

## Tratamiento de los lixiviados de residuos sólidos en las celdas de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto - fenton

### Treatment of solid waste leachate in Huanuyo cells through advanced oxidation photo - fenton

---

Jhoel Amador Ticona Ramos  
[jhoel.ticona.r@uni.pe](mailto:jhoel.ticona.r@uni.pe) – Universidad Nacional de Juliaca, Perú  
<https://orcid.org/0000-0003-4603-3978>

José Luis Pineda Tapia<sup>1</sup>  
[jpineda@unaj.edu.pe](mailto:jpineda@unaj.edu.pe) – Universidad Nacional de Juliaca, Perú  
<https://orcid.org/0000-0001-9498-1169>

---

Recibido (Received): 01/09/23 | Aceptado (Accepted): 29/09/23

### Resumen

El presente artículo muestra los resultados de la investigación que tiene como objetivo determinar la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton como tratamiento para la reducción de materia orgánica en lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo. Los lixiviados de residuos sólidos contienen altas cargas contaminantes, lo que representa un riesgo potencial para el medio ambiente y la salud pública. En una etapa inicial se caracterizaron física y químicamente los lixiviados para determinar la calidad y analizar los procesos de tratamiento; luego se realizaron las pruebas experimentales de fotooxidación para determinar la mayor eficiencia de degradación de la materia orgánica en diferentes condiciones. Los resultados de la caracterización reportaron valores de 5140 mg/L y 61300 mg/L para DBO5 y DQO respectivamente y un pH inicial de 6,8. Respecto a las pruebas experimentales de fotooxidación, esta tecnología logró reducir un 83,29% de materia orgánica en términos de DQO en condiciones óptimas con una dosis de 15 mL/L de peróxido de hidrógeno (50% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y 2000 mg/L de Fe<sup>2+</sup>. (FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O al 99,9%), a pH de 4 y un tiempo de contacto de 30 minutos; mejorando el color, olor y biodegradabilidad del efluente tratado, pasando de un BI de 0,08 a 0,5. Este valor demuestra que los tratamientos biológicos pueden acompañarse después de una oxidación avanzada para su reinserción a la naturaleza sin causar alteraciones significativas, demostrando la factibilidad técnica del proceso foto-fenton como alternativa de tratamiento primario de lixiviados de las celdas transitorias de Huanuyo y de los rellenos sanitarios. en general que mitiguen los riesgos e impactos negativos causados por estos efluentes.

**Palabras clave:** DQO, oxidación foto-fenton, lixiviados, residuos sólidos.

---

**Como citar:** Ticona-Ramos, J. A. & Pineda-Tapia, J. L. (2023). Tratamiento de los lixiviados de residuos sólidos en las celdas de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto - fenton. NAWPARISUN – Revista de Investigación Científica de Ingenierías, 4(3), 85-92.

<sup>1</sup> Corresponding author: [jpineda@unaj.edu.pe](mailto:jpineda@unaj.edu.pe)

## Abstract

The present article, shows the results of the research that have the objective to determine the efficiency of the photo-fenton advanced oxidation process as a treatment for the reduction of organic matter in leachate from the Huanuyo transitory cell. Solid waste leachates contain high polluting loads, representing a potential risk to the environment and public health. In the initial stage, the leachates were physically and chemically characterized to determine the quality and analyze the treatment processes; then the experimental photo-oxidation tests were carried out to determine the highest degradation efficiency of organic matter under different conditions. The characterization results reported values of 5140 mg/L and 61300 mg/L for BOD<sub>5</sub> and COD respectively and an initial pH of 6.8; regarding the experimental tests of photo-oxidation, this technology was able to reduce 83.29% of organic matter in terms of COD at optimal conditions with a dose of 15 mL/L of hydrogen peroxide (50% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and 2000 mg/L of Fe<sup>2+</sup> (FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O at 99.9%), a pH of 4 and a contact time of 30 minutes; improving the color, odor and biodegradability of the treated effluent, going from a BI of 0.08 to 0.5. This value shows that biological treatments can be accompanied after advanced oxidation for their reinsertion into nature without causing significant alterations, demonstrating the technical feasibility of the photo-fenton process as a primary treatment alternative for leachates from the transitory cells of Huanuyo and from the sanitary landfills in general that will mitigate the risks and negative impacts caused by these effluents.

**Keywords:** COD, photo-fenton oxidation, leachates, solid waste.

## Introducción

La variada composición de los residuos sólidos dispuestos en las celdas transitorias de Huanuyo hace posible que el lixiviado formado adquiera una composición compleja en su estructura de formación, definiéndose como un producto obtenido a consecuencia de los residuos sólidos, la humedad y la percolación de líquidos a través de los desechos durante el proceso de estabilización (Méndez et al., 2019). 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), los cuales al ser vertidos en el ambiente pueden contaminar el suelo, aguas superficiales y subterráneas, y al evaporarse el contenido acuoso las partículas pueden causar contaminación del aire (Torres et al., 2014).

El tratamiento de los lixiviados que hasta ahora es complejo, se debe a que sus componentes son altamente tóxicos y variables (Seibert et al., 2019); y debido a sus características fisicoquímica por lo general son resistentes a la biodegradación (Hirata, 2002). Este aspecto ambiental se ve agudizado en el altiplano puneño debido a que las precipitaciones son altas, lo que incrementa la cantidad de lixiviado generado, ocasionando el colapso de la poza de lixiviados y consecuentemente el riesgo potencial de contaminación de los cuerpos de agua del área de influencia del proyecto en operación (Red Muqui, 2020). Los compuestos más recalcitrantes de remover en los lixiviados son las sustancias húmicas y fúlvicas, por lo que es necesario proponer un sistema de tratamiento que asegure la reducción de la elevada carga orgánica presente y la precipitación de los elementos y/o compuestos no degradados (Nercolini et al., 2019).

Existen sistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de lixiviados, por ejemplo, la recirculación,

evaporación, tratamientos biológicos, anaerobios, aerobios y procesos de oxidación avanzada (POA) (Abdulhussain et al., 2009). Los POA transforman el contaminante químicamente, de esta manera se puede conseguir la mineralización completa de los compuestos y en la mayoría de los casos no se generan sustratos que se deban tratar posteriormente (Martínez et al., 2014), motivo por el cual se requiere demostrar la capacidad que presentan los procesos de oxidación avanzada, cuyos métodos pueden ser aplicados de manera directa o combinada en la reducción de materia orgánica de aguas residuales, medidos generalmente bajo parámetros indicadores como la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y carbono orgánico total (COT) (San Pedro et al., 2019).

En ese contexto; con la finalidad de contribuir con una propuesta técnica para el tratamiento de lixiviados de residuos sólidos que terminan impactando sobre el suelo, aire y las aguas naturales presentes en el área de influencia de operación del proyecto de las celdas transitorias de Huanuyo del distrito de Cabanillas, San Román, Puno; se planteó desarrollar una investigación que tuvo por objetivo principal determinar la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton como propuesta de tratamiento de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo, que evidencie altos porcentajes de eficiencia de degradación química de la materia orgánica para que puedan ser reinsertados en la naturaleza sin generar alteraciones significativas sobre los componentes ambientales.

## Objetivos

- Determinar la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton en la reducción de la materia orgánica del lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo.
- Determinar las características físicas y químicas de los lixiviados generados en la celda transitoria de Huanuyo.
- Evaluar y determinar las condiciones óptimas de la relación fenton, pH y tiempo de tratamiento

para la reducción de la materia orgánica del lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto-fenton.

## Metodología

### Ámbito de estudio

El estudio se realizó con muestras de los lixiviados de la celda transitoria de residuos sólidos de la localidad de Huanuyo de la ciudad de Juliaca – región Puno a 3997 m.s.n.m. que cuenta con un área de 34 Has. Esta infraestructura de disposición final de residuos sólidos municipales está comprendida en la siguiente ubicación geográfica



Figura 1. Ubicación y estado de las celdas transitorias y poza de lixiviados de Huanuyo

### Materiales y equipos

Un reactor foto-catalítico, el mismo que fue elaborado a base de una lámpara UV de 16W, una bomba de pecera de 4W, un vaso de precipitado de 1L, una manguera de ½" (50cm), tubos de abasto de ½" con rosca, abrazaderas de ½" con cintillos (como se muestra en la figura 2). /Otros equipos como la balanza analítica, multiparámetros, pH-metros, termodigestor para DQO y un espectrofotómetro UV. Viales para digestión de DQO, fiolas de 100 mL; vasos precipitados de 1000 mL, 250mL, 100 mL y 50 mL; probetas de 500 mL, 250 mL y 100 mL; pipetas de 1 mL, 5 mL y 20 mL; propipetas, embudos, papel filtro Whatman N.º 42, goteros, pinzas, espátulas y lunas de reloj.

### Reactivos

Peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ) al 50%, sulfato ferroso heptahidratado ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) al 99.9%, ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al 99%, hidróxido de sodio (NaOH) 5M, dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) al 99.9%, sulfato de mercurio ( $HgSO_4$ ) al 99.9%, sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ) al 99.9%, dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ) al 99.9%, biftalato de Potasio ( $C_8H_5KO_4$ ) al 99.9%.

### Procedimiento metodológico

Mediante un diseño experimental se manipularon las variables independientes de dosis de concentración fenton, pH y tiempo de contacto, con el objetivo de evaluar los efectos producidos en la reducción de la materia orgánica en función a la DQO de los lixiviados materia del presente estudio de investigación.

A continuación, se detalla los procedimientos experimentales desarrollados bajo condiciones controladas, con la finalidad de explicar la secuencia de acciones realizadas durante el proceso de tratamiento de los lixiviados.

### Caracterización físico-química de los lixiviados de la celda transitoria

**a) Procedimiento de muestreo:** El procedimiento de muestreo se realizó siguiendo las recomendaciones dadas por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2021), debido a que no se cuenta con un protocolo para muestreo de lixiviados. Se realizó un muestreo puntual, debido a que estos lixiviados se canalizan hacia un mismo punto llamado poza de lixiviados, los recipientes para la toma de muestras fueron enjuagados con la misma muestra para asegurar la calidad y representatividad de la misma. El muestreo de los lixiviados materia de estudio fue realizado en el mes de setiembre, en temporada de estiaje.

Se recolectaron 60 litros de muestra representativa de las celdas transitorias de Huanuyo, 4 litros para análisis de parámetros fisicoquímicos, compuesta de 1 envase PET de 1L para análisis de  $DBO_5$ , 1 envase PET de 1L para análisis de metales totales y 4 envases PET de 500 ml cada uno para análisis de los parámetros de DQO, nitrógeno amoniacal, sólidos totales, la alcalinidad y dureza; y 56 litros para el procedimiento experimental propiamente dicho del diseño experimental. Se agregó preservante a los envases de las muestras de DQO, metales totales y nitrógeno amoniacal, para ello se usó ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), de acuerdo a las especificaciones del laboratorio Bhios Lab donde se enviaron las muestras.

Se realizó el registro de los datos de campo en el instrumento de recolección de información llamada cadena de custodia, donde se mencionó el nombre de la muestra, la codificación, la matriz (agua residual municipal, lixiviado), la procedencia, fecha y hora de muestreo, los parámetros que se analizarán de acuerdo a la cotización, el volumen y número de muestras, así como los tipos de envases y los reactivos para su preservación.

Los frascos fueron almacenados en el cooler, debidamente rotulados y conservados con reactivos y sachets refrigerantes para su transporte libre de movimientos al laboratorio acreditado Bhios Lab de la ciudad de Arequipa, donde fueron analizados los parámetros fisicoquímicos mencionados.

Respecto a la recolección de los 56 litros de líquido lixiviado para realizar los procedimientos correspondientes a la investigación, se siguió los mismos procedimientos de seguridad y se usó 3 baldes de plástico de 20 L de capacidad.

**Parámetros a evaluar y método de análisis:** A continuación, se muestran los distintos parámetros y método de ensayo que se emplearon para la determinación de los parámetros físico-químicos y establecer la calidad del lixiviado a tratar.

Tabla 1.

Técnicas e Instrumentos de recolección de datos empleados

N.º	Parámetro	Unidad	Método
1	pH	Und. de pH	Multiparámetro (Parámetros de campo, in-situ)
2	Temperatura	°C	
3	Conductividad eléctrica	µS/cm	
4	Oxígeno Disuelto	Ppm	
5	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	SMEWW 5210-B
6	Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	SMEWW 5220 D
7	Nitrógeno amoniacal		SMEWW 4500-NH3 D
8	Sólidos totales	mg/L	SMEWW 2540-B
9	Alcalinidad		SMEWW 2320 B
10	Dureza total		SMEWW 2340-C
11	Turbiedad	NTU	Nefelométrico
12	Metales totales por ICP-MS	mg/L	SMEWW 6020 B

El sistema experimental empleado para llevar a cabo los experimentos fotoquímicos en el laboratorio estuvo formado básicamente por un reactor equipado con una lámpara de radiación UV y una bomba de pecera para la recirculación del lixiviado a tratar, el mismo que se aprecia a continuación.

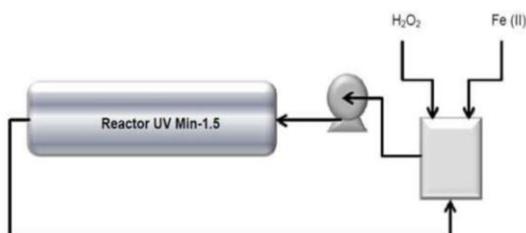


Figura 2. Esquema del reactor Foto-fenton

El procedimiento de oxidación avanzada constó de las siguientes etapas:

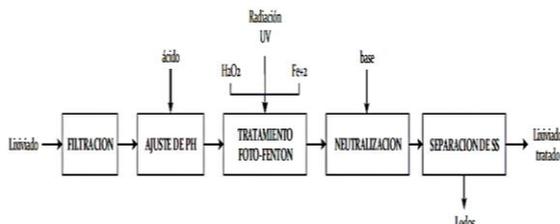


Figura 3. Etapas del procedimiento experimental de foto-oxidación

**a) Filtración:** Con el fin de eliminar partículas sólidas y sólidos en suspensión y evitar así su posible interferencia en la transmisión de la radiación, se filtró el lixiviado usando papel filtro Whatman N.º 42, el mismo que no presentó elevada eficiencia, debido a que las muestras del lixiviado no contenían gran cantidad de sólidos en suspensión y la coloración negra de la muestra era propia de los sólidos disueltos y la DBO<sub>5</sub> soluble.

**b) Ajuste del pH de las muestras:** Para cada prueba experimental se trabajó con 1.5 L de lixiviado en vaso precipitado de 1L de capacidad que forma parte del reactor foto-catalítico. Se determinó la concentración inicial de pH de la muestra usando el equipo multiparámetro manteniéndose para todos los casos un valor neutro. Como parte del diseño experimental, se ajustó el pH de las muestras a 3, 3.5 y 4. Para ello se utilizó ácido sulfúrico concentrado (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 99 % de pureza. Se seleccionaron estos valores porque es bien conocido que las reacciones de oxidación tipo fenton son más eficaces en medio ácido (Bigda, 1995).

**c) Reacción de oxidación avanzada:** En el reactor foto-catalítico tipo batch de un volumen de tratamiento mínimo de 1.5L de lixiviados, adecuado con una bomba de pecera para la recirculación, asimismo se adaptó con mangueras de abasto para conectar a la lámpara fluorescente de UV de 16 watts, con una longitud de 44 cm. que a su vez viene cubierto con material metálico evitando la irradiación al ambiente.

Se adicionó para la experimentación sobre el reactor foto-catalítico que contiene el lixiviado ya ajustado a los pH de determinación de 3, 3.5 y 4, los reactivos fenton, es decir, el peróxido de hidrógeno al 50% de acuerdo a los niveles de observación de 5, 10 y 15 mL/L de lixiviado crudo, mientras que el reactivo de sulfato ferroso heptahidratado al 99.9% de pureza se mantuvo constante la dosis de 2000 mg/L para todas las corridas experimentales. La otra variable de manipulación fue el tiempo de tratamiento, de 15, 30 y 45 minutos, que transcurridos este tiempo de contacto las muestras fueron depositadas en probetas de 250 mL para su posterior precipitación.



Figura 3. Calidad de las muestras luego del tratamiento de oxidación foto-fenton

**d) Neutralización y decantación:** Para finalizar el tren de tratamiento, luego de 5 días se ajustó el pH del efluente del reactor hasta un valor comprendido en 7 (pH neutro) y un ORP de 0 mV, utilizando hidróxido de sodio 5M (NaOH al 98% de pureza), con el fin de provocar la precipitación del catalizador metálico añadido en el proceso de oxidación, fundamentándose en los diagramas de Pourbaix, el cual menciona que a un pH de 7 y ORP de 0mV precipita el Fe<sup>2+</sup> en forma de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(s). Se decantó y tomó una muestra del líquido sobrenadante para su posterior análisis de demanda química de oxígeno post tratamiento.

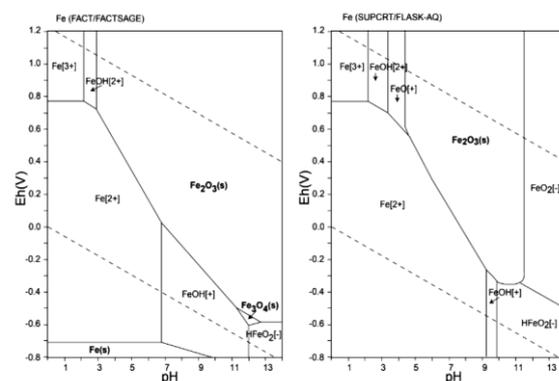


Figura 4. Diagrama de Pourbaix para el hierro (Atlas de diagramas de Eh-pH, 2005)

### Determinación de la eficiencia del reactor

Para la preparación del hidróxido de sodio a una concentración de 5M, se pesó 20g. del soluto NaOH al 98% y se diluyó aforando en una fiola de 100 mL. Inmediatamente, luego de la adición de NaOH se pudo observar los cambios que se aprecian en la figura 3. Finalmente, se detuvo la reacción de oxidación con óxido de manganeso (MnO<sub>2</sub>) para eliminar el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> residual, añadiendo 0.2 mg de MnO<sub>2</sub> por cada 10 mL de la muestra de lixiviado tratado, agitándolo por un lapso de 15 minutos hasta la desaparición de burbujas, dejándolo precipitar. Cada una de las 14 muestras tratadas por oxidación avanzada foto-fenton, neutralizadas con NaOH y MnO<sub>2</sub>, fueron diluidas en 50 partes, aforando 1mL de muestra en fioles de 50mL, posteriormente sobre los viales que contienen la solución de digestión y el ácido sulfúrico con sulfato de plata, se colocó 2.5 ml de la muestra diluida, agitando la solución para producir una buena mezcla. En seguida, se colocaron los viales en un termostato LIANHUA a 150 °C durante 2 horas. Transcurrido este tiempo, se dejaron enfriar y se efectuaron las lecturas correspondientes de dicromato residual por colorimetría, en un espectrofotómetro UV a una longitud de onda de 440 nm. A partir de estos valores de absorbancia que cuentan con una curva de calibración se determinaron los porcentajes de DQO finales. El procedimiento para determinar la curva de calibración de la DQO se encuentra anexado al presente informe.

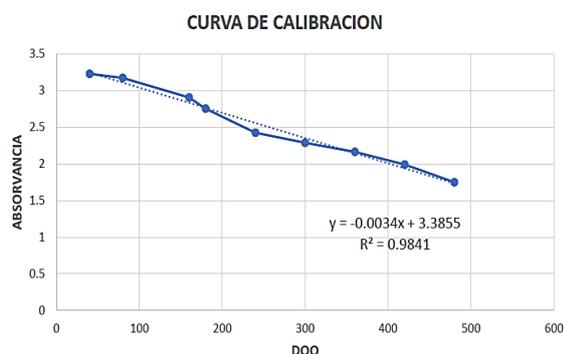


Figura 5. Curva de calibración de la DQO en función a la absorbancia

## Resultados y discusión

### Caracterización físico-química de los lixiviados de la celda transitoria

Los resultados de la caracterización de parámetros físicos y químicos, indicadores de la calidad de los lixiviados generados en la celda transitoria de Huanuyo, analizados tanto con equipos propios de la Universidad Nacional de Juliaca (parámetros de campo) y el laboratorio acreditado ante INACAL Bhios Lab.

Tabla 2.  
Parámetros de campo

N.º	Parámetro	Valor	Unidad
1	pH*	6.8	Und. de pH
2	Temperatura*	20.6	°C
3	Conductividad eléctrica*	29000	µS/cm
4	Oxígeno disuelto*	0.21	mg/L

\*Parámetro determinado con equipos de la Universidad Nacional de Juliaca

La Tabla 2 muestra los parámetros de campo analizados mediante el equipo multiparámetro, logrando determinar un valor de 6.8 para el pH, lo que significa que los lixiviados tienen un valor neutro a ligeramente ácido; otro parámetro importante en el tratamiento de aguas residuales es la temperatura, reportando un valor de 20.6 °C; una conductividad de 29000 µS/cm y oxígeno disuelto de 0.21 mg/L, lo que indica que el lixiviado se encuentra en condiciones anóxicas.

Los valores de la caracterización físico-química de lixiviados realizado por Medina et al. (2016), no evidenciaron cambios importantes en el pH de los lixiviados en comparación al presente estudio, ya que reportó en época de estiaje valores de 8.17 para los lixiviados de Aguas de las Vírgenes y de 7.86 para los lixiviados de El Edén, ambos rellenos sanitarios se encuentran ubicados en Huancayo. Asimismo, valores de pH comprendidos entre 6.5 y 8.8; y similares valores de conductividad eléctrica han sido reportados previamente por Méndez et al. (2010) y Primo (2008).

Tabla 3.  
Parámetros fisicoquímicos

N.º	Parámetro	Valor	Unidad
1	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	5140	mg/L
2	Demanda química de oxígeno (DQO)	61300	mg/L
3	Nitrógeno amoniacal	2220.81	mg/L
4	Sólidos totales	83413	mg/L
5	Alcalinidad	1623581.25	mg/L
6	Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	8350.72	mg/L
7	Turbiedad*	105	mg/L

De la Tabla 3 los lixiviados contienen concentraciones muy altas de materia orgánica, con una DQO de 61 300 mg/L, que en comparación con un agua residual doméstica que como máximo alcanza una DQO 1000 mg/L, estos lixiviados se encuentran concentrados en 61 partes más, evidenciando los impactos que estos podrían ocasionar sobre el ambiente, así como la dificultad de su tratamiento. Del mismo modo, se aprecia 2220.81 mg/L de nitrógeno amoniacal en la muestra de lixiviados, producto del exceso de humedad de los residuos sólidos (fracción orgánica), este parámetro es causante de la producción de NO<sub>2</sub> en las celdas transitorias, gas considerado de efecto invernadero (GEI), lo cual es perjudicial para el medio ambiente.

Es importante considerar también que los valores de alcalinidad y dureza de los lixiviados analizados son muy altos, valores de 1623581.25 mg/L y 8350.72 mg/L respectivamente, lo que representa que el agua residual es muy dura, actuando como solución buffer al momento de ajustar el pH a condiciones ácidas, traduciéndose en costos de tratamiento por el uso de reactivos.

Medina et al. (2016), reportó valores de 6909 mg/L para DBO<sub>5</sub> y 16875 mg/L para DQO, una dureza total de 7100 mg/L y una alcalinidad de 8880 mg/L para ambos casos representado como CaCO<sub>3</sub>; a pesar que esta infraestructura de disposición final presenta características similares a las celdas transitorias de Huanuyo por el tiempo de operación y condiciones

climáticas, los lixiviados de Huanuyo contienen mayor carga contaminante.

Tabla 4.

Parámetros inorgánicos (metales totales)

N.º	Parámetro	Valor	Unidad
1	Arsénico	0.19846	mg/L
2	Cadmio	0.00493	mg/L
3	Cobre	0.086	mg/L
4	Cromo	0.64190	mg/L
5	Mercurio	0.0013	mg/L
6	Plomo	0.0838	mg/L
7	Bario	1.446	mg/L
8	Boro	4.946	mg/L
9	Hierro	334.3	mg/L
10	Magnesio	470.3	mg/L
11	Manganeso	102.8	mg/L
12	Níquel	0.7761	mg/L
13	Aluminio	1.27	mg/L
14	Calcio	2199	mg/L
15	Potasio	3284	mg/L
16	Sodio	2907	mg/L
17	Fosforo	29.65	mg/L
18	Silicio	43.54	mg/L
19	Zinc	1.747	mg/L

En la Tabla 4, se presenta la información de los parámetros metales totales, dividido en 3 grupos: metales pesados, metales considerados en los estándares de calidad ambiental ECA agua III, y finalmente otros metales de importancia. De estos parámetros evaluados, los metales pesados de arsénico 0.19846 mg/L, cromo 0.64190 mg/L y plomo 0.0838 mg/L superan los estándares de calidad ambiental para agua categoría 3. Asimismo, estos lixiviados contienen metales con altas concentraciones de calcio y magnesio, encargados de endurecer el agua; calculando la dureza matemática se halló el siguiente valor que se asemeja a la dureza determinada en laboratorio.

$$\text{Dureza (CaCO}_3\text{)} = 2.497[\text{Ca}] + 4.118[\text{Mg}]$$

$$\text{Dureza (CaCO}_3\text{)} = 2.497[2199] + 4.118[470.3]$$

$$\text{Dureza (CaCO}_3\text{)} = 7427.59 \text{ } \langle \text{ } \rangle \text{ } 8350.72$$

En cuanto al contenido de metales pesados, Medina et al. (2016), en época de lluvia observó que la presencia de plomo fue mayor en los lixiviados de los rellenos sanitarios Aguas de las Vírgenes 0.814 mg/L y El Edén .060 mg/L (80% más que en época de estiaje); mientras que en época de estiaje se observó el cadmio en pequeñas

### Índice de biodegradabilidad del lixiviado crudo

Este índice se determina dividiendo el valor de la DBO<sub>5</sub>/DQO propios de la caracterización de la muestra (lixiviado crudo).

$$IB = \text{DBO}_5 / \text{DQO}$$

$$IB = 5140 / 61300$$

$$IB = 0.084$$

Tabla 5.

Parámetros inorgánicos (metales totales)

Muestra	Parámetro	Valor
M-01	Índice de biodegradabilidad (IB)	0.08

Tabla 6.

Parámetros inorgánicos (metales totales)

Relación DBO <sub>5</sub> /DQO	Índice de biodegradabilidad del H <sub>2</sub> O
< 0.2	No biodegradable
0.2 – 0.4	Biodegradable
> 0.4	Muy biodegradable

Fuente: Remtavares (2012)

Si comparamos los valores del índice de biodegradabilidad, según Remtavares (2012), la muestra del lixiviado crudo es un agua residual no biodegradable, es decir, que los métodos de tratamiento biológicos no serán eficientes ni los adecuados para degradar la materia orgánica presente en el lixiviado, por lo que se tiene que recurrir a métodos avanzados de oxidación para su tratamiento, aceptando la hipótesis nula de que el lixiviado presentaría un IB no biodegradable, comprobándose con la caracterización de la muestra. Medina et. al (2016), como resultado de la caracterización físico-química de los lixiviados calculó el indicador de biodegradabilidad, obteniendo valores de 0.09 y 0.4 en época de estiaje para los rellenos sanitarios Aguas de las Vírgenes (lixiviado viejo) y El Edén (lixiviado joven) respectivamente.

### Evaluación de las condiciones óptimas de eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton

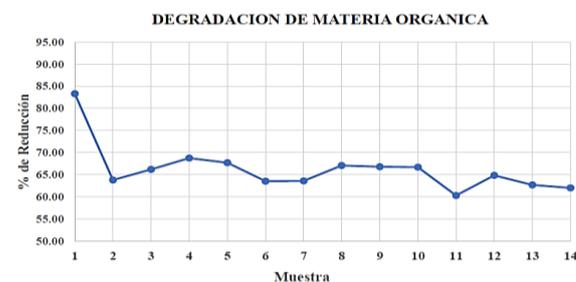


Figura 6. Eficiencia alcanzada en la reducción de la materia orgánica

En Figura 6 se evidencia que los valores máximo y mínimo de porcentaje de reducción de la demanda química de oxígeno de los lixiviados de residuos sólidos de la celda transitoria de Huanuyo, fueron de 83.29% (Experimento 1) y 64.04 % (Experimento 14) respectivamente, demostrando que los niveles óptimos de eficiencia de tratamiento se alcanzaron en las condiciones de una dosis de 15 mL/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 2000 mg/L de Fe<sup>2+</sup>, un pH de 4 y tiempo de contacto en la lampara UV de 30 minutos.

Estos resultados se pueden comparar con la investigación desarrollada por Yaranga (2021), quien alcanzó una eficiencia de 90.68% para un pH de 4 y una relación molar de 2 a 1 de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y Fe<sup>2+</sup> con valores residuales de 5201.67 ppm de DQO para el proceso foto-fenton, el lixiviado crudo de su investigación presentaba un índice de biodegradabilidad de 0.2 lo que pudo facilitar su mayor eficiencia. Asimismo, Costa et al. (2015), lograron una degradación de la DQO entre 88 y 78%. Kwarciak & Krzywicka (2015), alcanzaron la remoción de la DQO al 75.3% (Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 0.33) en el proceso foto-fenton a un pH inicial de 3, además se observa que a un pH de 4 se remueve mayor porcentaje de DQO, tal como señalan Méndez et al. (2010), donde se evaluó la remoción de la materia orgánica de 74% a un pH de 4, sin embargo, a un pH de 2 y un pH de 3 hubo una remoción del 57% de DQO y 70% de DQO respectivamente que corresponde a una concentración de 600 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 1000 mg/L de Fe<sup>2+</sup>.

### Superficie de respuesta y gráfico de contorno

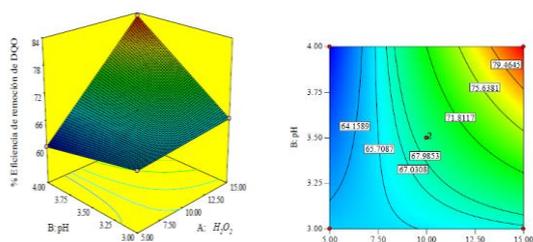


Figura 7. Efecto de la dosis de  $[H_2O_2]$  y pH para el % eficiencia de reducción de DQO.

En la Figura 7, se visualiza que se pueden obtener un alto porcentaje de eficiencia de reducción de DQO de 79.46% en el intervalo de dosis de peróxido de hidrógeno de 13 a 15 mL y pH de 3.75 a 4.00.

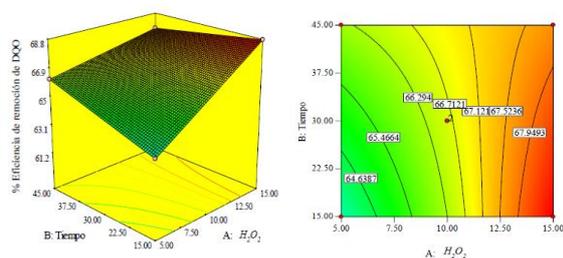


Figura 8. Efecto de la dosis de  $[H_2O_2]$  y tiempo de tratamiento para el % eficiencia de reducción de DQO.

En la figura 8, se observa que el intervalo dosis de peróxido de hidrógeno 13 a 15 mL y tiempo de tratamiento de 15 a 37.5 minutos se obtiene un porcentaje de eficiencia de reducción de DQO de 67.95%.

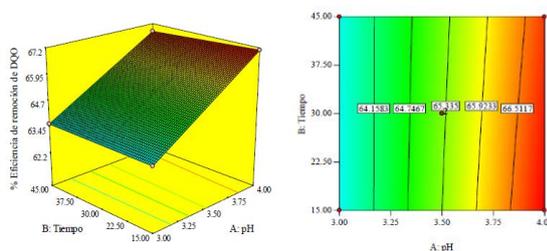


Figura 9. Efecto del pH y el tiempo de tratamiento para el % eficiencia de reducción de DQO.

En la figura 9, se observa que en el rango de pH de 3.8 a 4 y tiempo de tratamiento de 15 a 45 minutos se obtiene un porcentaje de eficiencia de reducción de DQO de 66.51%.

### Conclusión

Los valores determinados mediante la caracterización físico-química de los lixiviados de residuos sólidos de la celda transitoria de Huanuyo, señalan elevadas concentraciones de materia orgánica con valores de parámetros resaltantes como la DBO5 de 5140 mg/L y la DQO de 61300 mg/L, evidenciando ser un aspecto ambiental significativo de contaminación de los cuerpos receptores si este llegara a verterse sin previo tratamiento, alterando el correcto y natural desarrollo del ecosistema. Se determinó también un valor inicial de 6.8 para el pH; así como el índice de

biodegradabilidad del lixiviado crudo, alcanzando un valor de 0.08 lo que denota que el agua residual es "no biodegradable", concluyendo que utilizar tratamientos basados en tecnologías biológicas serían ineficientes y las menos adecuadas para tratar lixiviados con altas concentraciones de materia orgánica.

El mayor porcentaje de eficiencia de reducción de la materia orgánica se obtuvo en las condiciones evaluadas de una dosis de 15 mL/L de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$  al 50%) y 2000 mg/L de  $Fe^{2+}$  ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  al 99.9%), un pH de 4 y tiempo de contacto de 30 minutos; logrando reducir el lixiviado crudo con valores de 61300 mg/L a 10243 ppm de DQO final, lo que representa un valor de 83.29% de eficiencia del tratamiento por oxidación avanzada foto-fenton, que si bien contiene aun altas concentraciones de contaminante orgánico, este efluente pasó a ser un agua residual "biodegradable" con un IB = 0.5, lo que significa que puede acompañarse procesos biológicos como tratamientos posteriores al de oxidación avanzada. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que los procesos de oxidación avanzada tipo foto-fenton cuentan con un elevado potencial para el tratamiento de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica como son los lixiviados de residuos sólidos, mejorando a su vez el color y olor, así como la biodegradabilidad del efluente tratado.

### Referencias bibliográficas

- Abdulhussain, A., Guo, J., Liu, Z., Pan, Y. y Wisaam, S. (2009). *Journal of applied sciences research*, 5 (5), 534-545.
- Hirata, R. (2002). Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. *Revista Latino-Americana de hidrogeología*. 2, 81-90. Recuperado de: <https://revistas.ufpr.br/hidrogeologia/article/view/2624>
- Kwarciak & krzywicka (2015). Effect of ultrasonic field to increase the biodegradability of coke processing wastewater. *archives of waste management and environmental protection*. Vol. 17, 3: 133-142.
- Martínez, A., Padrón, W., Rodríguez, O., Chiquito, O., Escarola, M., Hernández, J., Elvira, E., Méndez, G., Tinoco, J., & Martínez, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances en química* Vol. 9 núm. 1. Mérida – Venezuela. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93330767005>
- Medina, C., Montero, E., y Cruz, L. (2016). Optimización del proceso fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Rev Soc Quím Perú*, 8(4), 454–466. Retrieved from <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v82n4/a07v82n4.pdf>
- Méndez, R., García, R., Castillo, E., & Sauri, M. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación fenton. *Ingeniería e Investigación*, 30(1),80-85.

ISSN: 0120-5609. Recuperado de:  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64312498015>

- Méndez, R., May, A., San Pedro, L., & Rojas, M., Giacomán, G. (2019). Leachate treatment with a combined fenton/filtration/adsorption processes. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(2), 1-9. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.22201/ii.25940732e.2019.20n2.013>
- 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. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103352>
- OEFA (2015). Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial. Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú. 135 p.
- Primo, O. (2008). Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Tesis Doctoral. Santander: Universidad de Cantabria.
- Red Muqui (2020). Inadecuada gestión y manejo de los residuos sólidos y el coronavirus en Puno. Muqui.org. Lima, Perú. <https://muqui.org/noticias/inadecuada-gestion-y-manejo-de-los-residuos-solidos-y-el-coronavirus-en-puno/>
- San Pedro, L., Méndez, R., Hernández, E., Giacomán, G., & Bassama, A. (2019). Removal of BPA from landfill leachates using fenton-adsorption process. *Química nova*, 42(4), 418-424. Recuperado de: <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. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582019315101>
- Torres, P., Barba, L., Ojeda, C., Martínez, J., Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico química y su potencial de toxicidad. *Actualidad y divulgación científica*, 17 (1), 245-255. Environment Federation, Washington DC, USA.