

Tratamiento de lixiviados por oxidación avanzada: Una revisión

Treatment of leachate by advanced oxidation: A review

Recibido: mayo 20 de 2022 | Revisado: mayo 30 de 2022 | Aceptado: junio 02 de 2022

AHUBER OMAR VÁSQUEZ ARANDA¹
JOSÉ IANNAcone^{1,2}
ALCIDES PEÑA¹
LUIS MIGUEL ROMERO ECHEVARRÍA³

RESUMEN

El objetivo fue analizar el tratamiento de lixiviados por Procesos de Oxidación Avanzada (POAs), basados en el método Fenton. Para la búsqueda de información se utilizaron las palabras clave “Oxidación Avanzada”, “Relleno Sanitario”, “Lixiviado”, “Fenton”, “Leachate” y “Landfill”, en las bases de datos Scopus, Dialnet, Scielo y Redalyc. Se trabajó con el método Prisma para revisiones sistemáticas, cuya búsqueda mostró 2751 artículos, de los cuales 199 fueron tomados de Scopus, 14 de Dialnet, 12 de Scielo, y 2526 de Redalyc, de los cuales, se excluyeron 2718 artículos por no estar relacionados con el objetivo de la investigación. De las 33 publicaciones científicas seleccionadas, nueve presentaron aplicaciones directas del método Fenton, y con aplicaciones combinadas del método Fenton fueron 24. Se caracterizan y analizan los resultados obtenidos en relación con sus eficiencias con base a la DQO (Demanda Química de Oxígeno). Se concluye que el método Fenton con aplicación directa puede alcanzar eficiencias entre el 42 al 85% de la DQO, mientras que el método combinado alcanza un rango del 65 al 99.88% para la DQO.

Palabras clave: Relleno Sanitario; Lixiviado; Fenton; Oxidación Avanzada

ABSTRACT

The objective was to analyze the treatment of leachates by Advanced Oxidation Processes (AOPs), based on the Fenton method. To search for information, the keywords “Advanced Oxidation”, “Sanitary Landfill”, “Leached”, “Fenton”, “Leachate” and “Landfill” were used in the Scopus, Dialnet, Scielo and Redalyc databases. We worked with the Prisma method for systematic reviews, whose search showed 2751 articles, of which 199 were taken from Scopus, 14 from Dialnet, 12 from Scielo, and 2526 from Redalyc, of which 2718 articles were excluded because they were not related with the objective of the investigation. Of the 33 selected scientific publications, nine presented direct applications of the Fenton method, and with combined applications of the Fenton method there were 24. The results obtained are characterized and analyzed in relation to their efficiencies based on COD (Chemical Oxygen Demand). that the Fenton method with direct application can reach efficiencies between 42 to 85% of the COD, while the combined method reaches a range of 65 to 99.88% for the COD.

Keywords: Landfill; Leachate; Fenton; Advanced Oxidation

- 1 Escuela Universitaria de Posgrado (EUGP). Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental. Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.
- 2 Facultad de Ciencias Biológicas. Grupo de Investigación “One Health”. Escuela de Posgrado (EPG). Universidad Ricardo Palma, Lima - Perú.
- 3 Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Huancavelica - Perú

Autor de correspondencia:
omarvasquez36@gmail.com

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: revistacampus@usmp.pe.

<https://doi.org/10.24265/campus.2022.v27n33.04>

Introducción

La variada acumulación de residuos sólidos en los rellenos sanitarios hace posible que el lixiviado formado adquiriera una composición compleja en su estructura de formación, definiéndose como un producto obtenido de la percolación de líquidos mediante la estabilización de los residuos sólidos. Los lixiviados se generan como consecuencia de los residuos, la humedad y la percolación de líquidos a través de los desechos durante el proceso de estabilización (Méndez et al., 2019).

El difícil tratamiento de los lixiviados es debido a que sus componentes son altamente tóxicos y variables, sumado a que los suelos son bastante permeables significando un peligro para la salud. Seibert et al. (2019), basados en diferentes estudios sobre las características y toxicidad de los lixiviados proveniente de los rellenos sanitarios, identificaron la presencia de 12 sustancias químicas disruptores (“Endocrine Disrupting Chemicals”, EDC), muy frecuentes en diferentes rellenos sanitarios del mundo. Estos compuestos EDC fueron relacionados con la presencia de plásticos, productos de aseo personal, insecticidas y residuos de artículos de limpieza, los cuales debido a sus características tóxicas y bioacumulativas son asociadas con trastornos en los procesos metabólicos que conllevan a diferentes enfermedades que se manifiestan con el tiempo en cáncer, infertilidad y otras.

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), por lo general, están mezclados con residuos peligrosos de tipo industrial, lo que origina contaminación química. Los lixiviados muestran una gran variación, caracterizándose principalmente por su

elevada cantidad de compuestos de naturaleza orgánica, sólidos totales disueltos y microorganismos patógenos como los coliformes (Espinosa et al., 2010). La Agencia de Protección Ambiental (EPA) considera a los metales pesados, plaguicidas y otras sustancias asociadas, como contaminantes de acuíferos por su elevado grado de movilidad, nivel de persistencia y toxicidad, sumado a ello afectan de manera importante las cargas hidráulicas, como lagos y canales de irrigación; y debido a sus características fisicoquímicas, por lo general son resistentes a la biodegradación (Hirata, 2002).

Los compuestos más recalcitrantes de remover en los lixiviados son las sustancias húmicas y fúlvicas, por lo que es necesario proponer un tratamiento que asegure la remoción de la elevada carga orgánica presente y la precipitación de los elementos y/o compuestos no degradados (Nercolini et al., 2019), motivo por el cual se requiere demostrar la capacidad que presentan los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs), cuyos métodos pueden ser aplicados de manera directa o combinada en la remoción de materia orgánica, medidos generalmente bajo parámetros indicadores como la DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y COT (Carbono Orgánico Total) (Chen et al., 2013; Sruthi et al., 2018; San Pedro et al., 2019). En esa misma línea, Colombo et al. (2018), proponen una forma de tratar los lixiviados de los rellenos sanitarios, combinando un proceso biológico previo con uno de oxidación foto-fenton, a fin de mejorar las eficiencias. Bajo el mismo principio, Sruthi et al. (2018), realizaron un proceso

comparativo entre fenton heterogéneo y electro-fenton, y finalmente Jung et al. (2017), dentro de los procesos de oxidación química compararon las eficiencias entre el proceso fenton y el de ozonización.

Se han empleado procesos de aplicación con ozono / peróxido de hidrógeno-Fenton y varios esquemas de tratamiento combinados para los lixiviados recolectados de un vertedero de eliminación de desechos (Goi et al., 2015). En ese mismo camino, Silveira et al. (2018), evaluaron la viabilidad de la oxidación secuencial de persulfato y Fenton para la decoloración y mineralización de lixiviados de un relleno sanitario.

Contribuyendo con la mejora de la calidad de las aguas naturales presentes en el área de influencia de los rellenos sanitarios, que vienen siendo impactadas por los lixiviados, se planteó desarrollar una revisión que permita conocer la efectividad del método Fenton y otras técnicas, que asegure su inocuidad para ser vertido a un cuerpo receptor. En tal sentido, el objetivo propuesto en la presente revisión es mostrar las evidencias registradas por cada una de las investigaciones sobre el tratamiento de lixiviados por POAs con aplicación directa o combinada del método Fenton, considerado bajo diferentes perspectivas o realidades, a fin de demostrar la eficiencia alcanzada.

Método

El estudio se realizó a través de una revisión de la literatura científica en base a datos seleccionados previamente, en el cual se utilizaron palabras clave para la identificación de los artículos que

formaron parte del presente trabajo, también se usó el número de páginas, año y lugar de la publicación, autor, tipo de la investigación, problemas, objetivos, resultados de toda la investigación asociando artículos, datos relevantes que permitirán organizar la información.

En el desarrollo de la investigación se emplearon algunas fuentes para la recolección de información de revistas indexadas, donde se identificaron artículos a través de la búsqueda primaria, para posteriormente aplicar los criterios de inclusión. Las palabras clave utilizadas para escoger los artículos relacionados con el tema a revisar fueron: “Lixiviados”, “Relleno Sanitario”, “Oxidación Avanzada”, “Fenton”, “Leachate” y “Landfill”, principalmente, en las bases de datos como Scopus, Dialnet, Scielo y Redalyc.

En el método se consideraron artículos de revistas indexadas, pero sobre todo se buscó incluir aquellas de preferencia registradas del 2002 al 2022, por encontrarse dentro del objetivo de la investigación. Los idiomas considerados para la búsqueda de la información fueron de preferencia el inglés, portugués y español, que incluían artículos sobre tratamiento de lixiviados por Oxidación Avanzada y/o Fenton, coadyuvando a considerar aquellos que profundizaran en nuestro tema de interés, analizando resúmenes, contenidos teóricos y resultados.

Asimismo, se excluyeron artículos y documentos que no cumplieran con el criterio de inclusión, del mismo modo no se consideraron aquellas investigaciones que no resultaron relevantes o carecían de rigor científico.

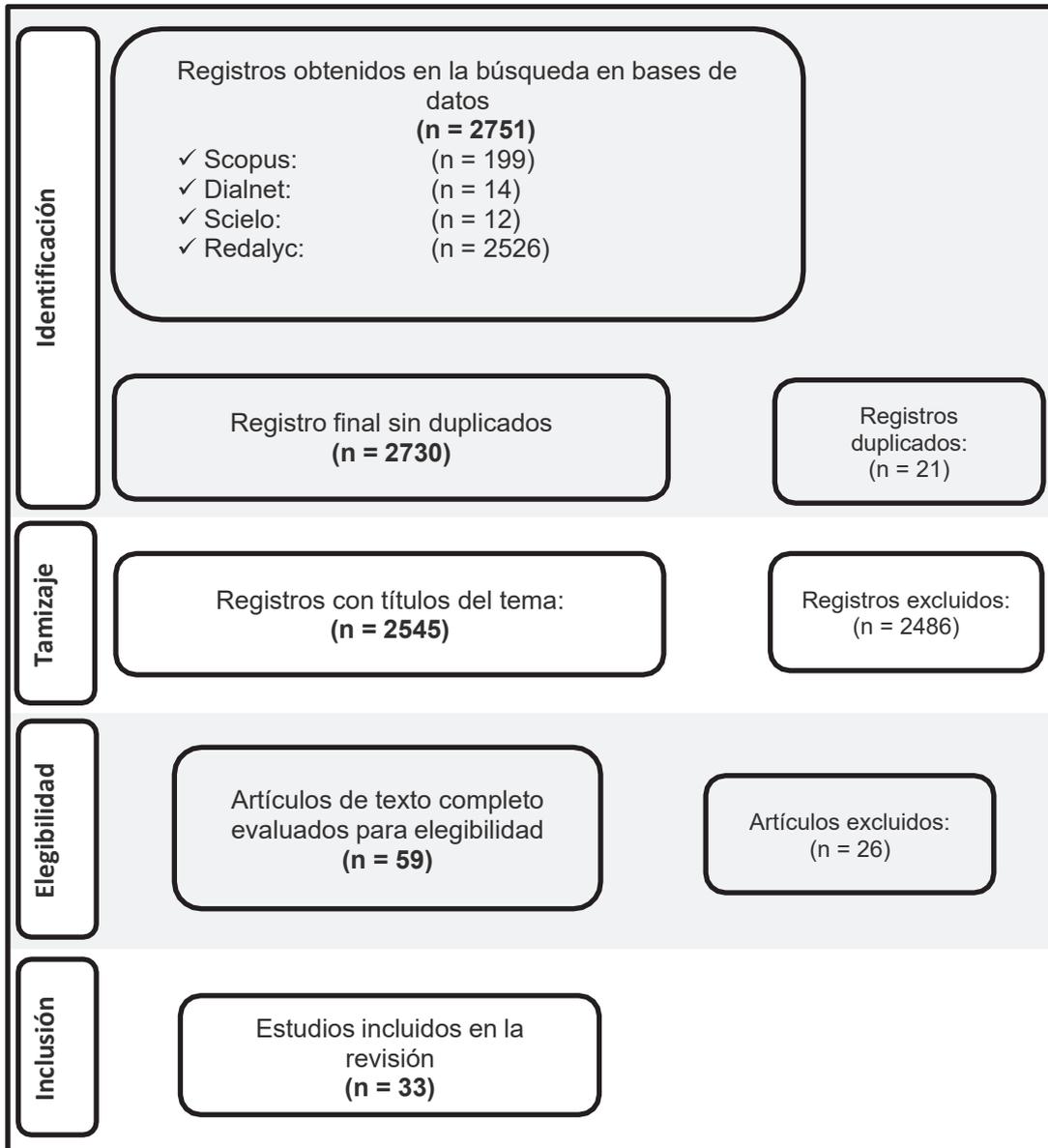
Resultados

El artículo de revisión comprende 33 artículos seleccionados, de los cuales

31 de ellos corresponden a estudios experimentales y los dos restantes a revisiones (Figura 1).

Figura 1

Diagrama Prisma para el procesamiento de la Información en el tratamiento de lixiviados por Procesos de Oxidación Avanzada (POA) con aplicación directa o combinada del método Fenton.



A continuación, en la Tabla 1, se describe los aspectos más relevantes de las investigaciones realizadas por los diferentes autores de acuerdo con

sus objetivos planteados, tanto para aplicaciones directas como combinadas, y ordenadas desde la más reciente hasta la más antigua (2022-2002).

Tabla 1

Características de los estudios en el tratamiento de Lixiviados por Procesos de Oxidación Avanzada (POA), con aplicación directa y combinada

[Autor, Año]	Relevancia
[Kucharska et al. (2022)]	Los resultados obtenidos del proceso combinado demuestran que hay una mejora considerable del índice de biodegradabilidad, lo que permite complementarlo con un tratamiento biológico. Los resultados permiten el cumplimiento de las normas legales para descarga.
[Mahtab et al. (2020)]	Se evaluó estadísticamente el proceso Fenton, a fin de analizar las condiciones operativas óptimas del sistema, donde se encontró que las mayores eficiencias se dieron a pH ácido (3.1), así mismo, se indicó que un incremento de oxidante no significa necesariamente alcanzar una mayor remoción de DQO.
[Gautam et al. (2019)]	En la presente revisión se evaluaron diferentes métodos de oxidación avanzada, concluyendo que el método de Ozono con Peróxido de Hidrógeno o Persulfato alcanza altas eficiencias.
[Méndez et al. (2019)]	La aplicación combinada de Fenton/Filtración/Adsorción mostró resultados altamente eficientes en la remoción de la DQO y Color preferentemente, asociado posiblemente a su gran capacidad oxidativa y complementado con la filtración y Adsorción.
[Seibert et al. (2019)]	De acuerdo con el estudio se concluye que los procesos combinados Fenton/Biológicos suelen proporcionar tasas de eliminación de DQO más altas en comparación con los independientes, permitiendo alcanzar límites permisibles para descargas.
[San Pedro et al. (2019)]	El tratamiento por Fenton y Adsorción es eficiente para remover materia orgánica medida como DQO y BPA. Los resultados indican que la mayor parte del BPA se degrada en la Oxidación de Fenton complementada con la adsorción.
[Nercolini et al. (2019)]	La evaluación por procesos independientes en la remoción del Color, indicaron que los resultados óptimos alcanzados fueron por el método Fenton, trabajado con el catalizador convencional (FeSO_4)
[Sruthi et al. (2018)]	El presente estudio demuestra que los dos procesos Fenton son eficientes, aumentando su biodegradabilidad considerablemente de 0.03 a 0.52. Sin embargo, el requerimiento de dosificación del catalizador por el proceso Electro-Fenton justifica su factibilidad.
[Silveira et al. (2018)]	De los resultados obtenidos se puede indicar que el incremento del radical oxidante OH mediante el H_2O_2 , aumentó la mineralización general por encima del 90% para un tiempo a 480 min.
[Colombo et al. (2018)]	La presencia de Materia Orgánica por el método biológico fue difícil de degradar por los compuestos recalcitrantes que poseen los lixiviados de difícil biodegradación. Sin embargo, el método combinado alcanzó eficiencias considerables en la remoción de MO, mejorando el índice de biodegradabilidad.
[Gomes et al. (2018)]	La aplicación combinada de Ozono con peróxido de hidrógeno mostró resultados altamente eficientes en la remoción de la DQO preferentemente, asociado posiblemente a su gran capacidad oxidativa.

[Jung et al. (2017)]	El proceso Fenton exhibió un mejor rendimiento que la ozonización en sus respectivas condiciones óptimas, porque los radicales OH podrían efectivamente descomponen tanto la materia orgánica disuelta (DOM) hidrófoba como la hidrófila, pero el O ₃ tiende a oxidar selectivamente compuestos hidrofóbicos solos.
[Biglarijoo et al. (2017)]	El proceso Fenton mostró un mejor tratamiento que la Ozonización, con relación a sus eficiencias, degradando Materia Orgánica Disuelta (DOM) hidrófoba como hidrófila.
[Medina et al. (2017)]	La aplicación directa indicó que el proceso Fenton es una alternativa eficaz para tratamiento de sustancias persistentes en lixiviados y puede ser aplicado como post-tratamiento.
[Silva et al. (2016)]	Los resultados alcanzados en el proceso combinado Foto-Fenton indicaron que se alcanzaron eficiencias importantes de remoción de Carbono Orgánico Disuelto, pero con alto consumo de Peróxido de Hidrógeno, por lo que se recomienda realizar una previa coagulación y floculación.
[Costa et al. (2015)]	Si bien es cierto los procesos evaluados han mostrado buenas eficiencias de tratamiento, comparativamente el método Foto- Fenton tuvo mayor eficiencia en la degradación de la DQO y la Toxicidad, observando la importancia de los rayos UV solares para degradar materia orgánica recalcitrante y toxica.
[Amiri & Sabour (2014)]	Estadísticamente la relación H ₂ O ₂ / Fe ⁺² , muestran una influencia significativa en la remoción de la DQO. Se aprecia también que la relación DBO/DQO aumenta, lo que indica un incremento en la biodegradabilidad.
[Silva et al. (2013)]	En el presente estudio se demostró la alta eficiencia del método Foto-Fenton complementada con la Oxidación Biológica, pero se vio afectada en la primera fase por la presencia de sólidos en suspensión, motivo por el cual se requirió de mayores concentraciones de H ₂ O ₂ y energía para degradar la materia orgánica particulada. Otro factor limitante fue las bajas temperaturas de trabajo lo que provoca bajas tasas de reacción.
[Chen et al. (2013)]	El método Fenton es recomendable para la degradación total de la DQO y Color de lixiviados con resultados en pocos minutos. La acción de Fe ⁺² y H ₂ O ₂ resultan importantes en la oxidación al formar los radicales Hidroxilo en niveles bajos, pero reducen su nivel de oxidación en elevadas concentraciones.
[Amr & Aziz (2012)]	El método combinado de Ozono/Peróxido de Hidrógeno muestra una remoción media de la DQO, baja de Amonio y alta de Color.
[Moravia et al. (2011)]	El POAs basado en el reactivo de Fenton demostró ser adecuado para el tratamiento de lixiviados con características refractarias, sin embargo, es preciso indicar que el método no es eficiente para otros parámetros como nutrientes, cloruros, alcalinidad y metales.
[Moravia et al. (2011)]	El efluente tratado mostró que tiene características refractarias, por el cual se optó por trabajarlo en un proceso combinado de Fenton con Microfiltración donde se alcanzaron eficiencias relativamente elevadas.
[Méndez et al. (2010)]	Los resultados alcanzados en el proceso combinado Fenton/Adsorción indicaron que se alcanzaron elevadas eficiencias de remoción al concluir de manera secuencial el tratamiento considerado.

[Wu et al. (2010)].	El análisis de resultados aplicado por separado entre la DQO y los HS, indicaron que se alcanza una buena remoción a temperatura ambiente (20°C) y concentración ferrosa moderada, sin embargo, la máxima eficiencia se llega a obtener cuando alcanza una temperatura de 70°C.
[Méndez et al. (2010)]	El lixiviado recolectado que se produce en el relleno sanitario, no es suficiente para un tratamiento biológico, ya que el índice de biodegradabilidad (DBO/DQO) promedio es igual a 0,07. En el análisis, la relación DQOs/DQOt del lixiviado se determinó que el 96% de la materia orgánica se encuentra en forma disuelta.
[Wang et al. (2009)]	El proceso combinado del método mostró una excelente remoción de la DQO y eliminación del Color. Al concluir el tratamiento por filtración Biológica, se alcanzó una concentración final de 75mg/l, lo que permitió cumplir con la norma de descargas.
[Zhang et al. (2009)]	De acuerdo a los resultados del diseño factorial utilizado, mostraron que el pH y la DQO, y la interacción entre el pH-DQO dieron efectos negativos, pero por el contrario la dosificación de Fe ⁺² y la relación H ₂ O ₂ /Fe ⁺² mostraron un efecto positivo.
[Goi et al. (2009)]	Los procesos individuales o combinados no llegaron a cumplir los límites para descargas a pesar de haber alcanzado con Fenton/Ozono un alto grado de remoción de DQO y mejorado el índice de biodegradabilidad, por lo que se recomienda complementarlo con un biológico.
[Méndez et al. (2009)]	Las eficiencias alcanzadas en los cuatro tratamientos muestran que el proceso Fenton alcanza las mayores eficiencias de remoción para DQO y DBO, en relación con los otros tratamientos aplicados.
[Pan et al. (2008)]	Los resultados experimentales indicaron que el proceso de ultrasonido/Fenton alcanzó tasas de eliminación de DQO y color más altas que los trabajados en forma individual, considerando las condiciones óptimas para los tres casos.
[Zhang et al. (2006)]	El estudio demuestra que el proceso Electro-Fenton puede degradar de manera efectiva los componentes orgánicos en un tiempo corto y adquiere una mayor eficiencia al incrementarse la corriente eléctrica y el reactivo Fenton, así como al optimizar la distancia entre los electrodos.
[Lange et al. (2006)]	El tratamiento Fenton presenta eficiencias importantes para ser utilizado como tratamiento preliminar en la remoción de compuestos orgánicos e inorgánicos, presentando ventajas operativas y flexibilidad para el control de variables.
[Haapea et al. (2002)]	Los resultados combinados de una pre-ozonización con un sistema biológico mostraron las mayores eficiencias que las mostradas individualmente. En tal sentido, se propone complementar con un proceso biológico como tratamiento final. Así mismo, los sistemas combinados de Ozono con Peróxido de Hidrógeno no mostraron cambios significativos después de la Ozonización.

La evaluación de las eficiencias de los 33 estudios se agrupó en dos tablas. Los procesos con aplicaciones directas del método Fenton son descritos por nueve autores en la Tabla 2, y los procesos con aplicaciones combinadas son descritos

por 24 autores en la Tabla 3. El indicador común utilizado para la medición de las eficiencias fue la DQO.

En la Tabla 2, se muestran los estudios realizados por nueve autores asiáticos

y sudamericanos, ordenados del más reciente al más antiguo (2020 al 2009), destacando la aplicación directa del

método Fenton y las eficiencias alcanzadas en cada investigación.

Tabla 2

Eficiencias alcanzadas para el tratamiento de lixiviados por Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) por el método Fenton con aplicación directa, referidos por cada autor e investigación.

Autor/Año/País	Método	Eficiencia (%)
(Mahtab et al., 2020), India	Fenton	DQO: 61%
(Biglarijoo et al., 2017), Iran	Fenton	DQO: 95, 93 y 81%
(Medina et al., 2017), Perú	Fenton	DQO: 42%
(Lange et al., 2016), Brasil	Fenton	DQO: 75%
(Amiri & Sabour, 2014), Irán	Fenton	DQO: 69%
(Chen et al., 2013), China	Fenton	DQO: 85%
(Moravia et al., 2011), Brasil	Fenton	DQO: 76.7% Color Real: 76.4% Sustancias Húmicas: 50%
(Méndez et al., 2010), Colombia	Fenton	COT: 87% DQO: 78%
(Zhang et al., 2009), China	Fenton	DQO: 17.7- 81.4%

En la Tabla 3, se muestra los estudios realizados por 24 investigadores, ordenados según la antigüedad en forma descendente (2022 al 2002), resaltando la

aplicación combinada del método Fenton e indicando las eficiencias alcanzadas en cada caso particular.

Tabla 3

Eficiencias alcanzadas por Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) por el método Fenton con aplicación combinada referidos por cada autor y estudio desarrollado.

Autor/Año/País	Método	Eficiencia (%)
(Kucharska et al., 2022), Polonia	Microelectrólisis Interna (IME)/O ₃ /OH/H ₂ O ₂	DQO: 95.4% COT: 94.1% Color: 98.2%
(Gautam et al., 2019), India	Ozono-UV-H ₂ O ₂ -Electrocoagulación-Oxidación Electroquímica	DQO: 90% Color: 85%
(Seibert et al., 2019), Brasil	Fenton/Biológico	DQO: 82-98%
(Colombo et al., 2019), Brasil	Biológico/Foto-Fenton	DBO y DQO: 98%
(Méndez et al., 2019), México	Fenton/filtración/adsorción	DQO: 99.9% Color: 100% TSS: 83.5%
(San Pedro et al., 2019), México	Fenton/Adsorción	DQO, COT, Color, y N-Amoniacal: >99%
(Nercolini et al., 2019), Brasil	Fenton/Fenton-Like	Color (Fenton): 98.17% Color (Fenton-Like):70%.

(Sruthi et al., 2018), India.	Fenton Heterogéneo/ Electrofenton	Electro-Fenton(DQO): 7.5% Fenton Heterogéneo (DQO): 88.6%
(Jefferson et al., 2018), España.	Electrolisis/FeTiO ₃ /U V-LED	COT: 53%
(Paulo & Kerber, 2018), Brasil.	Ozono/Peróxido de Hidrógeno	DQO: 99.88% COT: 66% CI (Carbono Inorgánico): 23%
(Jung et al., 2017), EEUU.	Biológico/Fenton/ Ozonización	DQO: 50.8-64.3%
(Silva et al., 2016), Brasil.	Foto-Fenton	COD (Carbono Orgánico Disuelto): 79-77%
(Goi et al., 2015), Estonia.	Ozonización/Ozono- Peróxido de Hidrógeno/Fenton	Fenton/Ozonización (DQO): 77%
(Moraes da Costa et al., 2015),Brasil.	Fenton-Oscuro/Foto- Fenton	Fenton Oscuro (DQO): 56 y 19% Foto-Fenton (DQO):88 y 78%
(Silva et al., 2013), Portugal	Foto-Fenton/Oxidación Biológica	DQO: 86% Oxidación Química: 55% Oxidación Biológica: 31%
(Amr & Aziz, 2012), Malasia	Ozono/Peróxido de Hidrógeno	DQO: 65% Amonio: 12% Color: 98%.
(Moravia et al., 2011), Brasil	Fenton/Filtración	DQO: 76.7% Color real: 76.4%
(Wu et al., 2010). China	Coagulación/ Fenton/Filtración Aireada Biológica	DQO: 66% (20°C) y 69.3 (70 °C) Componentes Húmicos (HS): 85% (20°) y 91.5% (70°)
(Méndez et al., 2010), Mexico	Fenton/Adsorción	DQO: 98.9 Color: 100%
(Méndez et al., 2009), México	Coagulación- floculación, flotación,adsorción y oxidaciónFenton.	DQO: 78% Fenton (COT): 87%
(Wang et al., 2009). China	Coagulación/ Fenton/ Filtración Aireada Biológica	DQO: 56% Color.: <10 grados
(Pan et al., 2008), China	Ultrasonido/ Fenton	Color: 100% DQO: 73.5%
(Zhang et al., 2006). China	Electro Fenton	DQO: 81%
(Haapea et al., 2002), Finlandia	Ozonización con Peróxido de Hidrógeno/ Peróxido deHidrógeno + Biológico	Ozonización/H ₂ O ₂ (COT): 30-50% Ozonización- Biológico (COT):50-95%

Los diferentes métodos utilizados en el tratamiento de lixiviados estuvieron dirigidos, principalmente, hacia la remoción de materia orgánica refractaria disuelta o particulada, cuyos resultados finales como ya se indicó varían de acuerdo con el estudio realizado.

Discusión

Los lixiviados procedentes de los vertederos o rellenos sanitarios contienen compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica, donde muchos de ellos presentan características refractarias y difíciles de biodegradar, por ello la preocupación está encaminada en la degradación de estas sustancias recalcitrantes. Dentro de las técnicas aplicadas hasta el día de hoy los POAs, basados en el método Fenton, han demostrado alcanzar cierto grado de eficiencia para remover la materia orgánica disuelta y particulada (Moravia, 2011; Colombo, 2018).

Aplicación directa del método Fenton como POA

Con la finalidad de conocer los grados de eficiencias en el tratamiento de lixiviados, nueve investigaciones muestran los resultados obtenidos al aplicar de manera directa el método Fenton como sistema de tratamiento de lixiviados en la remoción de materia orgánica recalcitrante, no obteniendo necesariamente los mismos grados de eficiencia, asociado posiblemente a las características inherentes del efluente tratado.

Estadísticamente, de acuerdo con los resultados del diseño factorial utilizado

por Zhang et al., (2009), mostraron que el pH y la DQO, y la interacción entre el pH-DQO dieron efectos negativos, pero por el contrario la dosificación de Fe^{+2} y la relación H_2O_2/Fe^{+2} mostraron un efecto positivo, lo que demuestra la alta correlación que existe entre el oxidante y el catalizador, llegando a alcanzar eficiencias de hasta el 81.4% en la remoción de la DQO. Siguiendo la misma línea estadística en la evaluación por procesos Fenton, Mahtab et al. (2020) analizaron las condiciones operativas óptimas del sistema, donde se encontró que las mayores eficiencias se dieron a pH ácido de 3.1, alcanzando una eficiencia del 61 % de la DQO, así mismo se demostró que un incremento de oxidante no significa necesariamente alcanzar una mayor remoción de DQO, lo que también demuestra que existe un punto óptimo de máxima eficiencia, muy independientemente de la alta concentración del oxidante. La relación H_2O_2/Fe^{+2} , muestran una influencia significativa en la remoción de la DQO (Amiri & Sabour, 2014), donde se aprecia también que la relación DBO/DQO aumenta, lo que indica un incremento en la biodegradabilidad, alcanzando eficiencias del 69% de la DQO.

El proceso Fenton mostró un mejor tratamiento que la Ozonización (Biglarijoo et al., 2017), alcanzando una elevada degradación de Materia Orgánica Disuelta (DOM) tanto hidrófoba como hidrófila, obteniéndose resultados finales de eficiencia de 81%, 93% y 95% en relación con la DQO. Un factor importante que permita conocer la capacidad de biodegradación de los compuestos orgánicos es determinar la relación existente entre la DBO/DQO, conocido

como índice de biodegradabilidad, en esa línea de investigación algunos de los resultados obtenidos por Méndez et al. (2010) muestran que el tratamiento biológico resulta insuficiente para el control de lixiviados ya que el índice de biodegradabilidad (DBO/DQO) promedio resultó igual a 0.07, así mismo en el análisis, la relación DQOs/DQOt del lixiviado se determinó que el 96% de la materia orgánica se encuentra en forma disuelta, obteniéndose eficiencias con el método Fenton del 87% para COT y del 78% para DQO.

La aplicación del método Fenton también puede ser evaluado a través de otros indicadores como el Color y complementado por la DQO (Chen et al., 2013). Se recomienda su uso para una elevada degradación de lixiviados con resultados en pocos minutos. La acción de Fe^{+2} y H_2O_2 resultan importantes en la oxidación al formar los radicales Hidroxilo en niveles bajos, pero reducen su nivel de oxidación en elevadas concentraciones, es por ello que se sugiere encontrar la dosis óptima. Mediante este proceso se ha logrado alcanzar eficiencias del 85% con relación a la DQO.

Algunos estudios sugieren que el tratamiento Fenton presenta eficiencias importantes para ser utilizado como tratamiento preliminar en la remoción de compuestos orgánicos e inorgánicos (Lange et al., 2006), presentando ventajas operativas y flexibilidad para el control de variables, cuyos resultados alcanzan hasta el 75% de eficiencia para la DQO. Dentro de los POAs en general, aquellos basados en el reactivo Fenton (Moravia et al., 2011), han demostrado ser adecuados para el tratamiento de lixiviados con

características refractarias, llegando a obtener eficiencias importantes de remoción del 76.7 % para DQO, 76.4% para Color Real y 50% para sustancias húmicas; sin embargo, también demostraron que el método no es eficiente para otros parámetros como nutrientes, cloruros, alcalinidad y metales.

Eficiencias menores han sido reportados por otros investigadores (Medina et al., 2017), alcanzando remociones del 42%, indicando que la aplicación directa del método Fenton es una alternativa opcional y eficaz para el tratamiento de sustancias persistentes en lixiviados que puede ser aplicado también como post-tratamiento.

Aplicación combinada del método Fenton como POA

Con la finalidad de alcanzar mayores eficiencias en el tratamiento de lixiviados, 24 investigaciones muestran los resultados obtenidos al aplicar métodos combinados entre Fenton y otros complementarios como el Foto-Fenton, Electro-Fenton, Fenton- Adsorción y Ultrasonido-Fenton (Zhang et al., 2006; Pan et al., 2008; Méndez et al., 2010; Costa et al., 2015; Silva et al., 2016; Sruthi et al., 2018).

En esa línea de investigaciones, tenemos los resultados obtenidos en el proceso combinado Fenton/Adsorción (Méndez et al., 2010), los cuales indicaron una elevada eficiencia de remoción al concluir de manera secuencial el tratamiento aplicado, llegando a remover el Color al 100% y la DQO al 98.9 %, así mismo, al utilizar la combinación del método Ultrasonido/Fenton (Pan et al., 2008), el color también fue removido en

su totalidad, sin embargo, la DQO redujo su eficiencia al 73.5%, de los resultados experimentales obtenidos también se pudo apreciar que el proceso de ultrasonido/Fenton alcanzó tasas de eliminación de DQO y color más altas que los trabajados en forma individual, considerando las condiciones óptimas para los tres casos. En el estudio combinado de Foto-Fenton (Silva et al., 2016), se alcanzaron eficiencias importantes de remoción de Carbono Orgánico Disuelto (77-79%), pero con alto consumo de H₂O₂, por lo que se recomienda realizar una previa coagulación y floculación.

En el método combinado del proceso Electro-Fenton (Zhang et al., 2006), se demostró que se puede degradar de manera efectiva los componentes orgánicos (81% de la DQO), en un tiempo corto y adquiere una mayor eficiencia al incrementarse la corriente eléctrica y el reactivo Fenton, así como al optimizar la distancia entre los electrodos. En el caso del Electro-Fenton y Fenton-Heterogéneo (Sruthi et al., 2018), se demuestra que los dos procesos son eficientes, aumentando su biodegradabilidad considerablemente de 0.03 a 0.52, alcanzando el E-Fenton eficiencias del 87.5% para la DQO y Fenton-H el 88.6% para la DQO. Cabe mencionar que el requerimiento de dosificación del catalizador por el proceso Electro-Fenton justifica su factibilidad.

La aplicación de los métodos Fenton-Oscuro y Foto-Fenton (Costa et al., 2015) han mostrado buenas eficiencias de tratamiento, sin embargo, desde un punto de vista comparativo, el método Foto-Fenton tuvo mayor eficiencia en la degradación de la DQO (88 y 78%) y la toxicidad, observando la importancia

de los rayos UV solares para degradar materia orgánica recalcitrante y tóxica.

Por otro lado, algunas investigaciones han optado por realizar estudios que sean complementarios a los procesos Fenton como es el caso de aplicaciones de Coagulación / Fenton / Filtración Aireada Biológica, Ozonización con Peróxido de Hidrógeno/Peróxido de Hidrógeno + Biológico, Biológico/Fenton/Ozonización, Fenton/filtración/adsorción, Coagulación-floculación, flotación, adsorción y oxidación Fenton (Haapea et al., 2002; Wu et al., 2010; Silva et al., 2013; Jung et al., 2017; Méndez et al., 2019).

En estos últimos estudios, se combinan los procesos por etapas secuenciales para tratar de alcanzar las mayores eficiencias posibles, así tenemos, la aplicación del sistema Coagulación/Fenton/Filtración Aireada Biológica (Wu et al., 2010), donde se alcanzan diferentes resultados de acuerdo con las temperaturas trabajadas de 20°C y 70°C. Los resultados obtenidos por separado entre la DQO y los Componentes Húmicos (HS), indicaron que se alcanza una buena remoción a temperatura ambiente (20 °C), hasta un 66% de DQO y 85% de HS; y una concentración ferrosa moderada, sin embargo, la máxima eficiencia se llega a obtener cuando alcanza una temperatura de 70 °C, removiéndose hasta un 66% de DQO y 85% de HS.

Los resultados combinados de una pre-ozonización (Haapea et al., 2002) con un sistema biológico mostraron las mayores eficiencias que las trabajadas individualmente (Ozonización, COT: <40%, Ozonización-Biológico, COT:

50-95%). En tal sentido, se propone complementar con un proceso biológico como tratamiento final. Así mismo, los sistemas combinados de Ozono con Peróxido de Hidrógeno no mostraron cambios significativos después de la Ozonización.

En analogía con el anterior sistema aplicado la combinación del proceso Biológico/Fenton/Ozonización (Jung et al., 2017) mostraron resultados de remoción de

DQO entre el 50.8 al 64.3%, posterior a un pretratamiento biológico. El proceso Fenton exhibió un mejor rendimiento que la ozonización en sus respectivas condiciones óptimas, debido a que los radicales OH podían descomponer eficientemente, tanto la materia orgánica disuelta (DOM) hidrófoba como hidrófila, pero el O₃ tiende a oxidar selectivamente compuestos hidrofóbicos solos.

La combinación del Foto-Fenton demostró una alta eficiencia al ser complementada con la Oxidación Biológica (Silva et al., 2013), pero se vio afectada en la primera fase por la presencia de sólidos en suspensión, motivo por el cual se requirió de mayores concentraciones de H₂O₂ y energía para degradar la materia orgánica particulada. Otro factor limitante fue las bajas temperaturas de trabajo lo que provoca bajas tasas de reacción. Los resultados finales indicaron que la DQO total removida fue del 86%, correspondiendo el 55% a la Oxidación Química y el 31% a la Oxidación Biológica.

La aplicación combinada de Fenton/Filtración/Adsorción (Méndez et al.,

2019), mostraron resultados altamente eficientes en la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (99%), Color (100%) y Sólidos Suspendidos Totales (83.5%), asociado posiblemente a su gran capacidad oxidativa y complementado con la filtración y Adsorción.

Conclusiones

La composición de los lixiviados contiene sustancias recalcitrantes que los métodos de tratamiento biológicos no llegan a remover eficientemente, debido a su complejidad, toxicidad y variada estructura de formación.

Dentro de los componentes orgánicos en el tratamiento de los lixiviados, las sustancias húmicas y fúlvicas son identificadas como las más recalcitrantes a ser removidas, debido a su complejidad para ser biodegradadas.

La aplicación del método Fenton de manera directa para el tratamiento de lixiviados alcanza promedios de remoción que varía entre 42 y 85% de la DQO, lo que demuestra la elevada eficiencia del sistema.

La aplicación combinada de Ultrasonido/Fenton, ElectroFenton, Fenton Heterogéneo/ElectroFenton, Fenton/Ozonización, Fenton Oscuro/Fotofenton, Ozono/Peróxido de Hidrógeno alcanzaron las mayores eficiencias de remoción entre 65 y 99.88% de la DQO.

La relación H₂O₂/Fe⁺² mostró un efecto positivo en la remoción de materia orgánica, lo que demuestra la alta correlación que existe entre el oxidante y

el catalizador. Así mismo, la totalidad de los estudios demostraron que los mejores niveles de pH para la remoción de la DQO estuvieron en medio ácido (alrededor de tres), mejorando sustancialmente en todos los casos el índice de biodegradabilidad.

El método Fenton puede ser utilizado como un pre o post tratamiento, a fin de reducir la carga orgánica recalcitrante, y complementado en el mejor de los casos con un tratamiento biológico.

Referencias

- Amiri, A. & Sabour, M.R. (2014). Multi-response optimization of Fenton process for applicability assessment in landfill leachate treatment. *Waste Management*, 34(12), 2528-2536. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.010>
- Amr, S.S.A. & Aziz, H.A. (2012). New treatment of stabilized leachate by ozone/Fenton in the advanced oxidation process. *Waste Management*, 32(9), 1693–1698. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.009>
- Biglarijoo, N., Ahmad, S., Bagheri M. & Ehteshami, M. (2017). Assessment of effective parameters in landfill leachate treatment and optimization of the process using neural network, genetic algorithm and response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 106, 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.12.006>
- Colombo, A., Modenes, A.N., Goes, D.E., Giordani da Costa, S.I., Borba, F.H. & Espinoza, F.R. (2018). Treatment of sanitary landfill leachate by the combination of photo Fenton and biological processes. *Journal of Cleaner Production*, 214, 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.310>
- Costa, F.M.D., Campos, J.C., Fonseca, F.V.D. & Bila, D.M. (2015). Tratamiento de lixiviados de aterros de residuos sólidos utilizando Processos Fenton e Foto-Fenton Solar. *Revista Ambiente & Água*, 10, 107-116. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1483>
- Chen, Y., Liu, C., Nie, J., Wu, S. & Wang, D. (2013). Removal of COD and decolorizing from landfill leachate by Fenton's reagent advanced oxidation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, 189–193. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0627-1>
- Christensen, T., Kjeldsen, P., Bjerg, P., Jensen, D., Christensen, J., Baun, A., Albrechtsen, H. & Heron, G. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 16 (7-8), 659-718. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)
- Ding, A., Zhang, Z., Fu, J. & Cheng, L. (2001), Biological control of leachate from municipal landfills, *Chemosphere*, 44 (1), 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00377-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00377-5)
- Espinosa, M. del C., López, M., Pellón, A., Robert, M., Díaz, S., González,

- A., Rodríguez, N., Fernández, A. & Hernández, C. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la Ciudad de La Habana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(4), 313-325. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000400006&lng=es&tlng=es.
- Gagneten, A.M., Plá, R.R., Regalado, L.M. & Paggi, J.C. (2009). Assessment of Bioconcentration Factor of Chromium by Instrumental Neutron Activation Analysis in *Argyrodiaptomus falcifer* Daday, a Subtropical Freshwater Copepod. *Water, Air and Soil Pollution*, 204(1-4), 133-138. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-009-0032-x>
- Gautam, P., Sunil Kumar, S. & Lokhandwala, S. (2019). Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117639>.
- Goi, A., Veressinina, Y. & Trapido, M. (2009). Combination of Ozonation and the Fenton Processes for Landfill Leachate Treatment: Evaluation of Treatment Efficiency. *Ozone: Science & Engineering*, 31(1), 28-36. <https://doi.org/10.1080/01919510802582011>
- Gomes, L.P. & Schoenell, E.K. (2018). Aplicação de ozônio e de ozônio+ peróxido de hidrogênio para remoção de compostos recalcitrantes em lixiviados de aterros sanitários. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23(01), 113-124. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018155758>
- Haapea, P., Korhonen, S. & Tuhkanen, T. (2002). Treatment of industrial landfill leachates by chemical and biological methods: ozonation, ozonation + hydrogen peroxide, hydrogen peroxide and biological post-treatment for ozonated water. *Ozone: Science & Engineering*, 24(5), 369-378, <https://doi.org/10.1080/01919510208901627>
- Hirata, R. (2002). Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 2, 81-90. <https://revistas.ufpr.br/hidrogeologia/article/view/2624>
- Jung, Ch., Deng, Y., Zhao, R. & Torrens, K. (2017). Chemical oxidation for mitigation of UV-quenching substances (UVQS) from municipal landfill leachate: Fenton process versus ozonation. *Water Research*, 108(1), 260-270. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.005>
- Kucharska, M.A., Mirehbar, S. & Ładynska, J.A. (2022). Novel combined IME- O₃/OH- /H₂O₂ process in application for mature landfill leachate treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102441. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102441>.

- Lange, L. C., Alves, J. F., Santos, M.C. & Rodriguez, W. (2006). Tratamiento de lixiviado de aterro sanitario por proceso oxidativo avanzado empregando reagente de Fenton. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 11(2), 175-183. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522006000200011>
- Mahtab, M.S., Islam, D.T. & Farooqi, I. H. (2020). Optimization of the process variables for landfill leachate treatment using Fenton based advanced oxidation technique. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 24, 428–435. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098620312234>
- Medina, C.J., Montero del Águila, E.M. & Cruz, L.E. (2017). Optimización del Proceso Fenton en el tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(4), 454-466. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371950010007>
- Méndez, R.I., Castillo, E.R., Sauri, M.R., Quintal, C.A., Giacomán, G. & Jimenez, B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 133-145. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37012012002>
- Méndez, R.I., Pietrogiovanna, J.A., Santos, B., Sauri, M.R., Giacomán, G. y Castillo, E.R. (2010). Determinación de la dosis Óptima de Reactivo Fentón en un tratamiento de Lixiviados por Fenton-Adsorción. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(3), 211-220. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37014384004>
- Méndez, R.I., May, A.A., San Pedro, L., Rojas, M.N. & Giacomán, G. (2019). Leachate Treatment with a combined fenton/ filtration/adsorption processes Tratamiento de lixiviados con una combinación de procesos Fenton/ filtración/adsorción. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(2), 1-9. <http://dx.doi.org/10.22201/ fi.25940732e.2019.20n2.013>
- Méndez, R.I., García, R.B., Castillo, E.R. & Sauri, M.R. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. *Ingeniería e Investigación*, 30(1), 80-85. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64312498015>
- Moravia, W.G., Lange, L.C. & Santos, M.C. (2011). Avaliação de processo oxidativo avançado pelo reagente de fenton em condições otimizadas no tratamento de lixiviado de aterro sanitario com ênfase em parâmetros coletivos e caracterização do lodo gerado. *Quimica Nova*, 34(8), 1370-1377. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000800014>
- Moravia, W.G., Lange, L.C. & Santos, M.C. (2011). Avaliação da microfiltração para remoção do lodo gerado no processo oxidativo avançado empregando o reagente de Fenton no tratamento de lixiviado de aterro sanitario. *Engenharia Sanitaria y Ambiental*, 16(4), 379-386. <https://www.scielo.br/j/esa/a/tckTd3KD3FhZ9gXpyVRfV5s/abstract/?lang=pt>

- Nercolini, J., Hoefling, D., Trevisan, V. & Skoronski, E. (2019). Application of the Fenton and Fenton-like processes in the landfill leachate tertiary treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5). 103352. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103352>
- Pan, Y., Zheng, H., Li, D. & Gou, Q. (2008). Degradation of organics in landfill leachate by ultrasound/Fenton process. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2(4): 445-449. <http://hjhx.rcees.ac.cn/en/article/id/20080403>
- San Pedro, L., Méndez, R.I., Hernández, E., Giácoman, G. & Bassama, A. (2019). Removal of BPA from Landfill Leachates using Fenton - Adsorption Process. *Química Nova*, 42(4), 418-424. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170354>
- Seibert, D., Quesadaa, H., Bergamascoa, R., Borba, F. H. & Pellenz, L. (2019). Presence of endocrine disrupting chemicals in sanitary landfill leachate, its treatment and degradation by Fenton based processes: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 131, 255–267. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582019315101>
- Silva, J.O., Silva, V.M., Cardoso, V.L., Machadoa, A.E. & Trovó, A.G. (2016). Treatment of Sanitary Landfill Leachate by Photo-Fenton Process: Effect of the Matrix Composition. *Journal of Brazilian Chemical Society*, 27(12), 2264-2272. <http://dx.doi.org/10.5935/0103-5053.20160120>
- Silva, T.F., Silva, M.E.F., Cunha-Queda, A. C., Fonseca A., Saravia, I., Boaventura, R. A. & Vilar V. J. (2013). Sanitary landfill leachate treatment using combined solar photo-Fenton and biological oxidation processes at pre-industrial scale. *Chemical Engineering Journal*, 228, 850–866. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.060>
- Silva, T.F., Fonseca, A., Saravia, I., Boaventura, R.A. & Vilar, V.J. (2016). Scale-up and cost analysis of a photo-Fenton system for sanitary landfill leachate treatment. *Chemical Engineering Journal*, 283, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.063>.
- Silveira, J.E., Zazo, J.A., Pliego, G. & Casas, J.A. (2018). Landfill leachate treatment by sequential combination of activated persulfate and Fenton oxidation. *Waste Management*, 81, 220-225. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18306172>
- Sruthi, T., Gandhimathi, R., Ramesh, S. T. & Nidheesh, P. V. (2018). Stabilized Landfill Leachate Treatment using Heterogeneous Fenton and Electro Fenton Processes. *Chemosphere*, 210, 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.172>

- Wang, X., Chen, S., Gu, X. & Wang, K. (2009). Pilot study on the advanced treatment of landfill leachate using a combined coagulation, fenton oxidation and biological aerated filter process. *Waste Management*, 29(4), 1354-1358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.006>
- Wu, Y., Zhou, S., Qin, F., Peng, H., Lai, Y. & Lin, Y. (2010). Removal of humic substances from landfill leachate by Fenton oxidation and coagulation. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(4), 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.03.002>.
- Zhang, H., Zhang, D. & Zhou, J. (2006). Removal of COD from landfill leachate by electro-Fenton method. *Journal of Hazardous Materials*, 135 (1-3), 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.025>
- Zhang, H., Zhang, D. & Zhou, J. (2009). Multivariate approach to the Fenton process for the treatment of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 161 (2-3), 1306-1312. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.126>