

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE OZONO EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS PARA REDUCIR COMPUESTOS ORGÁNICOS TOTALES EN EL VERTEDERO DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS EN CAJAMARCA-PERÚ”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Forma: Artículo científico

Autor:

Irene Salome Romero Tucto

Asesor:

Mg. Ing. Julián Ricardo Diaz Ruiz

<https://orcid.org/0000-0002-1870-6648>

Cajamarca - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	JULIAN RICARDO DIAZ RUIZ	09294063
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Juan Carlos Flores Cerna	18898536
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Maryuri Yohana Vega Eras	40731433
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

INFORME DE SIMILITUD

“APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE OZONO EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS PARA REDUCIR COMPUESTOS ORGÁNICOS TOTALES EN EL VERTEDERO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN CAJAMARCA-PERÚ”

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	visorsig.oefa.gob.pe Fuente de Internet	1 %
2	www.minam.gob.pe Fuente de Internet	1 %
3	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	1 %
4	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	1 %
5	revistas.sqperu.org.pe Fuente de Internet	1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

DEDICATORIA

Dedico esta obra a mi Mamá Rosita que está en el cielo, a mi Papá Antonio, a mis hermanos Juan Julio, Felicitas, Joel, Evert y a mi adorado hijo Yeyson, quienes son la inspiración para seguir adelante, sirviendo de ejemplo a seguir adelante a pesar de las adversidades, hasta alcanzar sus metas.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento, en especial a la Universidad Privada del Norte, por permitir adquirir los conocimientos necesarios a lo largo de estos años para ser una gran profesional.

A mis profesores, profesoras y compañeros por brindarme todo su conocimiento y apoyo.

A mi familia y en especial a mi hijo.

A todos gracias infinitamente.

Tabla de Contenido

JURADO EVALUADOR.....	2
INFORME DE SIMILITUD.....	3
<i>DEDICATORIA</i>	4
<i>AGRADECIMIENTO</i>	5
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	8
<i>RESUMEN</i>	9
<i>ABSTRACT</i>	10
<i>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</i>	11
1.1. Realidad problemática	11
1.2. Antecedentes	12
1.3. Justificación	14
<i>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA</i>	15
1.1. Tipo de investigación	15
1.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)	15
1.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	16
1.4. Procedimiento	17
<i>CAPÍTULO III: RESULTADOS</i>	18
2.1. Características hidrogeológicas, climáticas, atmosféricas que afectan al vertedero de residuos sólidos urbanos de Cajamarca.	18
2.2. Caracterizar según los parámetros fisicoquímicos el tipo de lixiviados que se encuentran en el vertedero de Cajamarca	21
2.3. Aplicar la técnica de ozono como tratamiento para lixiviados provenientes del vertedero urbano de Cajamarca	24
2.4. Estimar la reducción de compuestos orgánicos totales una vez aplicado la tecnología de ozono para el tratamiento de lixiviados en el vertedero	27
<i>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</i>	31
2.5. Discusión	31
2.6. Conclusiones	32
<i>REFERENCIAS</i>	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas UTM del vertedero de residuos sólidos de Cajamarca	19
Tabla 2. Condiciones climáticas y ambientales	21
Tabla 3. Caracterización de los lixiviados	22
Tabla 4. Criterios de clasificación de los lixiviados	23
Tabla 5. Clasificación de los lixiviados del vertedero de residuos sólidos de Cajamarca	23
Tabla 8. Reducción de los componentes biológicos de los lixiviados tratados	28
Tabla 7. Cumplimiento de los LMP de los compuestos biológicos.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del vertedero de residuos sólidos de Cajamarca	18
Figura 2 Ubicación del pozo de lixiviados	19
Figura 3. Ubicación del pozo de lixiviados	20
Figura 4. Cuerpos de agua circundantes del vertedero de residuos sólidos de Cajamarca	20
Figura 5. Toma de muestra de lixiviados	22
Figura 6. Pasos del tratamiento de ozono	24
Figura 7. Inicio del proceso de tratamiento de los lixiviados	25
Figura 8. Equipo generador de ozono	25
Figura 9. Aplicación del ozono al lixiviado (1 de 2).....	26
Figura 10. Aplicación del ozono al lixiviado (2 de 2)	26
Figura 11. Cambio de color del lixiviado	27
Figura 11. Identificación de las muestras	27
Figura 13. Porcentaje de parámetros que cumple los LMP del MINAM	29

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo “Aplicar la Tecnología de Ozono en el tratamiento de lixiviados para reducir compuestos orgánicos totales en el vertedero de residuos sólidos urbanos en Cajamarca”. Se realizó una investigación tipo aplicada, de nivel experimental. La población estuvo representada por los lixiviados proveniente del vertedero urbano de Cajamarca. Dentro de los resultados más resaltantes se encontró que la topografía del terreno incrementa la posibilidad de escorrentías hacia el vertedero, poniendo en riesgo los cuerpos de agua cercanos, así como el suelo y el ambiente. Los parámetros fisicoquímicos y biológicos superan los límites máximos permitidos, la aplicación de la técnica del ozono se realizó utilizando un equipo portátil donde se evidenció una mejora en las concentraciones de los parámetros orgánicos entre un 32% a un 5%, siendo en el DQO donde se logró la mayor reducción (de 1,031.3 mg/l a 702.5 mg/l). En referencia al color verdadero del agua, se lograron una mejora del 54% evidenciado en un agua más clarificada. Por último, los parámetros biológicos representados por los coliformes totales logran una reducción significativa. El tratamiento con ozono logro la eliminación de los agentes biológicos al reducirlos a un del 99.9%.

PALABRAS CLAVES: Vertedero sanitario, Técnica Ozono, compuestos orgánicos.

ABSTRACT

The objective of this research was to "Apply Ozone Technology in the treatment of leachates to reduce total organic compounds in the solid urban waste landfill in Cajamarca". An applied research was carried out at an experimental level. The population was represented by the leachates coming from the urban landfill of Cajamarca. Among the most outstanding results, it was found that the topography of the terrain increases the possibility of runoff into the landfill, putting at risk the nearby water bodies, as well as the soil and the environment. The physicochemical and biological parameters exceed the maximum allowable limits. The ozone technique was applied using portable equipment and showed an improvement in the concentrations of organic parameters of between 32% and 5%, with the greatest reduction in COD (from 1,031.3 mg/l to 702.5 mg/l). In reference to the true color of the water, an improvement of 54% was achieved, evidenced by a more clarified water. Finally, the biological parameters represented by total coliforms achieved a significant reduction. Ozone treatment achieved the elimination of biological agents by reducing them to 99.9%.

Key words: Sanitary landfill, Ozone technique, organic compounds.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Realidad problemática

Los altos índices de contaminación que presenta los cuerpos de agua en los últimos años debido a la recepción de efluente de los lixiviados de los rellenos sanitarios han generado cada vez más preocupaciones en todo el mundo debido al impacto ambiental que estos ocasionan [1]. Esto gracias al crecimiento de la economía y el nivel de vida ha acelerado el desarrollo y los avances de la tecnología que cada vez generan más desperdicios.

La falta de aplicación de la normativa en países subdesarrollados ha proliferado la disposición inapropiada de desperdicios los cuales a su vez genera la producción de lixiviado el cual es liberado por los desechos municipales con grandes cantidades de componentes tóxicos y no biodegradables, incluidas sustancias orgánicas e inorgánicas, y que deben ser tratados para minimizar su impacto ambiental [2].

Son muchos los tratamientos que gracias a los avances de la tecnología se han logrado crear, los cuales han logrado disminuir y en ocasiones eliminar de manera satisfactoria el índice de peligrosidad [3]. El lixiviado proveniente de relleno sanitario se genera comúnmente como resultado del agua producto de la precipitación, la escorrentía superficial y la infiltración o intrusión de agua subterránea que se filtra a través del relleno [4].

Las características de los lixiviados según [2] son determinadas en gran medida por la ubicación, el diseño y los medios de operación del relleno sanitario, y también dependerá del estado de biodegradación de los residuos a lo largo del tiempo. En los últimos años se han propuesto y sugerido tecnologías avanzadas de oxidación, incluida la ozonización, como un enfoque auxiliar o alternativa para el manejo de los lixiviados de vertederos, demostrando un alto índice de eficacia para eliminar o reducir mediante procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) mejorando considerablemente el manejo de vertedero [5].

Es por ello, que la presente investigación surge como iniciativa de aplicar la tecnología de ozono como una alternativa de tratamiento de lixiviados con la finalidad de reducir los compuestos orgánicos totales en el vertedero de residuos sólidos urbanos de Cajamarca. Dicha temática ha sido de interés de diversos autores los cuales sirvieron de antecedentes como se detallan a continuación:

Antecedentes

Según [6], de la India, realizaron una investigación cuyo objetivo principal fue evaluar la idoneidad del ozono y el peróxido (O₃+ H₂O₂) basados en procesos de oxidación avanzada (AOP) utilizados en el tratamiento de lixiviados de RSU de vertederos abiertos. Realizaron una investigación aplicada, con un diseño experimental. Los resultados más importantes el efecto del tiempo de reacción, impacto de O₃ dosis y H₂O₂ concentración en la eficiencia de la eliminación de DQO, esta mejora la biodegradabilidad del lixiviado y cambio el pH. También se encontró que la eficiencia máxima de eliminación de DQO fue del 46% y el 82% con ozono solo (3975 mg / L) y con ozono (9275 mg / L) + 50 mg / L H₂O₂ cada uno con 120 min de tiempo de reacción. También se encontró que la DBO₅ y la relación DQO / DQO se incrementó de 0,09 a 0,58 en el nivel óptimo de O₃ + 50 mg / L H₂O₂. Los autores llegaron a la conclusión que el tratamiento ofrecido es un método eficaz para aumentar la biodegradabilidad.

También [7], realizaron una investigación cuyo objetivo fue comparar la eficiencia del color y la eliminación de DQO de lixiviados de vertedero investigando diferentes parámetros operativos. Los resultados reflejan que el tratamiento con =3/H₂O₂ US/H₂O₂, O₃/Fe²⁺/H₂O₂ US/Fe²⁺/H₂O₂ fue efectivo debido a la sinergia que se dio en el proceso, alcanzo una efectividad de eliminación de color y DQO de 100% y 95% respectivamente, con baja energía por pedido (1.20 kWh/m³), el índice de sinergia entre O₃ y US / Fe²⁺/H₂O₂ fue de 18,5% lo cual confirma que el proceso podría eliminar los contaminantes de cualquier industria.

Asimismo [8], elaboraron una tesis cuyo objetivo fue realizar una propuesta de tratamiento que garantice el cumplimiento de la normativa vigente en la ciudad de Guanabacoa se realizó una investigación experimental, se aplicó para el cálculo de lixiviado un balance hidrológico considerando todas las corrientes que afectan al vertedero. Los resultados obtenidos evidencian que existe una gran variabilidad debido principalmente a la falta de impermeabilización de los vertederos. Los lixiviados poseen una alta concentración de compuestos orgánicos, sólidos disueltos y microorganismos patógenos. La propuesta se caracterizó por contar con un tanque séptico, filtro anaerobio, laguna facultativa y laguna de maduración con la finalidad de garantizar el cumplimiento de la norma NC27:2012.

En la investigación realizada por [9], realizaron una propuesta metodológica para el muestreo de lixiviados en rellenos sanitarios operativos. Realizaron una investigación exploratoria, obteniendo como resultados más significativos la elaboración de una propuesta metodológica debido a que hasta la actualidad no existe un método o protocolización de manera estandarizada para muestreo de lixiviados en vertederos sanitarios que ayude a la fiscalización ambiental por la OEFA. Se aplicó una investigación cualitativa y cuantitativa, con un diseño descriptivo. Como resultados se obtuvo la información pertinente tanto a nivel nacional como internacional para sistematizarla y clasificarla para sustentar la propuesta. Dentro de los aspectos que se consideraron se encuentran: los parámetros a monitorear, equipos de medición, extracción y preservación de las muestras y la cadena de custodia procediendo a ejecutar una prueba piloto.

Mientras que [10], en el Perú, elaboró una tesis sobre el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira por electrocoagulación, se realizó una investigación experimental, muestreo para analizar los parámetros de pH, DBO₅, DQO realizó un muestreo y análisis de lixiviados en el botadero de San José en Andahuaylas. El muestreo de lixiviados fue realizado siguiendo las recomendaciones del Protocolo de Toma de Muestras de Aguas Residuales de Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Amazonia de Colombia. Para su realización se tomaron muestras simples de los puntos según lo recomendado por dicho documento según lo señalado por la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 brindando como resultados parámetros de diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura los cuales servirán de referencia para futuras investigaciones.

Según [11], publicaron un artículo científico, en la Revista de la Sociedad Química del Perú, donde presentaron un estudio de optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios de Huancayo – Perú, para su evaluación el proceso de Fenton se utilizó el diseño de Box – Behnken y la metodología de superficies de respuesta. Los resultados más destacados en época de lluvia fueron (pH=3,19, FeSO₄= 1645,55 mg/L) en época de estiaje ((pH=3,26, FeSO₄ = 1788,61 mg/L y H₂O₂). El porcentaje de biodegradabilidad fue 0,568 en época de lluvia y 0,329 en época de estiaje. Así mismo el porcentaje de eliminación de DQO fue de 42% en las dos épocas, concluyendo que el Fenton es un tratamiento

eficaz de sustancias persistentes en lixiviados y es factible ser aplicado como post-tratamiento.

Para [12], de la Universidad Privada de Antonio Guillermo Urrelo de Cajamarca, elaboraron una tesis cuyo objetivo fue evaluar la efectividad del tratamiento aplicado a lixiviado y la disposición de los residuos sólidos. Se realizó una investigación aplicada, con un diseño pre-experimental donde se llevó un control mínimo de la variable de estudio. Los resultados de DBO5 superaron en 11% los estándares de la calidad normados según decreto en la Poza 1, en cuanto al pH los parámetros de las tres pozas superan los establecidos en la normativa vigente, al igual que DQO supero en más de 92% en las tres pozas indicando como conclusión que el vertedero no cumple con la normativa.

Finalmente [13], de la Universidad Nacional de Cajamarca realizó una tesis cuyo objetivo fue evaluar el riesgo ambiental mediante la caracterización de dichos lixiviados determinando su carga tóxica. Se desarrolló una investigación de tipo aplicada, que la concentración de los parámetros tanto físicos, químicos y biológicos superaron los límites máximo establecidos, especialmente los metales pesados.

Justificación

El lixiviado de los vertederos, es altamente contaminantes, y no solo causa problemas de salud, sino que contamina el ambiente, los ríos, mares, suelos entre otros [1], La presente investigación se justifica porque, es importante evaluar el tipo de contaminación que predomina en el vertedero para proponer métodos de tratamiento adecuados que ayuden a evitar la contaminación del ambiente, utilizando tratamientos avanzados para su eliminación o disminución de contaminantes [5]. Debido a que en los vertederos no cuentan con procedimientos rigurosos y estandarizados que garanticen el fiel cumplimiento de la normativa vigente [14]. Llegando a la conclusión que el manejo de lixiviados en la planta de Cajamarca es significativo.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

1.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, ya que se caracteriza por la aplicación de conocimiento científico en una realidad concreta y ponerlo en práctica [15]. En este sentido, en la presente investigación se pretende la implementación y sistematización de la tecnología de ozonización como tratamiento alternativo para reducir compuestos orgánicos totales en lixiviados provenientes del vertedero urbano de Cajamarca, 2022. El diseño de la investigación es experimental, sustentado en lo que señala [15], que una investigación experimental permite la comparación de dos o más variables, por lo cual se debe llevar un control riguroso de cada una de ellas. En este sentido en la presente investigación se plantea controlar y manipular la variable independiente que son la aplicación del ozono para reducir los compuestos orgánicos totales en lixiviados provenientes del vertedero urbano de Cajamarca.

Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

La población estuvo representada por los lixiviados proveniente del vertedero urbano de Cajamarca ubicado en el caserío San José de Canay, distrito de Jesús km 13 carretera Cajamarca-Namora, sector Cochambul.

Los Criterios de Inclusión que se considerarán serán los siguientes aspectos:

- Tamaño, edad y futuras expansiones del vertedero
- Naturaleza de los residuos que se acumulan y su contenido en humedad
- Regulaciones y normativa legal que aplican a la zona
- Posibilidad de verter a un cuerpo acuático o a la red de saneamiento

Muestreo y análisis de lixiviados

El **muestreo** se realizó mediante la toma de porciones de lixiviado en el vertedero de residuos sólidos urbanos de Cajamarca, durante el mes de mayo del 2022. Para ello se realizará una visita de campo para el reconocimiento del vertedero, y la selección de los sitios específicos de los puntos que serán muestrados, dicha selección se realizó de acuerdo al Protocolo de Toma de Muestras de Aguas Residuales de [16], que señala algunas orientaciones para el muestreo de lixiviados, parámetros y la preservación de las muestras. De igual se considera la forma de selección de los puntos de monitoreo y la toma de una muestra simple por cada punto se realizó según lo recomendado por dicho documento.

Tomando en cuenta que la "calidad y cantidad del lixiviado se verá afectado debido a las características geológicas de la ubicación del vertedero, las condiciones meteorológicas, la superficie del lugar de disposición y el suelo subyacente, los procedimientos de operación y los tratamientos a los que se someten a los residuos estarán condicionados a los resultados del diagnóstico inicial" [17].

Además, Señala [18] que se debe considerar para determinar la calidad del lixiviado, el estado de degradación de los residuos, es decir, en la etapa de fermentación en el que se encuentra o la edad del vertedero, así como sus procesos físicos, químicos y Biológicos. Mientras que la cantidad de lixiviado según lo señalado por [19], va depender de la disponibilidad del agua y de las condiciones atmosféricas presentes en el lugar, sin embargo, señala como un dato referente que en condiciones normales se toma una muestra de agua cada 20 minutos, durante un lapso de tiempo de 5 horas.

Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Para recolectar la información se aplicará como técnica de la observación directa, para lo cual se utilizará como instrumento una Ficha de Recolección de Datos (Ver anexo 1). El mismo es adaptado de [20], y ajustado a los requerimientos de la normativa vigente lo cual lo hace un instrumento confiable.

Para el análisis se incluirá como mínimo los siguientes parámetros:

Parámetros a monitorear según la normativa D.S. N°015 – MINAM - 2015

- Demanda biológica de oxígeno (DBO)
- Demanda bioquímica de oxígeno (DQO)
- pH
- Sólidos Totales

Materiales y Equipos

- Equipos de medición
- Generador de ozono CEFCC
 - Potencia: 120 W
 - Flujo de aire 40 l/min
 - Salida de ozono: 20 g/H
 - Micro burbujeador.
- Extracción de las muestras
- Preservación de las muestras

Procedimiento

El muestreo será realizado según lo establecido en el Protocolo de Monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua-DGCRH. El protocolo señala los lineamientos generales y las recomendaciones para el muestreo y determinar los parámetros necesarios.

- Se seleccionaron los puntos de monitoreo para recolectar una muestra por cada punto as para la caracterización de los parámetros del lixiviado las cuales serán transportadas en un cooler, para posteriormente ser refrigerados y fueron analizadas de inmediato una vez llegado al laboratorio.
- Para mayor seguridad las tapas serán fijados con cinta adhesiva para evitar un posible derrame de lixiviado durante el traslado.
- Los recipientes fueron identificados antes de la toma de muestra con una etiqueta, escrita legible la cual será protegida con cinta adhesiva transparente.
- Para la realización de los ensayos de ozono, se utilizó una máquina generadora de ozono portátil, ajustable, 5SQY, 500mg, con capacidad de 10 g/h, 10 gramos. 10G AC200V-AC240V
- Prueba de oxidación con ozono. (Cada 20 minutos se tomaron datos de color por un tiempo aproximado de 80 minutos, de igual manera del olor).

Prueba	Dosis de Ozono	% Rem. Color min. 20	% Rem. Color min. 40	% Rem. Color min. 60	% Rem. Color min. 80	Olor min. 80
1	9,3 mg/l					
Replica	9,3 mg/l					
2	9,3 mg/l					
Replica	9,3 mg/l					
3	9,3 mg/l					
Replica	9,3 mg/l					

Fuente: Adaptado de Blandon & Marín, (2015)

CAPÍTULO III: RESULTADOS

Resultados

1.1. Características hidrogeológicas, climáticas, atmosféricas que afectan al vertedero de residuos sólidos urbanos de Cajamarca.

El vertedero de residuos sólidos urbanos que atiende a la localidad de Cajamarca se encuentra ubicado en el distrito Llacanora, a las afueras de la ciudad.



Figura 1 Ubicación del vertedero de residuos sólidos de Cajamarca

Se ubica aproximadamente a 15.5 kilómetros al sureste de la ciudad de Cajamarca, el cual es accesible a través de la carretera nacional 3N. Específicamente, se ubica en las siguientes coordenadas.

Tabla 1.

Coordenadas UTM del vertedero de residuos sólidos de Cajamarca

Norte	Este
9201511	788354

Estas instalaciones de manejo y disposición de residuos sólidos cuentan con pozo de lixiviados para recolectar las aguas contaminadas y lixiviados que se puedan generar dentro de las operaciones propias del vertedero. Se localiza al este de la planta.



Figura 2 Ubicación del pozo de lixiviados

Nota: Fuente: Google Earth



Figura 3. Ubicación del pozo de lixiviados

El pozo es de construcción superficial rectangular, con una tubería de PVC de 4 pulgadas, la cual, recolecta las aguas residuales, escorrentías y lixiviados generados en el vertedero de residuos sólidos. En sus cercanías, existen cuerpos de agua que pueden verse afectados, en caso de que, se pierda la contención de las estas aguas contaminadas. La figura 4 muestra la ubicación de los cuerpos de agua con respecto a la planta de residuos sólidos.

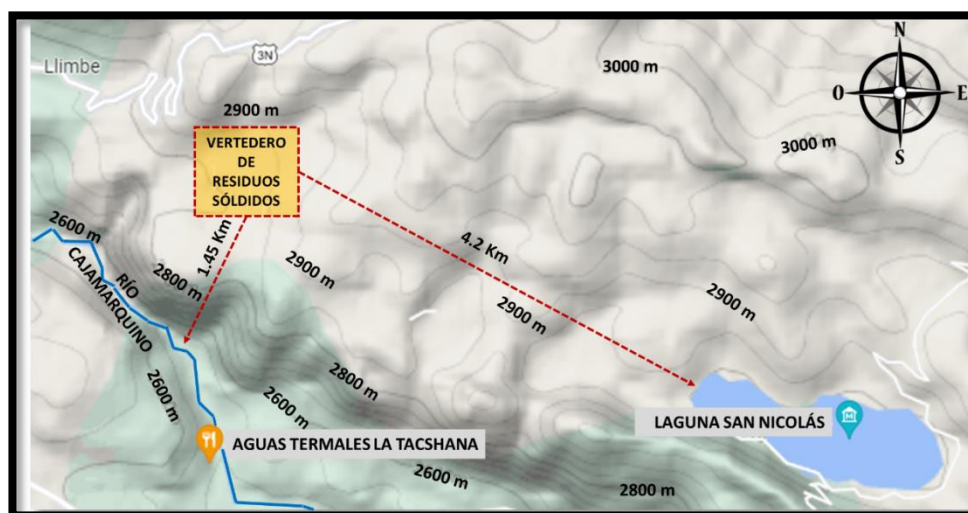


Figura 4. Cuerpos de agua circundantes del vertedero de residuos sólidos de Cajamarca

Hacia el sur del vertedero se encuentra ubicado el río Cajamarquino, aproximadamente a 1.45 kilómetros de distancia a una cota inferior de terreno, ya que, él vertedero se encuentra a una altura de 2,800 m mientras que el río se encuentra a 2,600 m, es decir, una diferencia de 200 m de altura. Hacia el sureste, se encuentra la laguna San Nicolás a una distancia aproximada de 4.2 kilómetros. El río Cajamarquino por su ubicación, se encuentra en una posición más vulnerable o de riesgo, dado su cercanía con el vertedero y por localizarse a una cota inferior de terreno.

Por otro lado, la topografía del área que rodea al vertedero de residuos sólidos muestra hacia el norte un incremento de la cota de terreno, desde los 2,800 m donde hasta los 2,900 m. Esta diferencia en la altura, incrementa el riesgo de que en temporada de lluvia las escorrentías se dirijan hacia el vertedero. Esto puede afectar el normal funcionamiento de sus drenajes y laguna de aguas residuales, generando contaminación al suelo y cuerpos de agua cercanos.

En cuanto a las condiciones climáticas y ambientales a las cuales está expuesto el vertedero de residuos sólidos de Cajamarca, la tabla 2 muestra los detalles.

Tabla 2.
Condiciones climáticas y ambientales

Categoría	Descripción / Valor
Tipo	Lluvioso con otoño e invierno secos. Templado. B (o, i) B'
Temperatura máxima	23°C
Temperatura mínima	3°C
Eficiencia térmica	Templado
Precipitación anual mín.	700 mm
Precipitación anual máx.	1,500 mm
Precipitación efectiva	Lluvioso
Concentración de humedad	Otoño e invierno seco

1.2. Caracterizar según los parámetros fisicoquímicos el tipo de lixiviados que se encuentran en el vertedero de Cajamarca

La caracterización de los lixiviados se inició con la recolección de las muestras en campo. Esto se realizó siguiendo el protocolo y procedimiento descrito en el apartado 2.4 de este documento y ampliado en el anexo 2.



Figura 5. Toma de muestra de lixiviados

Las muestras recolectadas fueron transportadas al laboratorio, donde, se procedió a realizar la caracterización de los lixiviados. Se tomaron como referencia, los límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de tratamiento de residuos sólidos y lixiviados de rellenos sanitarios y de seguridad, según lo establecido por el [21].

Tabla 3.
Caracterización de los lixiviados

#	Parámetro	Unidad	LMP	Valor
General				
1	Color verdadero	UC	-	3,531.1
Orgánicos				
2	DQO	mg/L	120	1,031.3
3	DBO	mg/L	20	1,633.0
4	Hidrocarburos totales de petróleo	-	10	296.5
Inorgánicos				
5	Arsénico total	mg/L	0.1	0.09334
6	Cadmio total	mg/L	0.1	0.0056
7	Cobre total	mg/L	0.5	0.02984
8	Cromo VI (*)	mg/L	0.1	0.5357
9	Hierro total	mg/L	2	8.3623
10	Mercurio total	mg/L	0.01	0.00040
11	Plomo total	mg/L	0.5	0.0069
12	Zinc total	mg/L	0.5	0.1698
Biológicos				
13	Coliformes totales	NMP / 100 mL	1,000	680.0

Tal como lo muestra la tabla 3, las muestras tomadas y analizadas evidencian una alta concentración de componentes orgánicos, con un registro que alcanza un máximo de DQO de 1,031.3 mg/L y DBO de 1,633.0 mg/L. En cuanto a la carga inorgánica, resaltan las concentraciones de hierro disuelto con un valor de 8.3623 mg/L y cromo IV con un valor de 0.5357 mg/L, que superan los límites máximos permitidos por el MINAM.

Luego, se procedió a determinar la clasificación de los lixiviados, según, los valores registrados en los análisis de laboratorio para las muestras tomadas. Para lo cual, se tomaron como referencia los criterios descritos por [22], quien clasifica los lixiviados en:

- Tipo I: jóvenes
- Tipo II: intermedio
- Tipo III: viejos

Los criterios utilizados para clasificar los lixiviados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.
Criterios de clasificación de los lixiviados

Parámetro	Unidad	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Edad	Años	< 5	5 - 10	> 10
pH	-	< 6.5	6.5 – 7.5	> 7.5
DBO ₅ /DQO	mg/L	> 0.5	0.1 – 0.5	< 0.1
DQO	mg/L	> 15,000	5,000 – 15,000	< 5,000
Metales pesados	mg/L	> 2	< 2	< 2

Nota: Fuente: Astorga (2018)

Partiendo de los criterios mostrados y tomando como referencia el valor medio de los lixiviados descrito en la tabla 3, se determinó la clasificación. A continuación, los resultados.

Tabla 5.
Clasificación de los lixiviados del vertedero de residuos sólidos de Cajamarca

Parámetro	Unidad	Lixiviado	Clasificación
Edad	Años	< 5	Tipo I
DBO ₅ /DQO	mg/L	1.58	Tipo I
DQO	mg/L	1,031.3	Tipo III
Metales pesados	mg/L	9,20388	Tipo I

Al observar los resultados de la tabla 5, se tiene que la concentración de DBO y metales pesados califica como TIPO I, mientras que, la concentración de DQO clasifica como TIPO III. El valor de metales pesado representa la sumatoria de los 8 tipos mostrados en la tabla 3. Esta clasificación sugiere que el lixiviado es joven, con una edad no mayor a los 5 años.

1.3. Aplicar la técnica de ozono como tratamiento para lixiviados provenientes del vertedero urbano de Cajamarca

La aplicación del tratamiento de ozono para mejorar las propiedades orgánicas de los lixiviados se realizó siguiendo los pasos descritos en la figura 6.

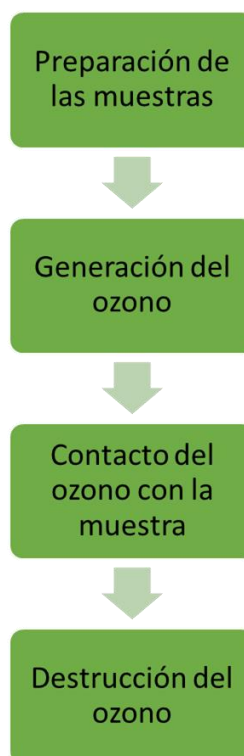


Figura 6. Pasos del tratamiento de ozono

Se inició el proceso preparando las muestras para someterlas al tratamiento con ozono.



Figura 7. Inicio del proceso de tratamiento de los lixiviados

Como lo muestra la figura 7, el agua a tratar y analizar se vertió dentro de un recipiente previamente limpiado para no contaminar el proceso. En segundo lugar, se generó el ozono a ser empleado.



Figura 8. Equipo generador de ozono

Para este fin se utilizó un equipo generador de ozono portátil, tal como, se muestra en la figura 8. Por medio de este equipo se produjo ozono a una rata de 5 mg/min. Luego, se procedió a exponer la muestra al ozono.



Figura 9. Aplicación del ozono al lixiviado (1 de 2)



Figura 10. Aplicación del ozono al lixiviado (2 de 2)

Para lograr el contacto entre el ozono y el lixiviados e iniciar así el proceso de oxidación, se posiciono en la parte inferior del recipiente con la muestra, una manguera con un difusor especial para transportar el ozono de la maquina al líquido. De esta manera, se generó el contacto entre el ozono y el lixiviado con una dosis de 75 mg/L. El exceso de espuma producido fue removido en la superficie.

Dentro del proceso de producción de ozono por parte de equipo portátil, el excedente fue recirculado y destruido como parte del proceso normal interno del mismo equipo.

El proceso se aplicó dentro de un lapso de 5 horas, donde, previo a la caracterización de del lixiviado tratado, se evidencio una mejora en el color del agua.



Figura 11. Cambio de color del lixiviado

Como se puede evidenciar en la figura 11, el líquido se clarificó significativamente dentro de los primeros 45 minutos y, luego, finalmente al cabo de las 5 horas. Finalmente, las muestras fueron identificadas y catalogadas.



Figura 12. Identificación de las muestras

1.4. Estimar la reducción de compuestos orgánicos totales una vez aplicado la tecnología de ozono para el tratamiento de lixiviados en el vertedero.

Luego de aplicar el tratamiento con ozono al lixiviado, se procedió a evaluar los porcentajes de reducción de los parámetros considerados en este estudio, de manera que, se pudiera determinar la mejora en las propiedades del agua. A continuación, los resultados.

Tabla 6.

Reducción de los componentes biológicos de los lixiviados tratados

#	Parámetro	Unidad	Antes	Después	Reducción (%)
General					
1	Color verdadero	UC	3,531.1	1,615.9	54%
Orgánicos					
2	DQO	mg/L	1,031.3	702.5	32%
3	DBO	mg/L	1,633.0	1,379.6	16%
4	Hidrocarburos totales de petróleo	-	296.5	281.0	5%
Inorgánicos					
5	Arsénico total	mg/L	0.09334	0.10019	-7%
6	Cadmio total	mg/L	0.0056	0.00136	76%
7	Cobre total	mg/L	0.02984	0.03592	-20%
8	Cromo VI (*)	mg/L	0.5357	0.7363	-37%
9	Hierro total	mg/L	8.3623	9.5103	-14%
10	Mercurio total	mg/L	0.00040	0.00037	8%
11	Plomo total	mg/L	0.0069	0.0144	-109%
12	Zinc total	mg/L	0.1698	0.1900	-12%
Biológicos					
13	Coliformes totales	NMP / 100 mL	680.0	< 1	99.9%

Nota: los porcentajes positivos representan la reducción y los porcentajes negativos el incremento

Tal como se puede observar en la tabla anterior, el tratamiento con ozono mejora o reduce las concentraciones de los parámetros orgánicos entre un 32% a un 5%, siendo, para el DQO donde se logró la mayor reducción (de 1,031.3 mg/l a 702.5 mg/l). Por su parte, el parámetro hidrocarburos totales de petróleo registro una mejora del 5%. En referencia al color verdadero del agua, se logrón una mejora del 54% evidenciado en un agua más clarificada.

Por su parte, los parámetros inorgánicos (metales pesados) a excepción del cadmio y del mercurio, se registró un incremento. Especialmente el plomo, registro un incremento del 109%. En total los metales pasaron de un registro inicial de 9,20388 mg/l hasta 10,58884 mg/l, es decir, un incremento del 15%.

Por último, los parámetros biológicos representados por los coliformes totales logran una reducción significativa. El tratamiento con ozono logro prácticamente la eliminación de los agentes biológicos al reducir desde 680 NMP/100mL hasta un valor inferior a 1 NMP/100mL, logrando una reducción del 99.9%.

En cuanto, al cumplimiento de los límites máximos permitidos por el MINAM, la tabla 7 muestra los resultados.

Tabla 7.

Cumplimiento de los LMP de los compuestos biológicos

#	Parámetro	Unidad	LMP	Valor	Cumple
General					
1	Color verdadero	UC	-	1,615.9	N/A
Orgánicos					
2	DQO	mg/L	120	702.5	No
3	DBO	mg/L	20	1,379.6	No
4	Hidrocarburos totales de petróleo	-	10	281.0	No
Inorgánicos					
5	Arsénico total	mg/L	0.1	0.10019	Si
6	Cadmio total	mg/L	0.1	0.00136	SI
7	Cobre total	mg/L	0.5	0.03592	Si
8	Cromo VI (*)	mg/L	0.1	0.7363	Si
9	Hierro total	mg/L	2	9.5103	No
10	Mercurio total	mg/L	0.01	0.00037	Si
11	Plomo total	mg/L	0.5	0.0144	Si
12	Zinc total	mg/L	0.5	0.1900	Si
Biológicos					
13	Coliformes totales	NMP / 100 mL	1,000	< 1	Si

Luego, la figura 13 muestra el porcentaje de parámetros que cumplen con la normativa ambiental.

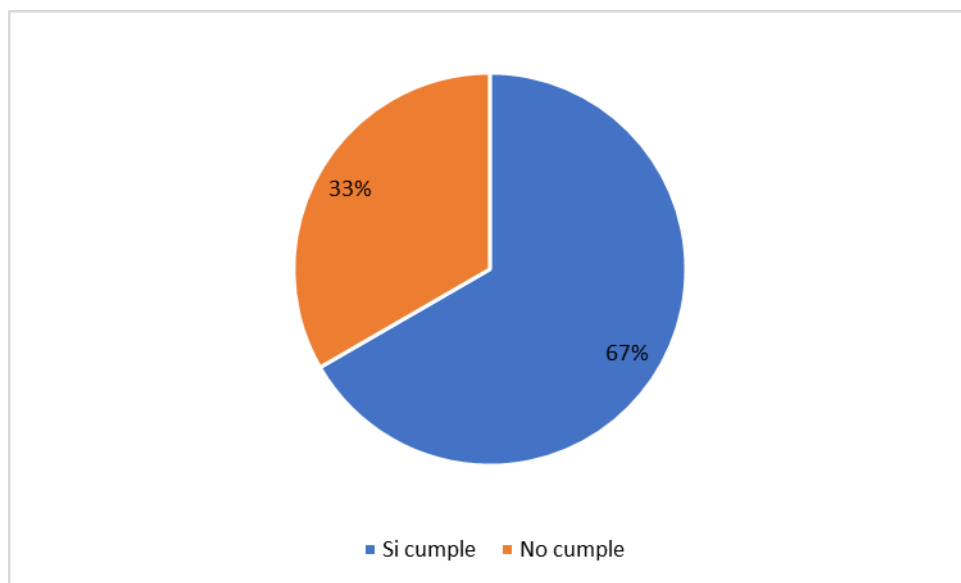


Figura 13. *Porcentaje de parámetros que cumple los LMP del MINAM*

Como se puede ver de la figura 6, la mayoría de los parámetros considerados (8 de 12) cumplen con lo establecido por el MINAM como límites máximos permisibles. Sin embargo, todos los componentes orgánicos (tanto DQO, DBO como Hidrocarburos totales de petróleo), superan los LMP.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión

En relación a las características según los parámetros fisicoquímicos encontrados en el vertedero de Cajamarca, se evidenció que existe una alta concentración de componentes orgánicos, y el DQO y DBO superan los límites máximos permitidos por norma D.S. N°015 – MINAM – 2015, además se evidencio una alta concentración de hierro disuelto, y metales pesados que permiten sugerir que el lixiviado es joven, con una edad no mayor a los 5 años. Dichos resultados se contrastan con los obtenidos por [13] en su investigación quien pudo apreciar que los niveles de concentración de los parámetros físicos, químicos y biológicos, principalmente los metales pesados, exceden los límites máximos permisibles, producto de los procesos propios de lixiviación. Esto en concordancia con [22], quien manifiesta que los lixiviados en rellenos sanitarios de los países en vías de desarrollo presentan concentraciones mucho mayores que aquellos de países desarrollados.

La aplicación de la técnica de ozono es una alternativa de tratamiento para lixiviados, el cual se aplicó utilizando un equipo portátil generador de ozono, evidenciando una mejora en la clarificación del agua de manera significativa. Los resultados se comparan con los obtenidos por [6] quienes realizaron experimentos de ozono utilizando un reactor que permitió la adición de O₃ a un lote fijo de muestra de lixiviado el tratamiento demostró que los procesos de con ozono son una técnica de tratamiento eficaz y exitosa para la degradación de orgánicos en el lixiviado.

Al respecto consideran [7] que el Ozono (O₃) cumple un papel importante en la degradación de contaminantes orgánicos a través de la oxidación directa y en combinación con otros oxidantes es muy eficaz en la degradación de contaminantes orgánicos por lo cual es muy recomendado su aplicación.

La aplicación del tratamiento con ozono definitivamente mejoró o redujo las concentraciones de los parámetros orgánicos presentes en el lixiviado. En relación al color verdadero del agua, se logró clarificarla de manera significativa, al igual que los parámetros inorgánicos logrando una reducción con la aplicación del tratamiento con ozono. Al contrastar con los resultados obtenidos por [12] estos son similares ya que también se mantuvieron por encima de los LMP tanto los DBO₅, al igual que DQO.

Esto a pesar que como señala [2] el ozono (O₃) es un oxidantes muy poderosos, el cual puede oxidar muchos contaminantes presentes en el lixiviados.

En cuanto a las **implicancias** de la presente investigación los resultados permiten profundizar en el conocimiento aplicando nuevos métodos de tratamiento en el problema de los lixiviados en los vertederos reduciendo de esta manera los riesgos a la población y al ambiente circundante al vertedero. Situación que de no ser atendida y ajustada bajo los lineamientos establecidos se corre el riesgo de causar daños irreversibles al medio ambiente especialmente al agua superficial y subterránea. Al respecto señala [1] que el tratamiento de los "lixiviados en los vertederos se ha convertido en la mayor preocupación ambiental debido a su gran impacto", por tanto, es prioritario que como futuros Ing. realicemos acciones donde se apliquen tratamientos que ayuden a mitigar el impacto de los lixiviados para su control en el medio ambiente.

Con respecto a las **limitaciones** del estudio estuvo centrada a la falta del tiempo suficiente para la recolecta y procesos de muestras, así como los aspectos financieros, para que su desarrollo fuera autofinanciado lo cual impide un mayor alcance del estudio. Como realizar comparaciones con muestras de diferentes puntos a monitorear, para la aplicación del tratamiento con ozono lo cual permitirá un mejor análisis en la reducción de DBO y DQO, disminución de olor, color y turbiedad, destrucción de organismos patógenos, entre otras. Esto en concordancia con lo señalado por [4] cuando señalan que los altos costos impiden realizar estudios con mayor alcancen y evidenciar la reducción de los principales contaminantes presenten en el lixiviado.

Conclusiones

- Las características hidrogeológicas, climáticas, atmosféricas, afectan de manera directa al vertedero, incrementándose en la temporada lluviosa debido a las condiciones topográfica debido a las escorrentías, ya que estas van directo al vertedero aumentando la producción de lixiviado debido a la percolación, y aumentando su producción y toxicidad.
- Las características de los parámetros fisicoquímico y biológico presentan un nivel de carga tóxica elevada por encima de los LMP, particularmente en la Demanda

Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y Sólidos Suspendidos Totales (TSS).

- La aplicación de la técnica de ozono como tratamiento para lixiviados es una alternativa viable que resultó ser eficiente en el tratamiento del lixiviado permitiendo de manera rápida una reducción significativa de los niveles de DQO y DBO5.
- La reducción de compuestos orgánicos totales una vez aplicado la tecnología de ozono en los lixiviados se obtuvo porcentajes de remoción más significativos particularmente en el DQO y DBO5.

REFERENCIAS

- [1] P. García, «Manejo y tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios: Revisión bibliográfica y experiencia en planta de tratamiento de lixiviados de Navarro,» Gerencia ambiental y desarrollo sostenible empresarial, pp. 1 -15, 2018 .
- [2] J. León y B. Andrade, «Tratamiento biológico complementario para lixiviados como alternativa para mitigar la contaminación ambiental. Caso: Botadero "Curgua",» Polo del Conocimiento, pp. 1099 - 1115, 2021
- [3] A. Martínez, W. Padrón, O. Rodríguez, O. Chiquito, M. Escarola, J. Hernández, E. Elvira , G. Méndez, J. Tinoco y J. Matínez, «Alternativas actuales de manejo de lixiviados,» Avancez en Química, pp. 37 - 47, 2014.
- [4] C. Zafra y D. Romero, «Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos,» Revista Ingenierías Universidad de Medellín , pp. 125 -147, 2019.
- [5] A. Rivas, «Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas,» Universidad Zamorano, Honduras, 2019.
- [6] S. Mohan y D. Gokul. Treatment of leachate from open Dumpsite of Municipal Solid Waste By Ozone Based Advanced Oxidation Process. Ozone: Science & Engineering, pp. 1 - 16, 2021
- [7] P. Asaithambi, B. Sajjadi, R. Abdul y W. Bin, «Ozone (O₃) and sono (US) based advanced oxidation processes for the removal of color, COD and determination of electrical energy from landfill leachate,» Separation and purification technology, pp. 442 - 449, 2017.
- [8] A. Pellón, M. López, M. Espinosa y O. González. Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, pp. 3 - 16, 2015.
- [9] N. Buendía, K. Calizaya, R. Castillo, E. Neira y J. Vidarte, «Propuesta metodológica para el muestreo de lixiviados en rellenos sanitarios operativos». Lima-Perú: OEFA - Fiscalización Ambiental, 2021.
- [10] K. Ninan y M. Zambrano, «Tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira por Electrocoagulación,» Universidad Nacional de San Antonio abad del Cusco, Cusco - Perú, 2019.
- [11] C. Medina, E. Montero y L. Cruz. Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Rev. Soc. Quim. Perú, pp. 454 - 466, 2016.
- [12] R. Gallardo y J. Pichén, «Evaluación del tratamiento de la fracción orgánica de los lixiviados en la infraestructura de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de Cajamarca, 2019,» Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, Cajamarca, 2019.
- [13] J. Gonzales, «Evaluación del riesgo ambiental que genera la planta de tratamiento de residuos sólidos de la ciudad de Cajamarca debido al manejo de los lixiviados,» Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 2018.

- [14] S. Cortez, P. Teixeira, R. Oliveira y M. Mota, «Evaluación de procesos de oxidación avanzada basados en ozono y Fenton como pretratamientos de lixiviados de vertederos maduros,» *Journal of Environmental Management*, pp. 749 - 755, 2017.
- [15] Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. Metodología de la investigación (6a ed.). México, D.F., México: McGraw-Hill Interamericana. 2014.
- [16] Corporación para el desarrollo sostenible del sur de la Amazonía, Protocolo para toma de muestras de aguas residuales, 2010.
- [17] Sánchez Saez, MG. 2013. Coagulación - floculación y separación de sólidos disueltos y suspendido en un lixiviado estabilizado de vertedero. Tesis Mbta. Oviedo, España. Universidad de Oviedo. 97 p.
- [18] ISWA (International Solid Waste Association, AT). 2015. Wasted Health The Tragic Case of Dumps. 38 p.
- [19] Paolini Méndez, AY. 2007. Validación de la metodología EVIAVE en vertederos de Venezuela. Análisis y propuestas de soluciones. Tesis Dr. Granada, España. Universidad de Granada. 830 p.
- [20] J. Blandon y L. Marín, «Tratamiento de lixiviados por medio de oxidación con peróxido de hidrógeno y ozono,» Universidad Nacional de Colombia Sede manizales, Colombia, 2015.
- [21] MINAM, Establecer los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de infraestructuras, Lima: MINAM, 2009.
- [22] C. Astorga, Tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario: Propuesta y evaluación de un sistema de humedales artificiales, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2018.
- [23] E. Asharafun, F. Hossain y Z. Parveen, «Characteristics of municipal landfill leachate and its impact on surrounding agricultural land,» *American International University - Bangladesh*, pp. 31 - 39, 2016.
- [24] N. Amaral, R. Martins, S. Castro y R. Quinta, «Ozonation and perozonation on the biodegradability improvement of a landfill leachate,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, pp. 527 - 533, 2016.
- [25] M. Lovato, J. Buffelli, M. Abrile y C. Martín, «Kinetics and efficiency of ozone for treatment of landfill leachate including the effect of previous microbiological treatment,» *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1 - 14, 2018.
- [26] M. Espinosa, M. López, A. Pellón, M. Robert, S. Díaz, A. González, y otros. 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*, pp. 313 - 325, 2013.
- [27] C. Madera. Tratamiento de lixiviado de relleno sanitario mediante acople tecnológico de Biorreactor Laguna Anaerobia de alta Tasa-BLAAR y Humedal construido subsuperficial de flujo horizontal sembrado con policultivos. *Ingeniería y Competitividad*, pp. 1 - 14, 2020.
- [28] R. Méndez, R. García, E. Castillo y M. Sauri. *Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton*. México: Ingeniería e Investigación. 2011.

