manejo de los lixiviados en un relleno sanitario se incluye la recirculación, evaporación y los sistemas con membrana. Así mismo, se han implementado algunos sistemas biológicos en plantas de tratamiento de lixiviados y escaso desarrollo utilizando los PAOs en la gestión de estos líquidos (71-72).

En el relleno sanitario Presidente, Valle del Cauca, se estableció un humedal para tratar lixiviados pretratados de un estanque anaeróbico de alta tasa (BLAAT®) (71). Se utilizaron en el humedal policultivos de especies tropicales: *Gynerium sagittatum*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia psittacorum*. Estas especies nativas demostraron su capacidad fitorremediadora para los lixiviados pretratados en 60-90 % de remoción de contaminantes como DQO y metales pesados (73).

Los lixiviados provenientes del Relleno Sanitario Parque Tecnológico Ambiental el Guayabal ubicado en la ciudad de Cúcuta, se sometieron a tratamiento de fotocatalisis heterogénea TiO₂/UV acoplada a un reactor de lodos activados. Este sistema obtuvo una eficiencia global del proceso en más de un 50 % (15). Otro sistema de PAOs con procesos electroquímicos se utilizó para tratar lixiviados de un relleno sanitario ubicado en la ciudad de Pasto, con el cual se demostró la eficiencia de desactivación de microorganismos en los lixiviados (74).

Conclusiones

La composición compleja de los lixiviados de rellenos sanitarios requiere de una alternativa de tratamiento que alcance las remociones esperadas, de manera que no represente un riesgo para la salud y el ambiente. Recientemente, se ha avanzado en estudios sobre los PAOs y su acople con los procesos biológicos, para lograr mayores rendimientos de remoción en cuanto a las características de los lixiviados. Así, mismo, existe la necesidad de desarrollar sistemas de tratamiento que puedan cumplir con los límites permisibles de descarga según la normatividad. Adicionalmente deben tenerse en cuenta los costos económicos, controles de operación y facilidades de manejo. Con el avance en la investigación, algunas alternativas de tratamiento han resultado eficaces para gestionar los lixiviados, disminuyendo sus características nocivas. El acople de los procesos basados en ozono, los procesos asistidos por UV y los electroquímicos, junto con los procesos biológicos, para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, se perciben como tecnologías complementarias de mayor eficacia y más limpias.

Referencias

1. Hassan M, Zhao Y, Xie B. Employing TiO₂ photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development. *Chem Eng J.* 2016;285:264–75. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.093>
2. Bolyard SC, Reinhart DR. Application of landfill treatment approaches for stabilization of municipal solid waste. *Waste Manag.* 2016;55:22–30. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.024>
3. Moradian F, Ramavandi B, Jaafarzadeh N, Kouhgardi E. Effective treatment of high-salinity landfill leachate using ultraviolet / ultrasonication / peroxymonosulfate system. *Waste Manag.* 2020;118:591–9. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.018>
4. Müller GT, Giacobbo A, dos Santos Chiamonte EA, Rodrigues MAS, Meneguzzi A, Bernardes AM. The effect of sanitary landfill leachate aging on the biological treatment and assessment of photoelectrooxidation as a pre-treatment process. *Waste Manag.* 2015;36:177–83. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.024>
5. Cheng W, Quan X, Huang X, Cheng C, Yang L, Cheng Z. Enhancement of micro-filtration performance for biologically-treated leachate from municipal solid waste by ozonation in a



- micro bubble reactor. *Sep Purif Technol.* 2018;207(June):535–42. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.005>
6. Peng Y. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arab J Chem.* 2017;10:S2567–74. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.09.031>
 7. Hassan M, Wang X, Wang F, Wu D, Hussain A, Xie B. Coupling ARB-based biological and photochemical (UV/TiO₂ and UV/S₂O₈²⁻) techniques to deal with sanitary landfill leachate. *Waste Manag.* 2017;63:292. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.003>
 8. Ma C, Yuan P, Jia S, Liu Y, Zhang X, Hou S, et al. Catalytic micro-ozonation by Fe₃O₄ nanoparticles @ cow-dung ash for advanced treatment of biologically pre-treated leachate. *Waste Manag.* 2019;83:23–32. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.045>
 9. Mandal P, Dubey BK, Gupta AK. Review on landfill leachate treatment by electrochemical oxidation: Drawbacks, challenges and future scope. *Waste Manag.* 2017;69:250–73. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.034>
 10. Youcai Z. Leachate Generation and Characteristics. In: Inc. E, editor. *Pollution Control Technology for Leachate from Municipal Solid Waste.* 2018. p. 1–30.
 11. Yu M, Xi B, Zhu Z, Zhang L, Yang C, Geng C. Fate and removal of aromatic organic matter upon a combined leachate treatment process. *Chem Eng J.* 2020;401(June):126157. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126157>
 12. Ogata Y, Ishigaki T, Ebie Y, Sutthasil N, Witthayaphirom C, Chiemchaisri C, et al. Design considerations of constructed wetlands to reduce landfill leachate contamination in tropical regions. *J Mater Cycles Waste Manag.* 2018;20(4):1961–8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-018-0755-0>
 13. Luo H, Zeng Y, Cheng Y, He D, Pan X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Sci Total Environ.* 2020;703:135468. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>
 14. Gao J, Oloibiri V, Chys M, Audenaert W, Decostere B, He Y, et al. The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2015;14(1):93–122. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9349-z>
 15. Becerra D, Soto J, Villamizar S, Machuca-Martínez F, Ramírez L. Alternative for the Treatment of Leachates Generated in a Landfill of Norte de Santander–Colombia, by Means of the Coupling of a Photocatalytic and Biological Aerobic Process. *Top Catal.* 2020;63(11–14):1336–49. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11244-020-01284-1>
 16. Baiju A, Gandhimathi R, Ramesh ST, Nidheesh P V. Combined heterogeneous Electro-Fenton and biological process for the treatment of stabilized landfill leachate. *J Environ Manage.* 2018;210:328–37. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.019>
 17. Del Moro G, Prieto-Rodríguez L, De Sanctis M, Di Iaconi C, Malato S, Mascolo G. Landfill leachate treatment: Comparison of standalone electrochemical degradation and combined with a novel biofilter. *Chem Eng J.* 2016;288:87–98. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.069>
 18. Chys M, Oloibiri VA, Audenaert WTM, Demeestere K, Van Hulle SWH. Ozonation of biologically treated landfill leachate: Efficiency and insights in organic conversions. *Chem Eng J.* 2015;277:104–11. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.099>
 19. Kow S, Fahmi MR, Abidin CZA, Soon An O. Advanced Oxidation Processes: Process Mechanisms, Affecting Parameters and Landfill Leachate Treatment. *Water Environ Res.* 2016;88(11):2047–58. Disponible en: <https://doi.org/10.2175/106143016X14733681695285>

20. Gao JL, Oloibiri V, Chys M, De Wandel S, Decostere B, Audenaert W, et al. Integration of autotrophic nitrogen removal, ozonation and activated carbon filtration for treatment of landfill leachate. *Chem Eng J*. 2015;275:281–7. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.012>
21. Xu Q, Siracusa G, Di Gregorio S, Yuan Q. COD removal from biologically stabilized landfill leachate using Advanced Oxidation Processes (AOPs). *Process Saf Environ Prot*. 2018;120:278–85. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.014>
22. Han M, Duan X, Cao G, Zhu S, Ho SH. Graphitic nitride-catalyzed advanced oxidation processes (AOPs) for landfill leachate treatment: A mini review. *Process Saf Environ Prot*. 2020;139:230–40. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.046>
23. Labiadh L, Fernandes A, Ciriaco L, Pacheco MJ, Gadri A, Ammar S, et al. Electrochemical treatment of concentrate from reverse osmosis of sanitary landfill leachate. *J Environ Manage*. 2016;181:515–21. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.069>
24. Wang H, Wang Y nan, Li X, Sun Y, Wu H, Chen D. Removal of humic substances from reverse osmosis (RO) and nanofiltration (NF) concentrated leachate using continuously ozone generation-reaction treatment equipment. *Waste Manag*. 2016;56:271–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.040>
25. Tasnim G, Sheikh Y, Mahtab M. Photocatalytic (UV-TiO₂) Degradation Process For Landfill Leachate Treatment. In: *International Conference on Recent Advances in Engineering and Science*. 2020. p. 7.
26. Chen W, Zhang A, Jiang G, Li Q. Transformation and degradation mechanism of landfill leachates in a combined process of SAARB and ozonation. *Waste Manag*. 2019;85:283–94. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.038>
27. Ren Y, Ferraz F, Lashkarizadeh M, Yuan Q. Comparing young landfill leachate treatment efficiency and process stability using aerobic granular sludge and suspended growth activated sludge. *J Water Process Eng*. 2017;17:161–7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.04.006>
28. Azad Pashaki SG, Khojastehpour M, Ebrahimi-Nik M, Rohani A. Treatment of municipal landfill leachate: Optimization of organic loading rate in a two-stage CSTR followed by aerobic degradation. *Renew Energy*. 2021;163:1210–21. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.010>
29. Bashir MJK, Aziz HA, Amr SSA, Sethupathi S, Ng CA, Lim JW. The competency of various applied strategies in treating tropical municipal landfill leachate. *Desalin Water Treat*. 2015;54(9):2382–95. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.901189>
30. Luo H, Zeng Y, Cheng Y, He D, Pan X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Sci Total Environ*. 2020;703:135468. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>
31. Luu T Le. Post treatment of ICEAS-biologically landfill leachate using electrochemical oxidation with Ti/BDD and Ti/RuO₂ anodes. *Environ Technol Innov*. 2020;20:101099. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101099>
32. Gautam P, Kumar S. Characterisation of Hazardous Waste Landfill Leachate and its Reliance on Landfill Age and Seasonal Variation : A Statistical Approach. *J Environ Chem Eng*. 2021;9(4):105496. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105496>
33. Chen W, Li Q. Chemosphere Elimination of UV-quinching substances from MBR- and SAARB-treated mature land fill leachates in an ozonation process : A comparative study. *Chemosphere*. 2020;242:125256. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125256>





34. Ren Y, Ferraz F, Lashkarizadeh M, Yuan Q. Comparing young landfill leachate treatment efficiency and process stability using aerobic granular sludge and suspended growth activated sludge. *J Water Process Eng.* 2017;17(February):161–7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.04.006>
35. Saleem M, Lavagnolo MC, Campanaro S, Squartini A. Dynamic membrane bioreactor (DMBR) for the treatment of landfill leachate: bioreactor's performance and metagenomic insights into microbial community evolution. *Environ Pollut.* 2018;243:326–35. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.090>
36. Islam M, Xu Q, Yuan Q. Advanced biological sequential treatment of mature landfill leachate using aerobic activated sludge SBR and fungal bioreactor. *J Environ Heal Sci Eng.* 2020;18(1):285–95. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00466-z>
37. Wu L, Li Z, Zhao C, Liang D, Peng Y. A novel partial-denitrification strategy for post-anammox to effectively remove nitrogen from landfill leachate. *Sci Total Environ.* 2018;633:745–51. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.213>
38. Miao L, Yang G, Tao T, Peng Y. Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments – A review. *J Environ Manage.* 2019;235(January):178–85. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.057>
39. Wang Z, Peng Y, Miao L, Cao T, Zhang F, Wang S, et al. Continuous-flow combined process of nitrification and ANAMMOX for treatment of landfill leachate. *Bioresour Technol.* 2016;214:514–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.118>
40. Ikehata K, Li Y. Ozone-Based Processes. In: Elsevier Inc., editor. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology.* 2018. p.115–34.
41. Chen W, Li Q. Elimination of UV-quenching substances from MBR- and SAARB-treated mature landfill leachates in an ozonation process: A comparative study. *Chemosphere.* 2020;242:125256. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125256>
42. Gautam P, Kumar S, Lokhandwala S. Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review. *J Clean Prod.* 2019;237:117639. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117639>
43. Kattel E, Kivi A, Klein K, Tenno T, Dulova N, Trapido M. Hazardous waste landfill leachate treatment by combined chemical and biological techniques. *Desalin Water Treat.* 2016;57(28):13236–45. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1057539>
44. Caroline E, Kozak C, Garcia H, Mansur M. Applicability of conventional and non-conventional parameters for municipal landfill leachate characterization. *Chemosphere.* 2020;251:126414. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126414>
45. Selvabharathi G, Adishkumar S, Jenefa S, Ginni G, Rajesh Banu J, Yeom IT. Combined homogeneous and heterogeneous advanced oxidation process for the treatment of tannery wastewaters. *J Water Reuse Desalin.* 2016;6(1):59–71.
46. Lovato M, Buffelli JR, Abrile M, Martín C. Kinetics and efficiency of ozone for treatment of landfill leachate including the effect of previous microbiological treatment. *Environ Sci Pollut Res.* 2019;26(5):4474–87.
47. Sharma HB, Panigrahi S, Sarmah AK, Dubey BK. How does the pre-treatment of landfill leachate impact the performance of O₃ and O₃/UVC processes? *Chemosphere.* 2019;135907. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130389>
48. Wang H, Li X, Hao Z, Sun Y, Wang Y, Li W, et al. Transformation of dissolved organic matter in concentrated leachate from nanofiltration during ozone-based oxidation processes (O₃,

- O₃/H₂O₂ and O₃/UV). *J Environ Manage.* 2017;191:244–51. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.021>
49. Ranjbar-Vakilabadi D, Hassani AH, Omrani G, Ramavandi B. Catalytic potential of Cu/Mg/Al-chitosan for ozonation of real landfill leachate. *Process Saf Environ Prot.* 2017;107:227–37. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.02.013>
 50. Ghahrchi M, Rezaee A. Electrocatalytic ozonation process supplemented by EDTA-Fe complex for improving the mature landfill leachate treatment. *Chemosphere.* 2021;263:127858. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127858>
 51. Umamaheswari J, Bharathkumar T, Shanthakumar S, Gothandam KM. A feasibility study on optimization of combined advanced oxidation processes for municipal solid waste leachate treatment. *Process Saf Environ Prot.* 2020;143:212–21. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.040>
 52. Barbosa ID, Gomes AI, Souza-chaves BM, Park M, Silva FC V, Boaventura RAR, et al. Incorporation of ozone-driven processes in a treatment line for a leachate from a hazardous industrial waste landfill : Impact on the bio-refractory character and dissolved organic matter distribution. *J Environ Chem Eng J.* 2021;9(April):105554. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105554>
 53. Huang Z, Gu Z, Wang Y, Zhang A. Improved oxidation of refractory organics in concentrated leachate by a Fe²⁺-enhanced O₃/H₂O₂ process. *Environ Sci Pollut Res.* 2019;26(35):35797–806. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06592-y>
 54. Gomes AI, Soares TF, Silva TFCV, Boaventura RAR, Vilar VJP. Ozone-driven processes for mature urban landfill leachate treatment: Organic matter degradation, biodegradability enhancement and treatment costs for different reactors configuration. *Sci Total Environ.* 2020;724. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138083>
 55. Soubh A, Mokhtarani N. The post treatment of composting leachate with a combination of ozone and persulfate oxidation processes. *RSC Adv.* 2016;6(80):76113–22. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C6RA09539A>
 56. Wang Y, Wang H, Wu Y, Sun Y, Gong Z, Liu K, et al. Effective removal of contaminants from biotreated leachate by a combined Fe(III)/O₃ process: Efficiency and mechanisms. *J Clean Prod.* 2020;276(III):123379. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123379>
 57. Wu C, Chen W, Gu Z, Li Q. A review of the characteristics of Fenton and ozonation systems in landfill leachate treatment. *Sci Total Environ.* 2021;762:143131. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143131>
 58. Abu Amr SS, Aziz HA, Hossain MS, Bashir MJK. Simultaneous removal of COD and color from municipal landfill leachate using Ozone/Zinc sulphate oxidation process. *Glob Nest J.* 2017;19(3):498–504.
 59. Ikhtlaq A, Javed F, Akram A, Qazi UY, Masood Z, Ahmed T, et al. Treatment of leachate through constructed wetlands using *Typha angustifolia* in combination with catalytic ozonation on Fe-zeolite A. *Int J Phytoremediation.* 2020;0(0):1–9. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1858753>
 60. Silva TFC V, Soares PA, Manenti DR, Fonseca A, Saraiva I, Boaventura RAR, et al. An innovative multistage treatment system for sanitary landfill leachate depuration : Studies at pilot-scale. *Sci Total Environ.* 2017;576:99–117. Disponible con: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.058>
 61. Chys M, Declerck W, Audenaert WTM, Van Hulle SWH. UV/H₂O₂, O₃ and (photo-) Fenton as treatment prior to granular activated carbon filtration of biologically stabilized landfill leachate. *J Chem Technol Biotechnol.* 2015;90(3):525–33. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jctb.4344>



62. Moro G Del, Mancini A, Mascolo G, Iaconi C Di. Comparison of UV / H₂O₂ based AOP as an end treatment or integrated with biological degradation for treating landfill leachates. *Chem Eng J.* 2013;218:133–7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.086>
63. Ghahrchi M, Rezaee A. Electro-catalytic ozonation for improving the biodegradability of mature landfill leachate. *J Environ Manage.* 2020;254(October 2019):109811. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109811>
64. Fu S, Jia H, Meng X, Guo Z, Wang J. Fe-C micro-electrolysis-electrocoagulation based on BFDA in the pre-treatment of landfill leachate: Enhanced mechanism and electrode decay monitoring. *Sci Total Environ.* 2021;781:146797. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146797>
65. Guvenc SY, Dincer K, Varank G. Performance of electrocoagulation and electro-Fenton processes for treatment of nano filtration concentrate of biologically stabilized landfill leachate. *J Water Process Eng.* 2019;31:100863. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100863>
66. Deng Y, Zhu X, Chen N, Feng C, Wang H, Kuang P, et al. Review on electrochemical system for landfill leachate treatment: Performance, mechanism, application, shortcoming, and improvement scheme. *Sci Total Environ.* 2020;745:140768. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140768>
67. Lin H, Peng H, Feng X, Li X, Zhao J, Yang K, et al. Energy-efficient for advanced oxidation of bio-treated landfill leachate effluent by reactive electrochemical membranes (REMs): Laboratory and pilot scale studies. *Water Res.* 2021;190. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116790>
68. Wu L na, Liang D wei, Xu Y ying, Liu T, Peng Y zhen, Zhang J. A robust and cost-effective integrated process for nitrogen and bio-refractory organics removal from landfill leachate via short-cut nitrification, anaerobic ammonium oxidation in tandem with electrochemical oxidation. *Bioresour Technol.* 2016;212:296–301. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.113>
69. Hui H, Wang H, Mo Y, Li L, Yin Z, He B, et al. A three-stage fixed-bed electrochemical reactor for biologically treated landfill leachate treatment. *Chem Eng J.* 2019;376(February). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.113>
70. Deng Y, Feng C, Chen N, Hu W, Kuang P, Liu H, et al. Research on the treatment of biologically treated landfill leachate by joint electrochemical system. *Waste Manag.* 2018;82:177–87. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.028>
71. Madera-Parra, C. Landfill leachate treatment by technological coupling of High Rate Anaerobic Pond-BLAAT® and Subsurface horizontal flow constructed wetlands. *Ingeniería y competitividad.* 2020; 22(2). Disponible en: <https://doi.org/10.25100/iyc.v22i2.9740>
72. García, P. Manejo y Tratamiento de Lixiviados en Rellenos Sanitarios: Revisión bibliográfica y Experiencia en Planta de Tratamiento de Lixiviados de Navarro (Doctoral dissertation, Universidad Santiago de Cali).
73. Madera-Parra, C. Tratamiento de lixiviados de relleno sanitario por medio de humedales construidos sembrados con policultivos de plantas nativas. *Ingeniería y Competitividad.* 2016; 18(2), 183-192. Disponible en: <https://doi.org/10.25100/iyc.v18i2.2166>
74. Revelo, D, Guerrero-Flórez, M, Ordóñez, A, Sánchez-Ortiz, I, Pusapaz-Villota, N, Yela, O, Galeano, L. Bacterial diversity of leachates retained in adsorbents regenerated by wet catalytic peroxide oxidation: potential driving bioelectrochemical systems. *International Journal of Environmental Science and Technology.* 2021; 18(10), 2913-2924. Disponible en: <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/s13762-020-03058-4>