

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**ARTÍCULO CIENTÍFICO**

**REDUCCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA EN LIXIVIADO ESTABILIZADO DEL  
BOTADERO MUNICIPAL DE SAN RAMÓN MEDIANTE OXIDACIÓN AVANZADA  
FOTO – FENTON**

**PRESENTADO POR:**

**NELLY MAGALY MAYORCA MALPARTIDA**

Tingo María - Perú

2017

# REDUCCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA EN LIXIVADO ESTABILIZADO DEL BOTADERO MUNICIPAL DE SAN RAMÓN MEDIANTE OXIDACIÓN AVANZADA FOTO – FENTON <sup>1</sup>

Nelly Magaly Mayorca Malpartida<sup>2</sup>, José Antonio Blas Matienzo<sup>3</sup>, Antonio Emel, Lopez Villanueva<sup>4</sup>

## RESUMEN

La presente investigación se desarrolló con la finalidad de reducir la carga orgánica presente en el lixiviado estabilizado del botadero municipal de San Ramón mediante oxidación avanzada Foto-Fenton. Este estudio se realizó con un colector parabólico solar basado en la ecuación  $X^2=20y$  de 0.41 m<sup>2</sup> de área de colector solar y un tubo de borosilicato de 16 mm de diámetro.

El proceso Foto-Fenton se conformó de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) como oxidante, tricloruro férrico hexahidratado (FeCl<sub>3</sub>6H<sub>2</sub>O) como catalizador y radiación solar como fuente fotónica. Se estableció un pH=3 como pH inicial del proceso, empleando un diseño de dos factores con tres niveles (factorial 3X3). En el factor relación molar se evaluaron dosis de 1:15, 1:25 y 1:35 de Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y en el factor tiempo de exposición solar se evaluaron los periodos de 10, 20 y 30 minutos.

Como resultado se obtuvo una tasa de remoción de materia orgánica de 90.71%, 94.38% y 92.67% para la relación molar de 1:25 de Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. De igual manera, un índice de remoción de 85.60%, 89.21% y 88.04% para la relación molar de 1:15 de Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Por otro lado para la relación molar de 1:35 de Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se encontró una eficiencia de remoción de 86.02%, 87.92% y 87.15%. Se observó que la relación molar 1:25 de Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con exposición solar de 20 minutos tiene la mayor eficiencia de remoción de materia orgánica, reduciendo además microorganismos bacterianos y fúngicos, del cual se obtuvo una reducción del 37% de bacterias y 50% en numeración de fungi.

**Palabras clave:** Lixiviado, Oxidación Avanzada, Foto-Fenton, Fotocatálisis, Botadero Municipal, Relleno Sanitario, Captador Parabólico Solar.

## ABSTRACT

This research was developed with the purpose of reducing the organic charge present in the stabilized leaching from the San Ramon municipal dump through Photo-Fenton advanced oxidation. This study was done with a solar parabolic collector based on the equation  $X^2=20y$  with 0.41 m<sup>2</sup> being the area of the solar collector and a 16 mm diameter borosilicate tube.

The Photo-Fenton process consisted of hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) as an oxidant, ferric chloride hexahydrate (FeCl<sub>3</sub>6H<sub>2</sub>O) as a catalyzer and solar radiation as the photonic source. A pH=3 was established as the initial pH for the process, employing a two factor design with three levels (factorial 3x3). With relation to the factor molar, doses of 1:15, 1:25 and 1:35 of Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> were evaluated and for the factor of time of solar exposure, periods of 10, 20 and 30 minutes were evaluated.

For the results, an organic matter removal rate of 90.71%, 94.38% and 92.67% was obtained for the molar relation of 1:25 of Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Likewise, a removal index of 85.60%, 89.21% and 88.04% for the molar relation of 1:15 of Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. On the other hand, for the molar relation of 1:35 of Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, a removal efficiency of 86.02%, 87.92% and 87.15% was found. It was observed that the molar relation 1:25 of Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with 20 minutes of solar exposure has the greatest removal efficiency for the organic matter; also reducing bacterial and fungal microorganisms, of which a 37% reduction in bacteria and a 50% reduction in the number of fungi was obtained.

**Keywords:** Leached, Advanced Oxidation, Photo-Fenton, Photocatalysis, Municipal Dump, Sanitary Fill, Parabolic Solar Collector.

---

1. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.

2. Bachiller en Ciencias Ambientales, e-mail: Mayorca.nell@gmail.com

3. Ing. MSc. Docente de la FIIA.

4. Dr. Vicerrector de Investigación

## I. INTRODUCCION

La legislación peruana mediante la Ley General de Residuos Sólidos (Ley N° 27314) y su reglamento aprobado mediante DS N° 057-2004-PCM establece que la disposición final de residuos sólidos se realizará en rellenos sanitarios. En el Perú existen apenas trece rellenos sanitarios autorizados y en funcionamiento para una población que supera los treinta tres millones de habitantes (OEFA, 2015); esto demuestra que gran parte de los residuos generados en el país terminan en lugares de disposición final inadecuados; conocidos también como botaderos. Los lugares de disposición final producen un líquido llamado "lixiviado" que se forma a partir de la percolación del agua a través de los residuos compactados y enterrados en módulos o celdas de un relleno sanitario o botadero (ANCHIRAICO y VILCAHUAMAN, 2010). Los lixiviados son difíciles de tratar (Monje et al. 2004, citado por DÁVILA y GRANDA, 2013). En el informe índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional del 2014 - 2015, el OEFA no fiscaliza la producción de lixiviado en los rellenos sanitarios ni en los botaderos, por consiguiente no se tiene la información de la generación de lixiviado en el Perú.

Una de las alternativas más atractivas y viables en la actualidad para tratamiento de lixiviado está enfocada al uso de procesos de oxidación avanzada; capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. Los procesos de oxidación avanzada involucran el uso de oxidantes químicos, usualmente peróxido de hidrógeno, oxígeno u ozono con catalizadores tales como: sales de hierro u óxidos y puede requerir irradiación con luz ultravioleta o luz visible para acelerar la reacción (Doménech et al., 2001; citado por CERDA, 2007).

En la actualidad la municipalidad distrital de San Ramón no cuenta con relleno sanitario, en su lugar existe el botadero San Juan de Tulumayo Alto, el cual tiene tres pozos de captación lixiviado con recirculación como medida de control. Dada la peligrosidad de los lixiviados es de importancia el manejo y el tratamiento que se realice a los mismos.

A la problemática se planteó la siguiente hipótesis: La aplicación del proceso de oxidación avanzada Foto - Fenton tendrá una eficiencia de remoción del 80% de la materia orgánica presente en el lixiviado del botadero municipal de San Ramón.

## II. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. Lixiviados

Según la Ley de Residuos Sólidos N° 27314, se define como lixiviados al líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión elementos o sustancias que se encuentren en los mismos residuos. Se estima que por cada tonelada de residuos sólidos urbanos se genera 0.2 m<sup>3</sup> de lixiviado, y tras su clausura, un relleno sanitario puede seguir generando lixiviado durante más de 50 años (Kurniawan et al., 2010, citado por VILAR 2015).

#### 2.1.1. Botadero municipal San Juan de Tulumayo Alto en el distrito de San Ramón, Chanchamayo, Junín

El botadero municipal San Juan de Tulumayo Alto (Figura 1) está ubicado aproximadamente a 8 km de distancia de la Municipalidad distrital de San Ramón. Se estima que al menos se han enterrado más de 30 000 toneladas de residuos sólidos. El área impactada es de 8000 m<sup>2</sup> de un área total de 30 000 m<sup>2</sup> (INFORME N°036-2014-OEFA-ODJUNIN/RRSS, 2014). Actualmente el botadero municipal tiene tres tanques de lixiviado. Los dos primeros tanques captan el lixiviado generado de trincheras antiguas ya clausuradas y el tercer tanque capta el lixiviado tanto de trincheras antiguas como de la trinchera que se encuentra en operación. El tanque tiene una capacidad aproximada de 250 m<sup>3</sup> y un caudal promedio anual de 0.0005 m<sup>3</sup>/s.

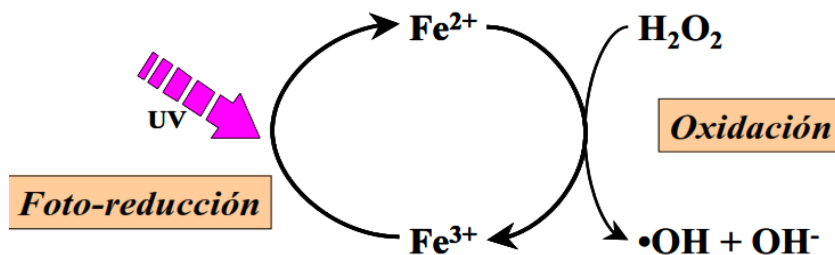


Figura 1. Botadero municipal (izquierda) y tanque de captación de lixiviado (derecha). San Ramón, Chanchamayo, Junín, 2017.

## 2.2. Proceso de oxidación avanzada

El proceso de oxidación avanzada (POA) se basa en la generación de especies fuertemente oxidantes (CÁCERES, 2002) como los radicales hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ) que actúan como iniciadores de la oxidación (GARCÉS y RODRÍGUEZ, 2009).

El reactivo Fenton se basa en la combinación de un oxidante fuerte con un catalizador, con el propósito de generar radicales hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ) (PRIMO, 2008). Este reactivo es fuertemente acelerado por la radiación UV/visible permitiendo el uso de radiación electromagnética con longitudes de onda desde 300 nm hasta 580 nm (Rossetti et al., 2001, citado por CERDA, 2007), proceso que entonces es llamado Foto-Fenton.



Fuente. CÁCERES, 2002.

Figura 2. Esquema del ciclo catalítico de la reacción de foto-Fenton.

## 2.3. Reactores solares para fotocatalisis

Las primeras plantas piloto fueron desarrolladas a finales de los 80, por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) y en Sandia National Laboratories, ambos en USA. Estos sistemas experimentales inicialmente fueron diseñados para aplicaciones térmicas, los cuales fueron modificados reemplazando el tubo colector por un tubo de vidrio Pyrex a lo largo del cual fluía el agua contaminada (BLANCO *et al.*, 2001), (Anderson *et al.*, citado por CÁCERES, 2002). Algunos reactores reportados son:

### 2.3.1. Reactores cilindro-parabólicos

Los colectores cilindro-parabólico tienen una superficie reflectante de forma parabólica que concentra la radiación sobre un receptor tubular situado en el foco de la parábola (CÁCERES, 2002).

### 2.3.2. Reactores solares sin concentración

Estos reactores se caracterizan por ser más estáticos y no poseer ningún tipo de seguimiento solar; usualmente consisten en una placa plana, en muchos casos situados hacia el Sol mediante una inclinación determinada (CÁCERES, 2002).

### 2.3.3. Reactores cilindro-parabólico compuestos (CPCs)

Los reactores cilindro parabólico compuesto son una mezcla entre los cilindro parabólicos y los sistemas sin concentración. Una de las ventajas más destacadas de este tipo de reactor es el uso de la radiación directa y difusa (CÁCERES, 2002), (CERDA, 2007).

## III. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Ubicación

Éste trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Calidad Del Agua, de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicado en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, Provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco; geográficamente ubicado con coordenadas UTM-WGS: 84 390699.75 E, 8970220.52S, Zona 18S. La toma de muestras del lixiviado se realizó en el botadero municipal San Juan de Tulumayo Alto, al sur oeste del distrito de San Ramón, provincia de Chanchamayo, región Junín; con coordenadas UTM-WGS: 84 462447E y 8767874N, Zona 18S.

### 3.2. Métodos

El muestreo se realizó siguiendo el Protocolo de Monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos según dispone la Autoridad Nacional del Agua-DGCRH.

Por su parte las relaciones molares de Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se calcularon suponiendo una oxidación de materia orgánica completa, basándose en la relación estequiométrica de:

$$1\text{g DQO} = 1\text{g O}_2 = 0.00125\text{ mol O}_2 = 0.0625\text{ mol H}_2\text{O}_2 = 2.125\text{ g H}_2\text{O}_2$$

$$1\text{ g DQO} = 2.125\text{ g H}_2\text{O}_2$$

La irradiación solar se determinó utilizando un luxómetro marca ANAHEIM SCIENTIFIC, Modelo H100 Ligh Meter. La energía acumulada se calcula según la ecuación:

$$E_{UV,n} = E_{UV,n-1} + \Delta t_n UV_{G,n} \left( \frac{A}{V} \right); \Delta t_n = t_n - t_{n-1}$$

Donde:

$E_{UV,n}$  = Energía acumulada por unidad de volumen del reactor.

$UV_{G,n}$  = radiación útil incidente

$\Delta t_n$  = intervalo de tiempo de las mediciones

$A$  = superficie exterior del reactor

$V$  = volumen del reactor

El Índice de Oxidabilidad al Permanganato se halló por el método volumétrico. Es indicador se encuentra en la norma española UNE-EN ISO 8467, elaborado por el comité técnico AEN/CTN77 Medio ambiente cuya secretaria desempeña la AENOR (ROJAS, 2008).

El potencial de hidrógeno se determinó usando el potenciómetro marca EXTECH modelo 407227 siguiendo el METODO 4500-H+B, de APHA-AWWA-WEF (2012).

La cantidad de sólidos totales secados se halló de acuerdo al METODO 2540 B de APHA-AWWA-WEF (2012). La cantidad de sólidos totales disueltos se halló de acuerdo al METODO 2540 C de APHA-AWWA-WEF (2012). La cantidad de sólidos totales suspendidos se determinó siguiendo el METODO 2540 D de APHA-AWWA-WEF (2012).

La enumeración de microorganismos viables se halló con el Método Recuento Estándar en Placa. La Enumeración de microorganismos Coliformes Totales se determinó con el Método Número más Probable. La Enumeración Coliformes Termotolerantes – *Escherichia coli* termotolerantes, mediante el Método Número más Probable. Para la determinación de *Salmonella*, se utilizó el Método de Enriquecimiento en medio selectivo de Agar Salmonella Shigella. Los *Staphylococcus aureus*, se halló mediante el Método de Presencia y Ausencia en Medio Manitol Salado. El Método de las Diluciones con Cloruro de

Sodio al 3%, nos permitió hallar bacterias *Vibrio cholerae* y finalmente la Numeración de fungi (hongos y levaduras), se realizó mediante el Método Recuento Estándar en Placa.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1 Caracterización físico-química del lixiviado

Durante la caracterización físico-química y microbiológica de lixiviado, se han obtenido diversos resultados que se resumen en los Cuadros 1 y 2 respectivamente:

Cuadro 1. Parámetros físico-químicos iniciales del lixiviado.

Parámetros	Unidades	Cantidad	CV (%)
Índice de oxidabilidad Mn <sup>4+</sup>	mgO <sub>2</sub> /L	2668.11	0.07
Temperatura	°C	24	0.02
pH	H <sup>+</sup>	8.12	0.04
Potencial eléctrico	mV	21.50	0.02
ST	mg/L	4933.30	0.00
SDT	mg/L	4866.70	0.00
SST	mg/L	66.70	0.01

La cantidad de materia orgánica medida como índice de oxidabilidad al permanganato presente en el lixiviado sin tratar es de 2668.1 mgO<sub>2</sub>/L, con un pH de 8.12. Estos valores son característicos de un lixiviado estabilizado. Se observó además la presencia de microorganismos aerobios viables y fungi.

Cuadro 2. Parámetros microbiológicos iniciales del lixiviado.

Parámetros microbiológicos	Unidades	Cantidad
Enumeración de microorganismos aerobios viables	UFC/mL	54 x 10 <sup>3</sup>
Coliformes totales	NMP/100mL	0
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	23
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	Presencia
<i>Vibrio cholerae</i>	-	Presencia
Numeración de fungi	UFC/mL	6 x 10 <sup>3</sup>

La evaluación de las relaciones molares en la degradación del lixiviado, se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y Fe(III) a utilizarse en cada experimento.

Trat	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g/L)	Volumen (mL)	mol/ L	Relación Molar Fe	FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O PM= 278	Cantidad de Fe (g/L)
1	5.21	10.21	0.15	1:15	0.01	2.65
2	5.82	11.40	0.17	1:15	0.01	2.96
3	5.98	11.73	0.18	1:15	0.01	3.05
4	5.21	10.21	0.15	1:25	0.01	1.59
5	5.82	11.40	0.17	1:25	0.01	1.78

Continúa el Cuadro N°3...

Trat	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g/L)	Volumen (mL)	mol/ L	Relación Molar Fe	FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O PM= 278	Cantidad de Fe (g/L)
6	5.98	11.73	0.18	1:25	0.01	1.83
7	5.21	10.21	0.15	1:35	0.00	1.14
8	5.82	11.40	0.17	1:35	0.01	1.27
9	5.98	11.73	0.18	1:35	0.01	1.31

El volumen utilizado en la degradación de lixiviado estabilizado ha sido de 10.21 mL a 11.73 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 1.14 mL a 3.05 mL de Fe(III).

El promedio de las medidas acumuladas de irradiación solar para cada uno de los experimentos, se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Promedio de irradiancia acumulada de los tratamientos.

Experimentos	Irradiancia acumulada Ix/m <sup>2</sup>	Irradiancia acumulada Ix/m <sup>2</sup>	Irradiancia acumulada Ix/m <sup>2</sup>
	10 minutos	20 minutos	30 minutos
1	1465.86	2949.00	4771.94
2	1520.86	3159.63	4819.80
3	1561.91	3176.75	4822.33
4	1594.87	3221.92	4871.78
5	1596.93	3224.29	4872.73
6	1626.73	3251.87	4905.86
7	1628.47	3273.27	4906.81
8	1642.42	3299.58	4956.73
9	1647.01	3363.45	5043.90

El análisis de varianza para los datos de radiación acumulada, se muestra en el Cuadro 5 y la confianza estadística según la prueba de Tukey, para la irradiancia acumulada se presenta en el Cuadro 6.

Cuadro 5. Análisis de varianza para valores de irradiancia acumulada.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.	Sig.
Tiempo	4.89647E7	2	2.44824E7	3418.82	0.00	**
Fracción molar	39464.3	2	19732.2	2.76	0.09	
Interacción	23372.1	4	5843.01	0.82	0.53	
Error experimental	128899.	18	7161.06			
Total	4.91565E7	26				

Según Krutzler (1999), citado por CABRERA (2013), el aumento de la concentración de contaminantes en un lixiviado no implica incrementar el tiempo en su tratamiento. Debido que la relación de ambos no es directamente proporcional, por tanto si el lixiviado sufre importantes cambios en la concentración de contaminantes, el tratamiento y el diseño del proceso necesitará nuevos datos.

Cuadro 6. Prueba Tukey para Irradiancia acumulada por Tiempo de retención

Tiempo de retención	Media (lx/m <sup>2</sup> )	Grupos Homogéneos
10	1587.23	X
20	3213.31	X
30	4885.76	X

Según el análisis de varianza, el tiempo de retención utilizado en el proceso tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la irradiancia acumulada con un 95% de nivel de confianza, esto debido a que, a medida que el tiempo de exposición solar se incrementa se incrementa también la irradiancia acumulada.

Para la relación de la irradiancia acumulada con los parámetros físico-químicos evaluados se estableció diversos análisis. En la figura 3 se observa el comportamiento del pH respecto a la irradiancia acumulada. Se obtuvo un valor máximo de pH=2.78 con 1623.45 lx/m<sup>2</sup> para el tiempo de 10 minutos; un máximo de pH=2.8 con 3274.90 lx/m<sup>2</sup> para el periodo de 20 minutos y un máximo de pH=2.88 con 4907.55 lx/m<sup>2</sup> para el lapso de 30 minutos de exposición solar.

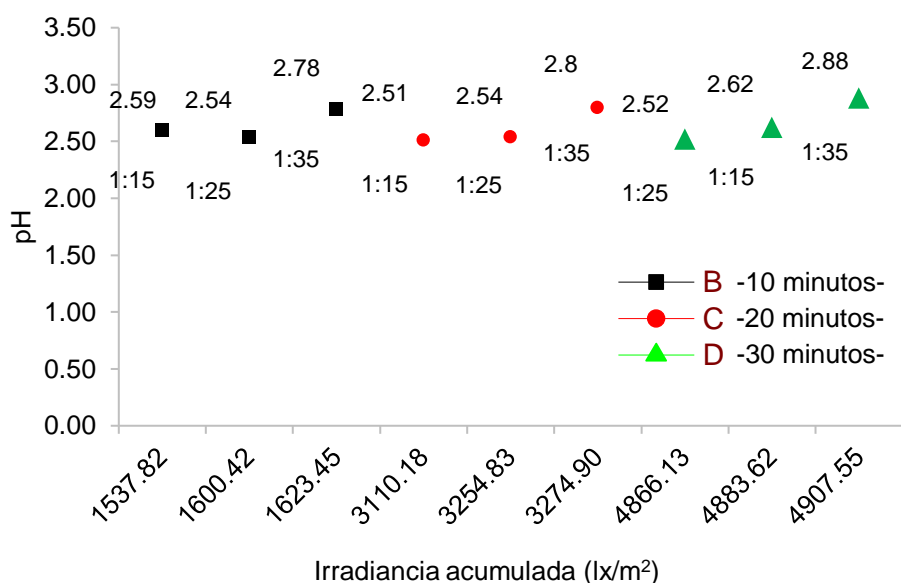


Figura 3. Comportamiento del pH en el proceso foto-Fenton.

Según CÁCERES (2002), CERDA (2007), PRIMO (2008), GARCÉS y RODRÍGUEZ (2009) y García (2007), citado por AZNATE et al. (2013); en el proceso Foto-Fenton la velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH=3. Sin embargo se ha observado que el pH varía constantemente durante el proceso en este experimento. En la investigación de CERDA (2007), el pH inicial aumenta ligeramente pero se mantiene en el rango de 3 y por lo contrario en la investigación de PRIMO (2008), el pH inicial resultó con una ligera disminución reportando valores entre 2.2 y 2.8. En esta investigación los valores de pH tuvieron un comportamiento similar a los reportados por PRIMO (2008). El pH inicial de 3 disminuyó a valores en el rango de 2.4 a 2.9.

En el Cuadro 7, se indican los diversos valores obtenidos para el análisis de varianza de los valores de pH. En el Cuadro 8, se presentan los resultados de la prueba de Tukey para el potencial de hidrógeno.



Cuadro 7. Análisis de varianza para los valores de pH.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.	Signif.
Tiempo	0.0158296	2	0.00791481	1.10	0.36	
Relación molar	0.436896	2	0.218448	30.29	0.00	**
Interacción	0.0232593	4	0.00581481	0.81	0.54	
Error experimental	0.1298	18	0.00721111			
Total	0.605785	26				

Cuadro 8. Prueba Tukey para pH por relación molar.

Relación molar	Media (pH)	Grupos Homogéneos
1:25	2.53	X
1:15	2.57	X
1:35	2.82	X

La prueba estadística confirma a 95% de confianza que las medias de las relaciones molares difieren entre tratamientos para el pH, por lo que resultan estadísticamente significativas, en contraposición al tiempo de retención que no presenta diferencia significativa entre los periodos evaluados en el tratamiento Foto-Fenton (Figura 4).

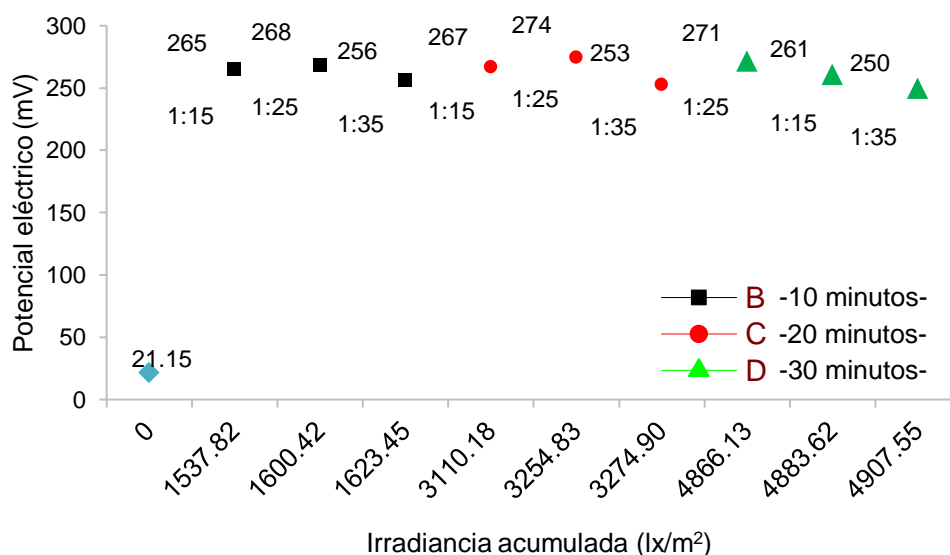


Figura 4. Comportamiento del potencial eléctrico en el proceso Foto-Fenton.

De acuerdo a lo observado en la figura 4, las medidas de Potencial eléctrico tienen un valor inicial de 21.5 mV, y varían considerablemente con la aplicación del proceso foto-Fenton. Se obtuvo un valor máximo de 268 mV con 1600.42 lx/m<sup>2</sup> para el tiempo de exposición de 10 minutos; un máximo de 274 mV con 3254.83 lx/m<sup>2</sup> para el periodo de 20 minutos y un máximo de 271 mV con 4866.13 lx/m<sup>2</sup> para el lapso de 30 minutos, con las diversas relaciones molares como se muestra en la Figura 4.

El análisis de varianza y la prueba de Tukey para el Potencial eléctrico, se muestran en el cuadro 9 y 10 respectivamente.

Cuadro 9. Análisis de varianza para valores de potencial eléctrico.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif	Signif.
Tiempo	73.1852	2	36.5926	2.49	0.11	
Fracción molar	1557.63	2	778.815	53.10	0.00	**
Interacción	104.815	4	26.2037	1.79	0.18	
Error experimental	264.0	18	14.6667			
Total	1999.63	26				

Cuadro 10. Prueba Tukey para el potencial eléctrico por relación molar.

Relación molar	Media (mV)	Grupos Homogéneos
1:35	252.78	X
1:15	264.11	X
1:25	271.22	X

La prueba estadística Tukey confirma a 95% de confianza que las medias de las relaciones molares difieren entre los tratamientos para el potencial eléctrico, por lo que resultan estadísticamente significativo, en contraposición al tiempo de retención que no presenta diferencia significativa para los tratamientos aplicados.

La Figura 5 muestra la relación entre pH y el Potencial eléctrico, para los datos obtenidos en las evaluaciones respectivas.

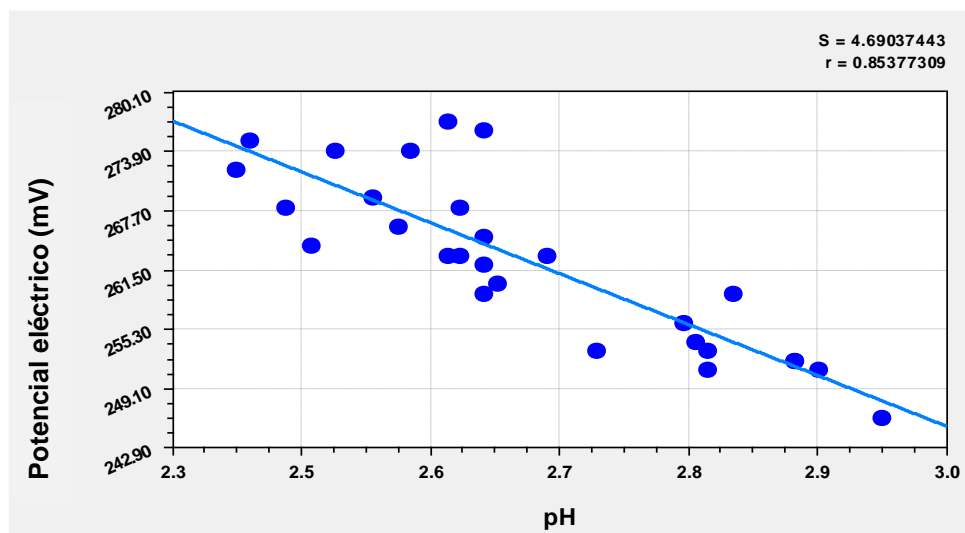


Figura 5. Relación entre potencial eléctrico y el pH en el proceso Foto-Fenton.

Los valores de pH y potencial eléctrico muestran una relación inversamente proporcional tal como se muestra en la Figura 5. La línea de tendencia para esta relación tiene un error estándar de 4.7 y un coeficiente de correlación de 85 %.

La temperatura ambiental así como los valores registrados al ingreso y salida de lixiviado del proceso fotocatalítico se muestran en la Figura 6. Los experimentos se realizaron en días despejados para tener medidas constantes entre repeticiones y pruebas.

La temperatura de salida registró un valor máximo de 37°C con 1623.45 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 36°C con 1537.82 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el tiempo de 10 minutos; un máximo de 37.33°C con 3274.90 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 36.33°C con 3111.18 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el periodo de 20 minutos; un máximo de 37.33°C con 4907.55 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 36.00°C con 4883.62 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el lapso 30 minuto de exposición solar.

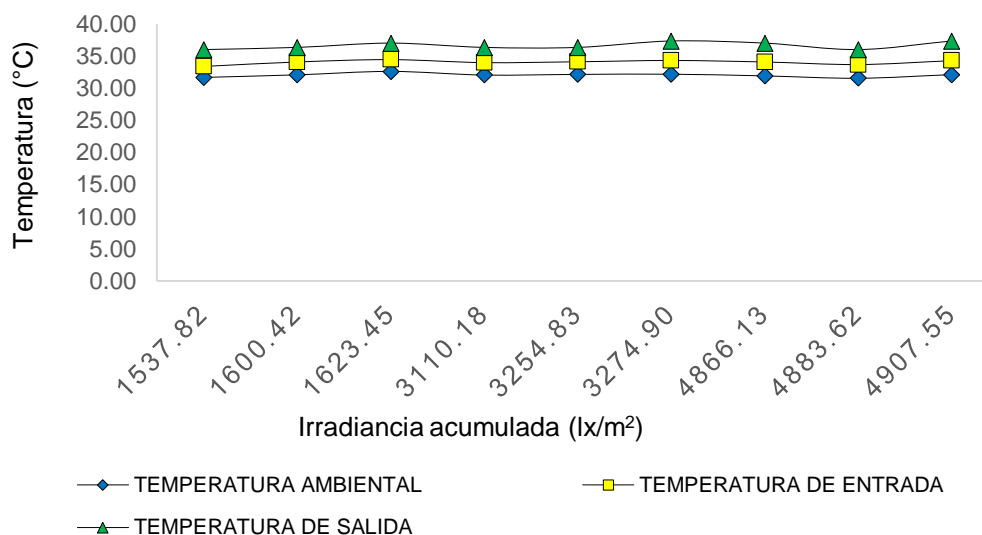


Figura 6. Comportamiento de la temperatura en el proceso Foto-Fenton.

Se realizó una prueba preliminar a temperaturas de 47°C, obteniendo una remoción de tan solo 15% de materia orgánica, comparada a una remoción de materia orgánica de 94.38 % obtenida a temperatura de 34°C; confirmando que el proceso Foto-Fenton no mejora la eficiencia de remoción a temperaturas mayores de 45°C; de acuerdo a lo mencionado por BLANCO et al (2001), CÁCERES (2002), DOS SANTOS (2009), SIRTORI (2010); detallan que la temperatura no desempeña un papel importante en el proceso fotocatalítico, debido a que el proceso Foto-Fenton es fotónico a diferencia de los procesos térmicos. Los resultados también concuerdan con GARCÍA (2007) y PRIMO (2008), los cuales mencionan que el aumento de temperatura supone un aumento en la velocidad de las reacciones de oxidación, pero los valores demasiado altos de temperatura, superiores a 40°C pueden descomponer el peróxido de hidrógeno perjudicando el proceso de degradación y reduciendo la eficiencia del tratamiento.

Los análisis estadísticos, como el cálculo de varianza y la prueba de Tukey correspondientes a los valores de temperatura de entrada y salida se muestran en los cuadros 11, 12 Y 13 respectivamente.

Cuadro 11. Análisis de varianza para los valores de temperatura de entrada.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.
Tiempo	0.134074	2	0.067037	0.15	0.86
Fracción molar	2.0363	2	1.01815	2.24	0.13
Interacción	0.454815	4	0.113704	0.25	0.91
Error experimental	8.16667	18	0.453704		
Total	10.7919	26			

Cuadro 12. Análisis de varianza para los valores de temperatura de salida.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.	Signif.
Tiempo	0.518519	2	0.259259	0.87	0.43	
Relación molar	5.62963	2	2.81481	9.50	0.00	**
Interacción	0.814815	4	0.203704	0.69	0.61	
Error experimental	5.33333	18	0.296296			
Total	12.2963	26				

Cuadro 13. Prueba Tukey para Temperatura de salida por relación molar.

Relación molar	Media (°C)	Grupos Homogéneos
1:15	36.11	X
1:25	36.56	X
1:35	37.22	X

La prueba estadística Tukey permite confirmar a 95% de confianza que las medias de las relaciones molares difieren entre los tratamientos para la temperatura de salida, por lo que resultan estadísticamente significativos. En contraposición al tiempo de retención que no presenta diferencia significativa entre las dosis aplicadas para los tratamientos.

Se ha registrado un valor máximo de 70% para la humedad relativa y un mínimo de 62% para el periodo de 10 minutos, también un máximo de 70% y un mínimo de 62% para el periodo de 20 minutos, y finalmente se determinó un máximo de 69% y un mínimo de 63% de humedad relativa para el lapso de 30 minutos de exposición solar. La Figura 7 muestra la relación entre la irradiancia acumulada y la humedad relativa en el Foto-Fenton utilizado.

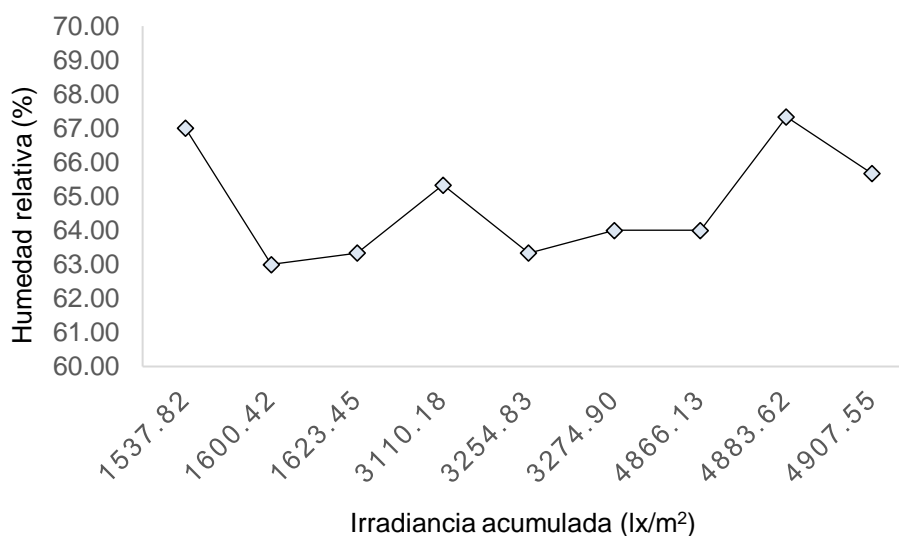


Figura 7. Medidas de humedad relativa en el proceso Foto-Fenton.

Los sólidos disueltos, suspendidos y totales, muestran que los valores iniciales del lixiviado sin tratar se incrementaron. Se obtuvo un valor máximo de 9266 mg/L para los sólidos totales disueltos, un valor máximo de 900.00 mg/L para los sólidos totales suspendidos y valor máximo de 10033.30 mg/L para los sólidos totales. Todos los experimentos incrementaron los valores para el parámetro de sólidos como se muestra en la Figura 8.

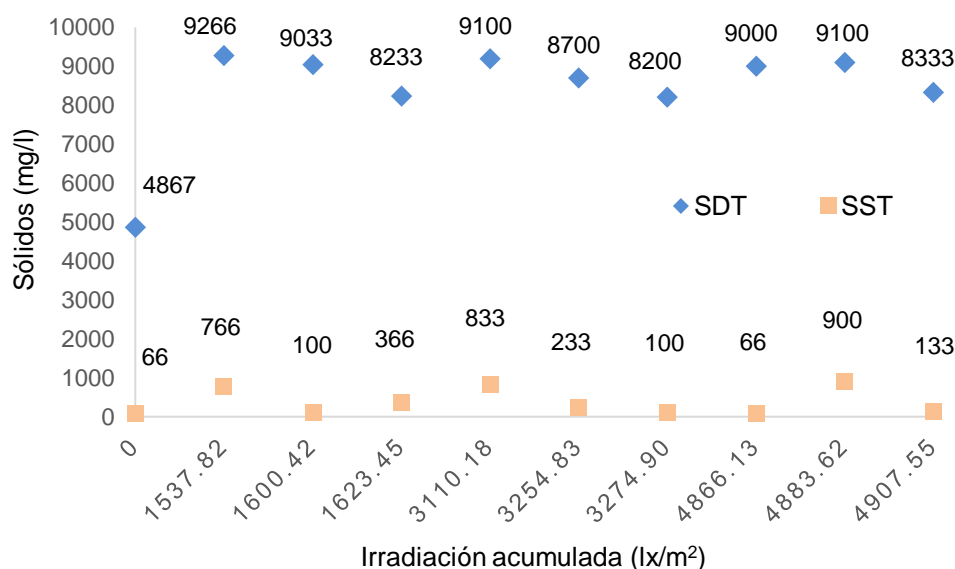


Figura 8. Comportamiento de los sólidos en el proceso Foto-Fenton.

Según CÁCERES (2002), la aplicabilidad de los procesos de oxidación avanzada como tratamiento para aguas contaminadas son idóneos cuando las concentraciones de DQO tienen valores de hasta 10 000 mgO<sub>2</sub>/L; para valores superiores es apropiado los tratamientos como la oxidación húmeda o la incineración. En el lote de lixiviado que se utilizó en esta investigación obtuvo valores de 2451.89 mgO<sub>2</sub>/L, 2737.30 mgO<sub>2</sub>/L y 2815.14 mgO<sub>2</sub>/L; los cuales se encuentran dentro del rango considerado por Cáceres (2002).

La materia orgánica medida como índice de oxidabilidad al permanganato en el lixiviado crudo inició con un promedio de 2668.11 mgO<sub>2</sub>/L. La degradación del proceso Foto-Fenton logró reducir la materia orgánica hasta 153.95 mgO<sub>2</sub>/L, según se muestra en el Cuadro 14 y la Figura 9 respectivamente.

Cuadro 14. Reducción de la materia orgánica en el lixiviado.

Tiempo	Relación molar 1:15 mgO <sub>2</sub> /L	Relación molar 1:25 mgO <sub>2</sub> /L	Relación molar 1:35 mgO <sub>2</sub> /L
0	2451.89	2737.30	2815.14
10	353.15	264.50	293.33
20	254.27	153.95	200.65
30	393.51	340.18	361.80

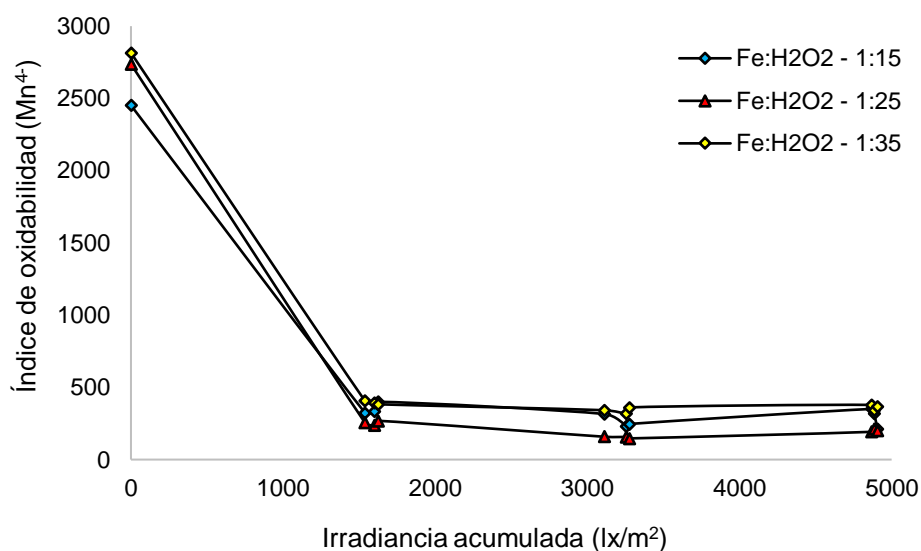


Figura 9. Reducción de la materia orgánica con el tratamiento Foto-Fenton.

El tratamiento Foto-Fenton redujo considerablemente la materia orgánica iniciando con un pH=3 a periodos de 10, 20 y 30 minutos de exposición solar con relaciones molares de 1:15, 1:25 y 1:35 respectivamente, como se representa en el Cuadro 15 y en la Figura 10.

Cuadro 15. Eficiencia de remoción de materia orgánica en el proceso Foto-Fenton.

Tiempo	Relación molar 1:15 (%)	Relación molar 1:25 (%)	Relación molar 1:35 (%)
10	85.60	90.71	86.02
20	89.21	94.38	87.92
30	88.04	92.67	87.15

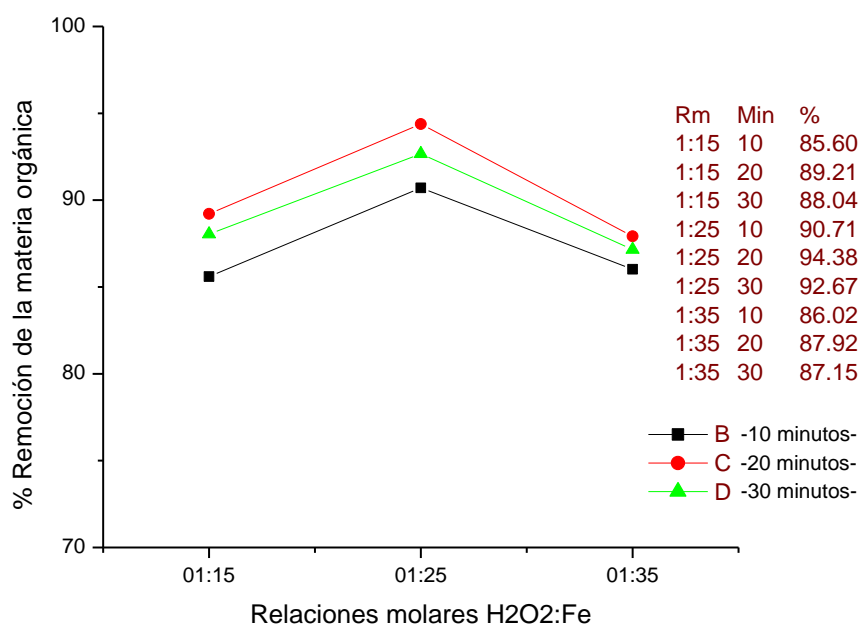


Figura 10. Eficiencia de remoción de materia orgánica con el proceso Foto-Fenton.

La eficiencia de remoción de la materia orgánica con el proceso de oxidación avanzada Foto-Fenton, fue superior al 85%. La máxima eficiencia de remoción alcanzada fue de 94.38 % con dosis de 1:25 y tiempo de 20 minutos, el valor mínimo observado fue de 85.60% con la dosis de 1:15 para un periodo de 10 minutos de exposición solar.

El análisis estadístico respectivo se presenta en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Análisis de varianza para los valores de la remoción de materia orgánica.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.
Tiempo	3.10245	2	1.55123	0.14	0.87
Relación molar	42.6599	2	21.33	1.99	0.17
Interacción	7.86686	4	1.96671	0.18	0.94
Error experimental	193.418	18	10.7455		
Total	247.048	26			

El análisis de varianza permite confirmar a un 95% de confianza que las medias del tiempo de retención no difieren entre sí, las relaciones molares no muestran diferencia significativa entre las dosis aplicadas. Por otro lado los factores tiempo de retención y relación molar no muestran interacción significativa para la remoción de materia orgánica en el lixiviado estabilizado.

#### 4.2 Caracterización bacteriana y fúngica del lixiviado

Las muestras con mayor eficiencia de remoción con las diferentes relaciones molares, se obtuvo para periodos de 20 minutos de exposición al sol.

Para la relación molar de 1:15 se obtuvo  $43 \times 10^3$  UFC/mL en enumeración de microorganismos viables, ningún hallazgo de coliformes totales, ningún hallazgo en coliformes termotolerantes, Ausencia en *Salmonella*, Presencia en *Staphylococcus aureus*, la Ausencia en *Vibrión cholerae* y  $2 \times 10^3$  UFC/mL en numeración de Fungi. El Cuadro 17 resume lo obtenido para la caracterización bacteriana y fúngica con una relación molar de 1:15 a periodo de 20 minutos.

Cuadro 17. Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:15 a periodos de 20 minutos.

PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	UNIDADES	CANTIDAD
Enumeración de microorganismos aerobios viables	UFC/ml	$43 \times 10^3$
Coliformes totales	NMP/100ml	0
Coliformes termotolerantes	NMP/100ml	0
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	Presencia
<i>Vibrión cholerae</i>	-	Ausencia
Numeración de Fungi	UFC/ml	$2 \times 10^3$

De igual manera, para la relación molar de 1:25 se obtuvo  $34 \times 10^3$  UFC/mL en enumeración de microorganismos viables, no se observaron coliformes totales, no hubo presencia de coliformes termotolerantes, ausencia en *Salmonella*, presencia en

*Staphylococcus aureus*, presencia en *Vibrión cholerae* y  $3 \times 10^3$  UFC/mL en numeración de Fungi.

En el Cuadro 18, muestra los resultados de la caracterización bacteriana y fúngica para la relación molar 1:25 en un periodo de exposición de 20 minutos

Cuadro 18. Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:25 a un periodo de exposición de 20 minutos.

Parámetros microbiológicos	Unidades	Cantidad
Enumeración de microorganismos aerobios viables	UFC/mL	$34 \times 10^3$
Coliformes totales	NMP/100mL	0
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	0
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	Presencia
<i>Vibrio cholerae</i>	-	Presencia
Numeración de Fungi	UFC/mL	$3 \times 10^3$

Para la relación molar de 1:35 presentado en el Cuadro 19, se obtuvo  $46 \times 10^3$  UFC/mL en enumeración de microorganismos viables, no se reportó coliformes totales, no hay presencia de coliformes termotolerantes, ausencia en *Salmonella*, presencia en *Staphylococcus aureus*, presencia *Vibrión cholerae* y  $4 \times 10^3$  UFC/mL en numeración de Fungi.

Cuadro 19. Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:35 a tiempo de 20 minutos.

Parámetros microbiológicos	Unidades	Cantidad
Enumeración de microorganismos aerobios viables	UFC/mL	$46 \times 10^3$
Coliformes totales	NMP/100mL	0
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	0
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	Presencia
<i>Vibrio cholerae</i>	-	Presencia
Numeración de Fungi	UFC/mL	$4 \times 10^3$

## V. CONCLUSIONES

1. El lixiviado presentó valores físico-químicas característicos de un lixiviado viejo o estabilizado, mostrando un valor de 2668 mg/l de materia orgánica, 8.12 de pH con presencia bacteriana y fúngica
2. Para la degradación del lixiviado con el proceso Foto-Fenton, se evaluaron las relaciones molares de 1:15, 1:25 y 1:35 de Fe(III):H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a tiempos de 10, 20 y 30 minutos, obteniendo los mejores resultados con el periodo de 20 minutos de exposición solar.
3. La eficiencia de remoción alcanzada con el proceso Foto-Fenton en el lixiviado es de 94.38 % para una relación molar de 1:25, a un periodo de exposición de 20 minutos y 3254.8 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia solar acumulada.



4. Se determinó una reducción de 37 % en la enumeración de microorganismos viales, ausencia de coliformes totales, coliformes termotolerantes y *salmonella*, presencia de *Vibrio cholerae* y una reducción del 50 % en numeración de Fungi.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Aplicar el proceso Foto-Fenton por lotes de lixiviado, caracterizando inicialmente los parámetros físico-químicos y microbiológicos.
2. Monitorear la generación de gases en el colector parabólico solar.
3. Caracterizar los gases generados en el proceso Foto-Fenton.
4. Realizar el análisis complementario de carbono orgánico total (TOC); como indicador de mineralización de los contaminantes con el proceso Foto-Fenton.
5. Determinar la factibilidad del uso de lixiviado como biol.
6. Cubrir los tanques de captación de lixiviado en el botadero municipal para reducir el volumen generado de lixiviado.
7. Realizar un tratamiento complementario al proceso de oxidación avanzada, con el propósito de lograr un pH neutro.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCHIRAICO, C., VILCAHUAMAN, Q. 2010. Evaluación del tratamiento de lixiviado del relleno sanitario de Ancón, mediante procesos de coagulación – floculación y sedimentación. Tesis de Ingeniería. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 116 p.
- APHA-AWWA-WEF. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 Ed. American Public Health Association /AmericanWaterWorks Association/Water Environment Federation, Washington. 984 p.
- AZNATE, T., CERRO B., OROZCO, B. 2013. Degradación por fotocátalisis homogénea (Foto - Fenton) de efluentes líquidos contaminados con residuos de fenol. Tesis de Ingeniería. Colombia. Universidad de Cartagena de Indias. 87 p.
- BLANCO, G., MALATO, R., PERAL, J., SÁNCHEZ, S., CARDONA, A. 2001. Diseño de reactores para fotocátalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones. Ed. Miguel A. Blesa, La Plata-Argentina, ISBN 987-43-3809-1. 243-266 p.
- BONEY, A. DR. S.S. 2016. Study of Landfill Leachate Treatment Using Photo-Fenton Process – A Review. International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES), NIT, Hamirpur, India. ISSN (Online) 2319-183X, (Print) 2319-1821 p.
- CABRERA, R. 2013. Combinación de Fotocátalisis solar con Biorreactores de Membrana para el Tratamiento de Aguas Tóxicas. Modelado del proceso Foto – Fenton como Herramienta de Diseño y Optimización. Tesis Doctoral. Almería, España. Universidad de Almería. 294 p.
- CÁCERES, V. 2002. Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar. Tesis Doctoral. Almería, España. Universidad de Almería. 368 p.
- CERDA, S. 2007. Aplicación de Foto-Fenton a lixiviado de rellenos sanitarios, Tesis de Maestría, Jiutepec, Morelos, México. Universidad Autónoma de México, 128 p.
- CENSOLAR – CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ENERGÍA SOLAR, 2013. Instalaciones de energía solar, Curso programado “Proyectista instalador de energía solar”, ISBN: 978-84-86505-38-7.
- CHRISTOPHER, K.M., VAN, K.E., DEAN, R.A., SPENCER, A.C. Bioquímica. Martín Romo, Miguel. 4 Ed. Madrid, España, Pearson Educación S.A. 1343 p.
- DÁVILA, A., GRANDA, P. 2013. Evaluación comparativa en una planta a escala piloto de lodos activados de aireación prolongada en el tratamiento de lixiviado de relleno sanitario municipal diluido con agua residual. Tesis para Ingeniería. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 203 p.

- DOS SANTOS, .2009. Tratamiento terciário do lixiviado de um aterro de resíduos urbanos pelos processos Fenton e Foto-Fenton com radiação solar. Tesis de Maestría. Universidade do Porto. Porto, Portugal. 93 p.
- FARROKHI, M., DINDARLOO, K. JAMALI, A. 2015. Optimization of Fenton Oxidation Process for Biodegradability Enhancement of a Mature Landfill Leachate Using Response Surface Methodology. Research Journal of Environmental toxicology, Iran. 9 (6): 274-289.
- GARCÉS y RODRÍGUEZ, 2009, Evaluación de la fotodegradación sensibilizada con  $\text{TO}_2$  y  $\text{Fe}^{3+}$  para aguas coloreadas. Corporación universitaria Lasallista. Revista lasallista de investigación. Caldas, Antioquia, Colombia. 1: 54-59.
- GARCÍA, M. 2007. Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for comercial reactive azo dyes removal, Tesis de PhD, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, Barcelona, España. 262 p.
- MALATO, S., FERNÁNDEZ, P., MALDONADO, M., BLANCO, J. GERNJAK, W., 2009. Decontamination and didinfection of wáter by solar photocatalysis: Recent overview and trends. ELSEVIER., España. 147 (1):1 – 59.
- MENDEZ, N., CASTILLO, B., GARCÍA, R., SAURI R. 2010. Tratamiento de lixiviado por oxidación Fenton. Ingeniería e Investigación, Yucatán, México. 30(1).
- OEFA, 2014-2015. 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.
- ORTA, T., ROJAS, N. YAÑEZ, I. MONGE, I., LONDOÑO, J. 2006. Alternativa de tratamiento de lixiviado de rellenos sanitarios en plantas de aguas residuales urbanas. AIDIS. México D.F. México. 1:16.
- PRIMO, M. 2008. Mejoras en el tratamiento de lixiviado de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Tesis Doctoral. Cantabria, España. Universidad de Cantabria. 41 p.
- QUICAÑO, T. 2014. Reducción de compuestos fenólicos en aguas residuales de baños portátiles con procesos de oxidación química avanzada ozono – Peróxido de hidrógeno. Tesis de Maestría. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 82 p.
- ROJAS, J. 2008. Potabilización de aguas superficiales mediante el proceso de ultrafiltración con membranas arrolladas en espiral. Tesis doctoral. Granada, España. Universidad de Granada. 271 p.
- SANCHEZ, L. 2007. Tratamientos combinados físico - químico y de oxidación para la depuración de aguas residuales en la industria corchera. Tesis Doctoral. Badajoz, España. Universidad de Extremadura. 708 p.
- SIRTORI, C. 2010. Evaluación analítica de procesos de transformación biológica, fotoquímica y fotocatalítica de fármacos en agua. Tesis Doctoral. España. Universidad de Almería. 304 p.
- VILAR, A. 2015. Evaluación del tratamiento integral del lixiviado de vertedero de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral. Coruña, Brasil. Universidade da Coruña. 228 p.
- WU, Y., PASSANANTI, M., BRIGANTE, M., DONG, W., MAIHOT, G., 2014. Fe (III)-EDDS complex in Fenton and photo-Fenton processes: from the radical formation to the degradation of a target compound. NCBI. USA. 21, 21:12154 – 12162.
- XIV CONFERENCIA ATEGRUS VERTEDEROS CONTROLADOS. (2013, LLEIDA, ESPAÑA). 2013. Lixiviados de vertederos: Complejo de residuos de difícil tratamiento. Wehrle Medioambiente. Lleida, España. [En línea]: (<https://www.youtube.com/watch?v=0vGgflLHEy4>, 14 nov. 2013).