

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO  
ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO  
SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES**

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

“APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO  
ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO  
SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR”

Realizado por:

**JOSÉ DAVID YÉPEZ VENEGAS**

Director del proyecto:

**MSc. Katty Coral Carrillo**

Como requisito para la obtención del título de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Quito, 8 de enero de 2020

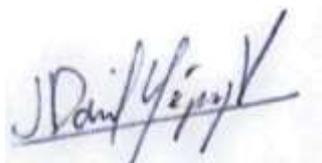
APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DEL INGA, QUITO  
ECUADOR

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

**DECLARACIÓN JURAMENTADA**

Yo, JOSÉ DAVID YÉPEZ VENEGAS, con cédula de identidad # 1003864038, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



José David Yépez Venegas

1003864038

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

**DECLARATORIA**

El presente trabajo de investigación titulado:

“APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DEL INGA, QUITO  
ECUADOR”

Realizado por:

JOSÉ DAVID YÉPEZ VENEGAS

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

Katty Coral Carrillo

quien considera que constituye un trabajo original de su autor.



Katty Verónica Coral Carrillo

1709054058

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

**LOS PROFESORES INFORMANTES**

Los Profesores Informantes:

**MIGUEL MARTÍNEZ - FRESNEDA**

**WALBERTO EFRAÍN GALLEGOS ERAS**

Después de revisar el trabajo presentado,  
lo han calificado como apto para su defensa oral ante  
el tribunal examinador



Miguel Martínez - Fresneda



Walberto Gallegos Eras

Quito, 8 de enero de 2020

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

El presente Trabajo de Fin de Carrera ha sido realizado dentro del Programa de Investigación  
de la Universidad Internacional SEK denominado:

BIODIVERSIDAD Y RECURSOS NATURALES APLICADOS A LA GESTIÓN  
AMBIENTAL Y LA BIOTECNOLOGÍA

Perteneciente a la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales.

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

**DEDICATORIA**

A mi familia.

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

**AGRADECIMIENTO**

A mi padre y madre por su apoyo y sacrificio,

A mi hermana Carolina por su cariño incondicional, y a mi familia.

A Katty Coral por su confianza y paciencia, a Miguel Martínez y Walberto Gallegos por sus enseñanzas,

A mis amigos por todo el soporte.

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

Para someter a:

To be submitted:

**Aplicación de Reacción FENTON como tratamiento alternativo para lixiviados  
provenientes del relleno sanitario de EL Inga, Quito Ecuador.**

David Yépez<sup>1</sup>, Katty Coral<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito,  
Ecuador, 08/01/2020

\*AUTOR DE CORRESPONDENCIA: MSc. Katty Coral, Universidad Internacional  
SEK, Facultad de Ciencias Ambientales y Naturales, Quito, Ecuador.

Teléfono: 0983084617; email: [katty.coral@uisek.edu.ec](mailto:katty.coral@uisek.edu.ec)

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

## RESUMEN

Los residuos sólidos urbanos, al tener contacto con el agua y debido a su humedad intrínseca, producen un residuo líquido conocido como lixiviado, mismo que posee altas cargas contaminantes debido a su alto contenido en amoníaco, nitratos, nitritos, sulfuros y constituyentes orgánicos. Éstos lixiviados son llevados a piscinas donde reciben tratamientos fisicoquímicos y biológicos por parte de EMGIRS-EP, los cuales no resultan totalmente efectivos, por lo que el agua residual sigue dejando un pasivo ambiental considerable. Se desarrolló una alternativa de tratamiento eficaz para la eliminación de la carga contaminante proveniente del efluente, mediante procesos químicos de oxidación, específicamente utilizando el método FENTON. Se utilizaron muestras provenientes de la piscina 13 del relleno sanitario El Inga, que, tras recibir este tratamiento alternativo, mostraron resultados superiores de descontaminación lo que permitirá acercarse a los límites máximos permisibles e incluso cumplirlos. Al utilizar reactivos químicos, el costo es superior al de los tratamientos biológicos, pero es una alternativa viable cuando estos no pueden degradar la materia orgánica completamente. Aplicando la reacción FENTON en las muestras de lixiviado, se identificó que la dosis más elevada de  $H_2O_2$  y  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , fue el tratamiento que alcanzó la mayor eficacia, removiendo un 75% la concentración de DQO.

## Palabras clave

FENTON, lixiviado, relleno sanitario, oxidación, tratamiento fisicoquímico, residuos sólidos urbanos

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

## ABSTRACT

Urban solid waste when in contact with water produces a liquid residue known as leachate, which has high pollutant loads, due to its high content of nitrates, nitrites, sulfides and organic constituents. These leachates are taken to pools by EMGIRS-EP, where they receive biological treatments, which are not fully effective, so wastewater leaves a considerable environmental liability. It is intended to develop an effective alternative treatment to eliminate the effluent pollutant load, through oxidation processes, more specifically using the FENTON method. Samples from the pool 13 of the El Inga landfill were used, which, after receiving this alternative treatment, showed superior decontamination results which will allow us to approach and even meet the permissible maximum limits. When using chemical reagents, the cost is higher than that of biological treatments, but it is a viable alternative when they cannot degrade organic matter completely. Applying the FENTON reaction in leachate samples, it was identified that the highest dose of  $H_2O_2$  and  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  was the treatment that achieved the greatest effectiveness, excluding 75% of the COD concentration.

## Keywords:

FENTON, leachate, landfill, oxidation, physicochemical treatment, urban solid waste

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

## INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas y el aumento de la población, han provocado un considerable incremento en los residuos sólidos urbanos que se originan en las ciudades. Estos residuos son desencadenantes de la generación de lixiviados, que son líquidos originados por la liberación del exceso de agua de los residuos sólidos y por la percolación de agua pluvial a través de los estratos de residuos sólidos que se encuentran en las fases de composición (Cruz et. al., 2001).

Los residuos son materiales que carecen de valor de uso, por lo tanto, de valor de cambio, son todo aquello a lo que ya no se le puede sacar ningún tipo de provecho.

Los residuos sólidos urbanos (RSU), son los generados por las actividades propias de las ciudades. El volumen de los RSU es pequeño en comparación con otros tipos de residuos, no obstante en los últimos años debido al incremento poblacional y a los hábitos de consumo, ha aumentado su interés, provocando la necesidad de adoptar medidas de gestión de los residuos (André & Cerdá, 2009).

De toda la cantidad recolectada de residuos a nivel nacional, solo el 28% es eliminado en un relleno sanitario controlado, mientras que el resto se coloca en botaderos a cielo abierto. Los residuos sólidos producidos por el DMQ son llevados al relleno sanitario El Inga, mismo que empezó a funcionar desde el año 2003.

Actualmente es manejado por la EMGIRS (Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de los Residuos Sólidos), la misma que coordina también la operación de las Estaciones de Transferencia la Forestal y Zámbriza (Rivadeneira, 2016).

Los lixiviados se consideran como los principales contaminantes de un relleno sanitario. Es práctica común que los sistemas de tratamiento de lixiviados incorporen

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

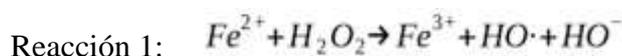
procesos fisicoquímicos y biológicos (aerobios y/o anaerobios), debido a sus elevadas cargas orgánicas. (Méndez Novelo et. al., 2004).

Uno de los tratamientos físico-químicos más prometedores para lixiviados es el de la oxidación FENTON, que consiste en la oxidación de la carga contaminante con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo FENTON) (Mendez, Garcia, Castillo, & Sauri, 2010). Método que fue utilizado en el presente proyecto.

Existen numerosas caracterizaciones de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder contaminante. Se concluye usualmente que los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos (Giraldo, 2001), lo que repercute en valores elevados de DQO y DBO.

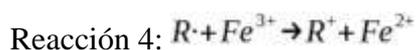
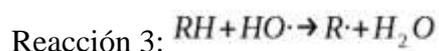
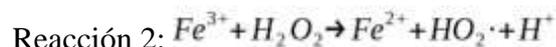
Los lixiviados pueden ser tratados con métodos biológicos o fisicoquímicos, en este caso la reacción FENTON. Que consiste en oxidar la carga contaminante combinando peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso. El principal agente responsable de la oxidación es el radical hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ), el que se forma por la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno. Las condiciones óptimas de la reacción FENTON se obtienen con valores de pH ácidos y es posible alcanzar altas cantidades de remoción de contaminantes orgánicos (Mendez et al., 2010).

El objetivo de la reacción FENTON es obtener radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ) cuyo potencial de oxidación es muy elevado, la generación de estos radicales tiene lugar cuando se combina peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y una sal de hierro, esta mezcla es la que se denomina reacción de FENTON.



## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

El ion Fe (III) se puede reducir por reacción con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y formar de nuevo un ion Fe (II) y más radicales hidroxilo. Este segundo proceso es denominado FENTON-LIKE, ocurre con menor velocidad que el proceso FENTON y permite la regeneración de Fe (II).



Se produce una reacción catalítica, siendo fundamental que el peróxido de hidrógeno se encuentre en exceso respecto a la cantidad de hierro que es añadida (Jurado, 2009).

Fundación Natura, en el 2003, inició el funcionamiento del relleno sanitario bajo la dirección de la Fundación “Vida para Quito”, asumiendo en diciembre de 2010 la EMGIRS- EP (Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos) la operación del relleno y las Estaciones de transferencia, misma que se encarga de su funcionamiento hasta la actualidad (EMGIRS, 2017).

Para el año 2017 el relleno sanitario de El Inga recibía aproximadamente 2000 toneladas de residuos sólidos urbanos, mismos que, para su disposición final, son llevados a un espacio configurado técnicamente en forma de excavaciones (cubeto), recubiertos con geomembranas para evitar filtraciones al suelo (EMGIRS, 2017).

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

El relleno sanitario contaba para el 2017 con 11 piscinas con una capacidad aproximada de 120000 m<sup>3</sup>, no obstante, cuenta en el presente con aproximadamente 20 piscinas cuyo volumen varía de 5000 a 10000 m<sup>3</sup> cada una (EMGIRS, 2017), todas de características similares y que tienen el objetivo de almacenar y manejar los lixiviados que se recolectan, estas tienen un fondo revestido con geomembranas que impiden filtraciones. Reciben varios tratamientos que pueden ser anaeróbicos, donde la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno; aeróbicos, que eliminan el remanente de materia orgánica con el suministro de oxígeno y de aspersion para eliminar los compuestos orgánicos volátiles (COV) (Rivadeneira, 2016).

En el relleno sanitario de El Inga se realizan tratamientos fisicoquímicos y biológicos a las piscinas de lixiviados, pero al no ser totalmente efectivos estos métodos, se busca un tratamiento alternativo que logre disminuir los parámetros a cantidades muy cercanas a las especificadas en la normativa ecuatoriana.

La aplicación del método FENTON reduce la carga contaminante de los lixiviados, pudiendo aplicarse a aquellos que se producen en el relleno sanitario El Inga, cuya efectividad pudo verse reflejada en la disminución de la demanda química de oxígeno DQO.

El objetivo del presente proyecto fue disminuir el pasivo ambiental producido por los lixiviados del relleno sanitario El Inga, utilizando el método FENTON como proceso de oxidación para reducir la carga contaminante y obtener valores cercanos a la normativa.

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

## MÉTODOS

### Área de Trabajo

La recolección de muestras de lixiviado se realizó en el Relleno sanitario del Distrito Metropolitano de Quito (El Inga), ubicado en el sector de El Inga bajo, entre Pifo y Sangolquí, sobre la vía E35, en la piscina N°13.

Este relleno tiene el propósito de tratar y dar disposición a los desecho sólidos urbanos, de manera controlada, buscando minimizar los riesgos, las afectaciones sociales y los impactos ambientales (EMGIRS, 2017).



**Figura 1.** Relleno Sanitario del distrito metropolitano de Quito

**Fuente:** Google maps

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

## **Muestreo**

Entre los meses de abril y junio de 2019, se realizaron los muestreos del lixiviado de la piscina 13 del relleno sanitario del DMQ, utilizando un muestreador Van Dorn. Para los parámetros *in situ* a medir, se empleó un multiparámetro HACH Modelo HQ40d, obteniéndose datos para pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, del lixiviado recolectado.

## **Caracterización del lixiviado**

En los laboratorios de la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales de la UISEK se analizaron los parámetros de objeto de estudio, para los que se utilizó el espectrofotómetro HACH DR 2800, realizando diluciones correspondientes, previas a la medición. Estos valores fueron comparados con los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce del artículo 1 del Acuerdo Ministerial No. 97 A. Anexo 1 (Ministerio de Ambiente, 2015).

La medición de la turbidez fue realizada con el método EPA 800 utilizando un turbidímetro portátil Orion AQ4500 Termo Scientific. Mientras que para el color se realizó una dilución 1:100 y se aplicó el protocolo establecido en el método No.8025 del Standard Methods (APHA, 2017). Para la medición del color la muestra de lixiviado fue previamente filtrada, es decir se determinó color real.

Se realizaron diluciones de la muestra original, 1:100 para la medición de nitritos y nitratos, utilizando los procedimientos establecidos en los Standard Methods No.4500E (APHA, AWWA, & WEF, 2017), la medición de sulfuros aplicó los criterios establecidos en el método HACH 813, que es equivalente al procedimiento establecido en el método No.4500-S<sup>2-</sup> D de los Standard Methods (HACH, 2018).

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

La determinación de nitrógeno amoniacal se efectuó utilizando reactivo de Nessler basado en el método HACH 8038, cuyo procedimiento es adaptado del método No.4500-NH<sub>3</sub> B & C de los Standard Methods (HACH, 2017) realizando previamente una dilución 1:1000. Los procedimientos de cada uno de los métodos analíticos aplicados pueden ser revisado en el Anexo 2.

La demanda bioquímica de oxígeno DBO, se analizó siguiendo el procedimiento No. 5210 de los Standard Methods utilizando frascos Winkler (APHA, 2015b); para la demanda química de oxígeno DQO se realizaron ensayos por el método de Reflujo Abierto No. 5220B del Standard Methods (APHA, 2015a), por cuadruplicado con cuatro diluciones 1:100, 2:100, 3:100, 4:100; para obtener valores con mayor grado de exactitud. Estos datos se utilizaron para determinar la dosis más efectiva de reactivo FENTON.

## Preparación de reacción FENTON

La Reacción FENTON se preparó en base a la dosis determinada en el estudio realizado por Anrango (2018) donde se reportó como óptima la relación molar 1:5 Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, lo que significa que para cada mol de Fe<sup>2+</sup> se necesitan 5 moles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para un adecuado tratamiento.

## Determinación de la dosis de Peróxido de Hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

La cantidad de peróxido de hidrógeno al 30% utilizado, se calculó con base a la ecuación definida por Rodríguez (2010).

$$H_2O_2 \left[ \frac{mL}{L} \right] = \frac{DQO \left[ \frac{mgO_2}{L} \right]}{141,2 \left[ \frac{mgO_2}{mLH_2O_2} \right]}$$

(Ecuación 1)

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

$$H_2O_2 \left[ \frac{mL}{L} \right] = \frac{5806 \left[ \frac{mg O_2}{L} \right]}{141,2 \left[ \frac{mg O_2}{mL H_2O_2} \right]}$$

$$H_2O_2 \left[ \frac{mL}{L} \right] = 41,1190 \left[ \frac{mL}{L} \right]$$

Para obtener el volumen de peróxido de hidrógeno a emplear en el tratamiento, se determinó el valor de DQO inicial de la muestra, cuyo valor fue de 5806 mg O<sub>2</sub>/L. Aplicando la Ecuación 1, se determinó una dosis de 41,1190 mL/L. Sin embargo, para el estudio se manejó un volumen de 250 mL, por lo que la dosis utilizada fue de 10,2797 mL/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30%.

**Determinación de la dosis de sulfato ferroso**

La dosis de sulfato ferroso heptahidratado aplicado, se calculó usando la relación molar 1:5 de Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se buscó conseguir una correspondencia másica a partir de esta relación, debido a que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se encuentra en estado líquido, por consiguiente, se debe multiplicar la relación molar por el volumen calculado en la Ecuación 1, para lo que se realizó la secuencia de cálculo siguiente:

$$41,1mL H_2O_2 * \frac{1,1g H_2O_2}{1mL H_2O_2} * \frac{1mol H_2O_2}{34g H_2O_2} * \frac{1mol FeSO_4 \cdot 7H_2O}{5mol H_2O_2} * \frac{278,2g FeSO_4 \cdot 7H_2O}{1mol FeSO_4 \cdot 7H_2O} =$$

$$74,0190g FeSO_4 \cdot 7H_2O$$

**(Ecuación 2)**

Este valor 74,0190 g FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O corresponde a un litro de muestra, pero al manejarse experimentalmente un volumen de 250 mL, se empleó la cuarta parte del catalizador, siendo de 18,5048 g FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O.

Utilizando la Ecuación 1 y la Ecuación 2 se calcularon el volumen de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y la masa de FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O correspondientes al resto de valores experimentales de DQO.

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

## Preparación de la muestra y desarrollo de la reacción FENTON

La muestra fue preparada según la metodología que establece Rodríguez (2010), donde se afirma que la reacción es más efectiva en medio ácido, para lo que se estabilizó el pH de la muestra en un rango comprendido entre 2,5 y 3, empleando ácido sulfúrico al 98% V.

Agregadas las alícuotas de 250 mL de muestra estabilizada en cuatro vasos de precipitación, se añadieron el peróxido de hidrógeno (10,2797 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y el sulfato de hierro (18,5048 g FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O) y se agitó en el equipo de prueba de jarras a 100 rpm durante 60min. Se dejó entonces sedimentar las muestras tratadas durante 24h y se analizó: pH, color, turbidez, DBO<sub>5</sub>, DQO, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal y sulfuros.

## Evaluación de la eficiencia

La evaluación de la eficiencia se obtuvo calculando el porcentaje de remoción de DQO de cada una de las dosis de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso heptahidratado, este parámetro fue utilizado porque es la concentración que se busca remover esencialmente.

Para calcular la eficiencia de remoción se utilizó la siguiente fórmula tomada del trabajo de Romero - Aguilar (2009):

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100$$

(Ecuación 3)

Donde:

E: Eficiencia de remoción de la reacción

C<sub>i</sub>: Concentración inicial de DQO

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

$C_f$ : Concentración final de DQO

## **Análisis de costos**

El análisis de costos fue realizado utilizando el costo del peróxido de hidrógeno al 30% y el sulfato ferroso heptahidratado usados por cada litro de muestra, con la dosis óptima de la mezcla, y se extrapola al volumen de 5378 m<sup>3</sup> de la piscina 13 del relleno sanitario de El Inga, para obtener el costo total de tratamiento para el volumen completo del lixiviado de esta piscina.

## **RESULTADOS**

Siguiendo la metodología descrita anteriormente se obtuvieron los resultados siguientes.

Los parámetros de: pH, conductividad eléctrica, color, turbidez, DBO<sub>5</sub>, DQO, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal y sulfuros, se evaluaron en la muestra inicial y en la muestra correspondiente a la dosis con remoción más representativa.

Se realizaron cuatro diluciones de la muestra de lixiviado, 1:100, 2:100, 4:100, 5:100 para determinar las distintas dosis de reactivo FENTON a usarse, a su vez este proceso permitió identificar también la dosis más efectiva.

Para el estudio se utilizaron muestras de 250mL, por lo que en la Tabla 1 se muestran las dosis empleadas en el tratamiento.

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

**Tabla 1:** Dosis de reactivo FENTON para 250 mL de muestra

MUESTRA	DQO INICIAL	DOSIS PARA 1 Litro		DOSIS PARA 250 mL	
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Catalizador (Sulfato de Hierro)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Catalizador (Sulfato de Hierro)
	mgO <sub>2</sub> /L	mLH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /L	g Catalizador/L	mLH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /250 mL	g Catalizador/250 mL
DLC1	5806	41,1190	74,0190	10,2797	18,5048
DLC2	5161	36,5510	65,7961	9,1377	16,4490
DLC3	5484	38,8385	69,9139	9,7096	17,4785
DLC4	5290	37,4646	67,4407	9,3661	16,8602

Elaborado por: David Yépez

Obtenidas las concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y sulfato de hierro de la dosis a emplearse para cada muestra, se realizaron cinco pruebas del tratamiento con FENTON en cada una de las muestras y se midió el valor de DQO para cada prueba.

Se muestra a continuación en la Tabla 2 los resultados del tratamiento, a partir del DQO obtenido.

**Tabla 2:** Aplicación de reacción FENTON en 250mL de muestra

MUESTRA	DQO INICIAL	DOSIS PARA 250 mL		DQO MUESTRA TRATADA					
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Catalizador (Sulfato de Hierro)	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4	PRUEBA 5	PROMEDIO
	mgO <sub>2</sub> /L	mLH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /250 mL	g Catalizador/250 mL	mgO <sub>2</sub> /L					
DLC1	5806	10,2797	18,5048	1355	1548	1613	1419	1290	1445
DLC2	5161	9,1377	16,4490	3161	3032	3226	2968	2839	3045
DLC3	5484	9,7096	17,4785	1935	2129	2387	2194	2000	2129

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

DLC4	5290	9,3661	16,8602	2903	2645	2065	2839	2645	2619
------	------	--------	---------	------	------	------	------	------	------

Elaborado por: David Yépez

Se puede observar en los resultados obtenidos, que en DLC1, al ser la muestra con mayor DQO y en la que se implementó la dosis con las concentraciones más altas de reactivo, se obtuvo una reducción de DQO más representativa que en el resto de muestras. En la Tabla 3 se observa la eficiencia de la reacción en cada una de las muestras, con los respectivos porcentajes de remoción de cada una de las pruebas.

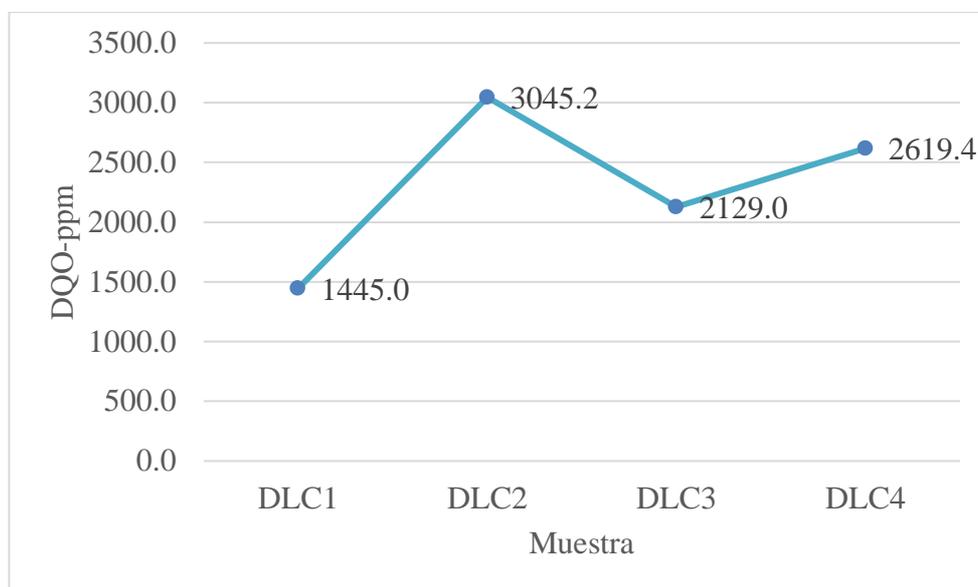


Figura 2: Concentraciones promedio de DQO

Elaborado por: David Yépez

Tabla 3: Porcentaje de remoción de cada prueba

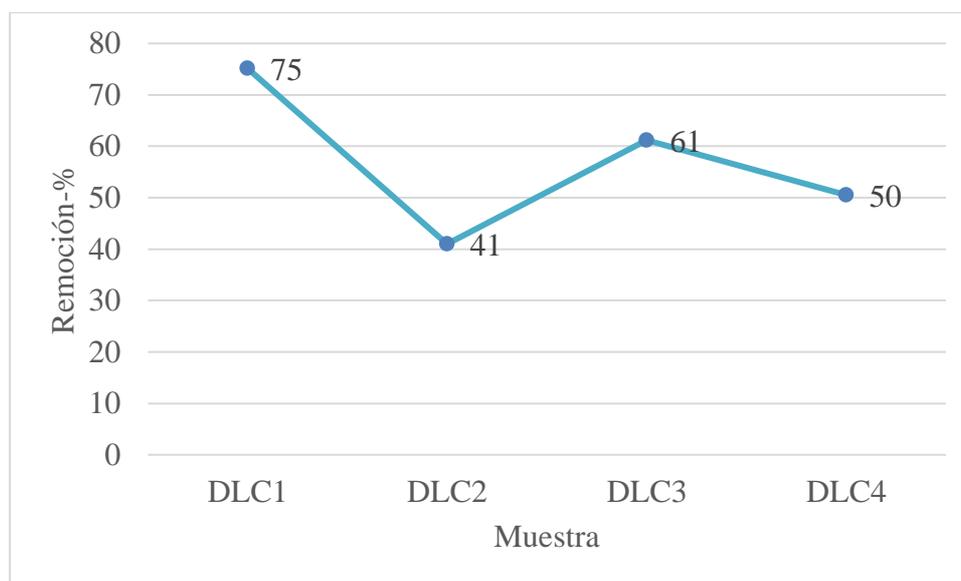
MUESTRA	DQO	DOSIS PARA 250 mL		% REMOCIÓN MUESTRA TRATADA					
	INICIAL	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Catalizador (Sulfato de Hierro)	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4	PRUEBA 5	EFICIENCIA
	mgO <sub>2</sub> /L	mLH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /250 mL	g Catalizador/250 mL	%	%	%	%	%	%
DLC1	5806	10,2797	18,5048	76,66	73,34	72,22	75,56	77,78	75,11
DLC2	5161	9,1377	16,4490	38,75	41,25	37,49	42,49	44,99	41,00

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

DLC3	5484	9,7096	17,4785	64,72	61,18	56,47	59,99	63,53	61,18
DLC4	5290	9,3661	16,8602	45,12	50,00	60,96	46,33	50,00	50,48
								PROMEDIO	56,94

Elaborado por: David Yépez

Se observa que en DLC1 se obtiene la mayor eficiencia de tratamiento con un 75,11% de remoción de DQO, mientras que en DLC2, DLC3 y DLC4 presentan 41%, 61,18% y 50,48% de remoción respectivamente, siendo DLC2 la dosis con menor eficiencia, comprobándose la más alta eficiencia en la muestra con la concentración de reactivo más alta.



**Figura 3:** Promedios de remoción de DQO

Elaborado por: David Yépez

Se utilizó DLC1 para medir los parámetros restantes, al ser la muestra con mayor remoción de DQO. Se muestra en la Tabla 4 a continuación, los parámetros iniciales y

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

finales comparados con la normativa del Acuerdo Ministerial 097 A para descargas a un cuerpo de agua dulce.

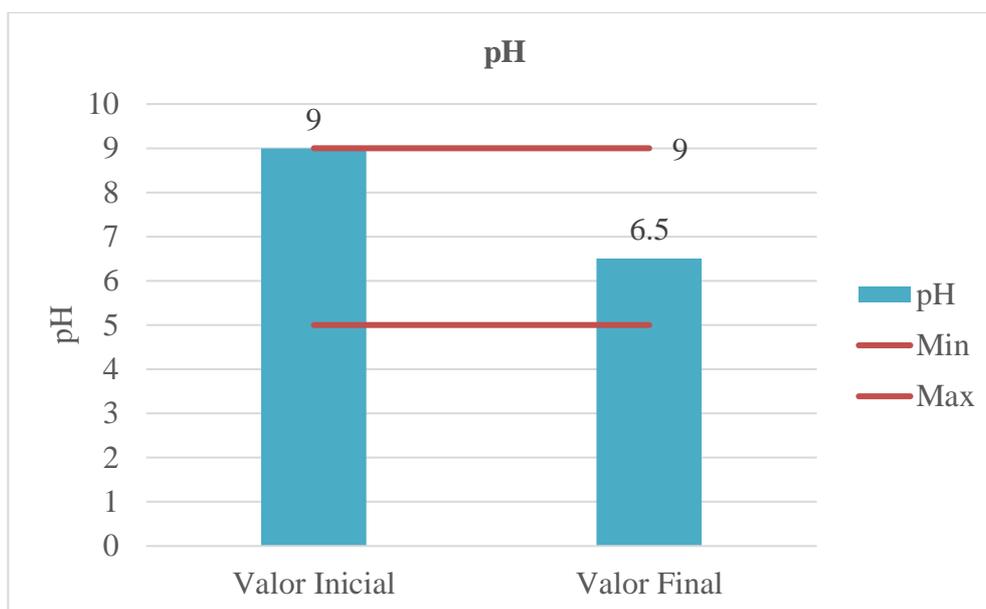
**Tabla 4:** Parámetros iniciales y finales del lixiviado comparados con la normativa

Parámetro	Unidad	Valor Normativa	Valor Inicial	Valor Final
<b>pH</b>	Unidad de pH	5-9	9,00	6,50
<b>Conductividad Eléctrica</b>	mS/cm	No aplica	23,20	33,40
<b>Color</b>	Un Pt/Co	Inapreciable en dilución 1:20	8200,00	4750,00
<b>Turbidez</b>	NTU	Inapreciable en dilución 1:20	368,00	9,00
<b>DBO5</b>	ppm	100	1293,33	893,33
<b>DQO</b>	ppm	250	5806,00	1445,00
<b>Nitritos</b>	ppm	10	200,00	5,10
<b>Nitratos</b>	ppm	10	320,00	240,00
<b>Nitrógeno Amoniacal</b>	ppm	15	1160,00	40,00
<b>Sulfuros</b>	ppm	0,50	2400,00	9,00

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

**Elaborado por:** David Yépez

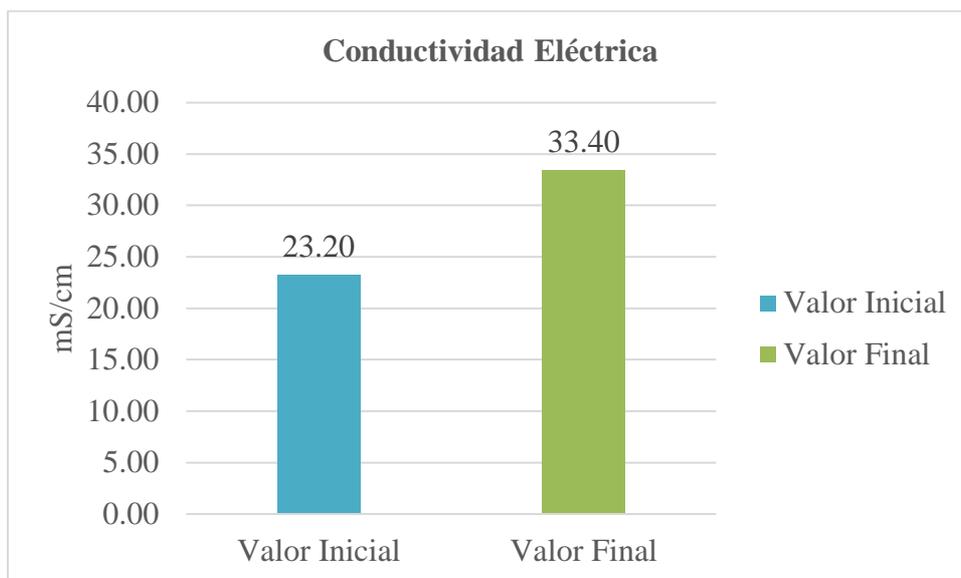
A continuación, en las siguientes Figuras, se muestran cada uno de los parámetros con sus valores iniciales y finales, comparados con la normativa.



**Figura 4:** Valor inicial y final de pH comparado con la normativa

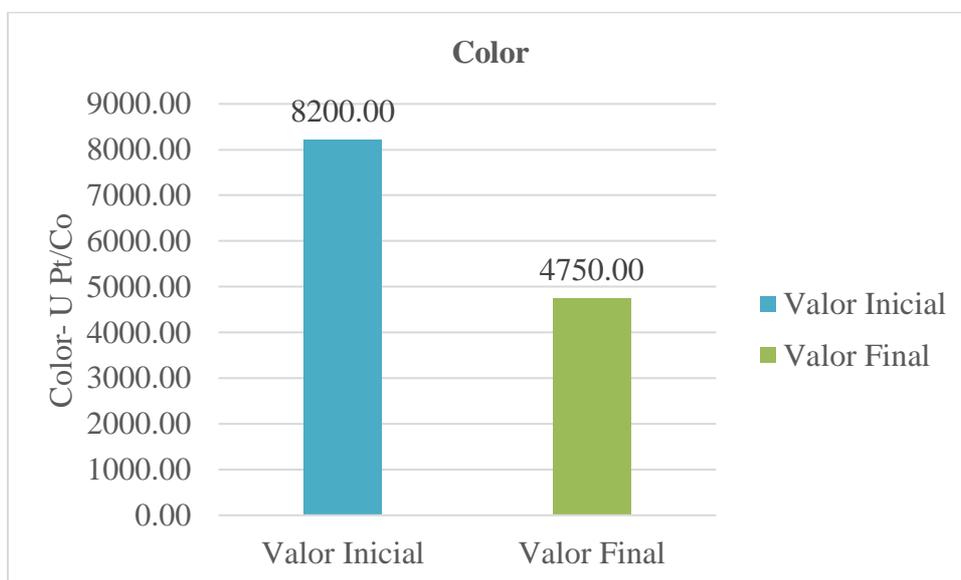
**Elaborado por:** David Yépez

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Figura 5:** Valor inicial y final de Conductividad Eléctrica

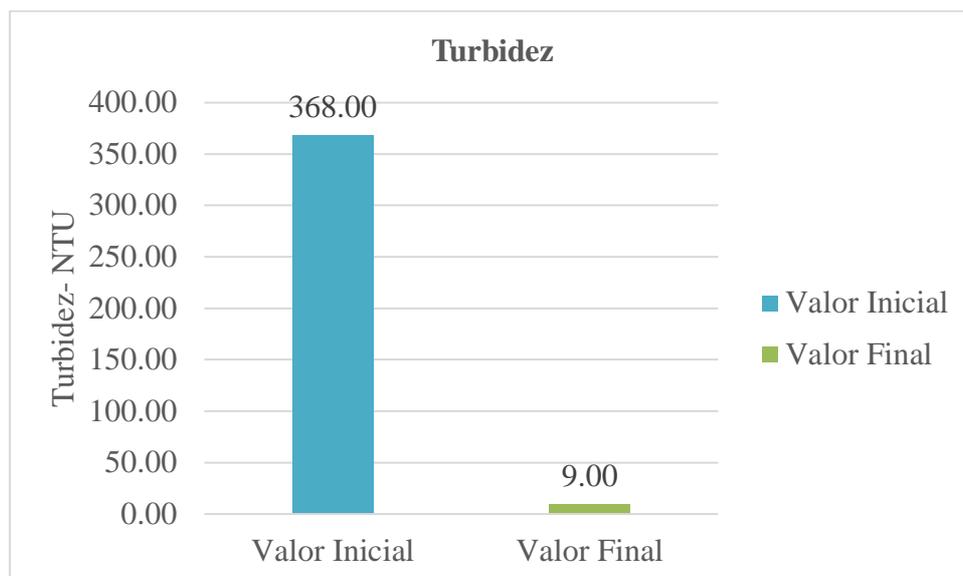
**Elaborado por:** David Yépez



**Figura 6:** Valor inicial y final de Color

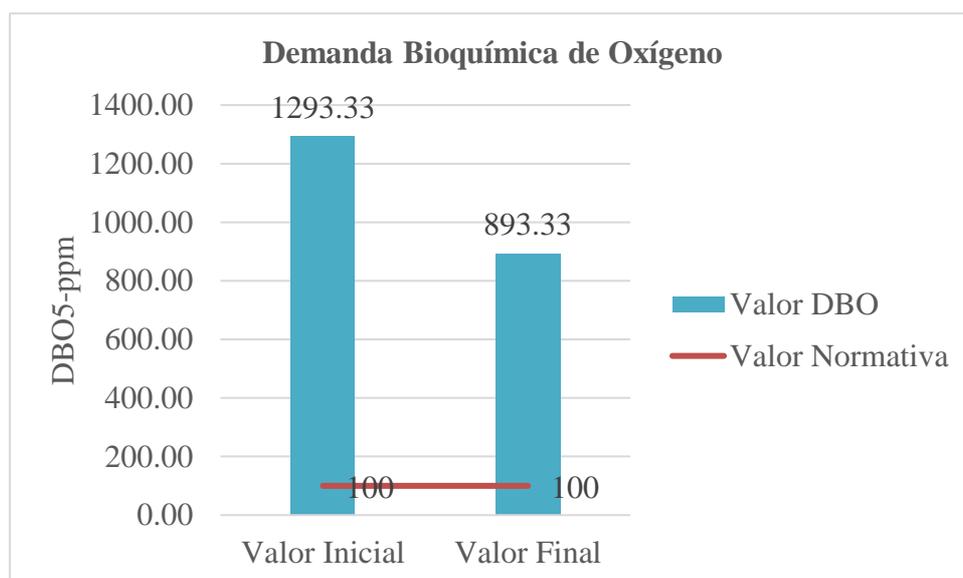
**Elaborado por:** David Yépez

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Figura 7:** Valor inicial y final de Turbidez

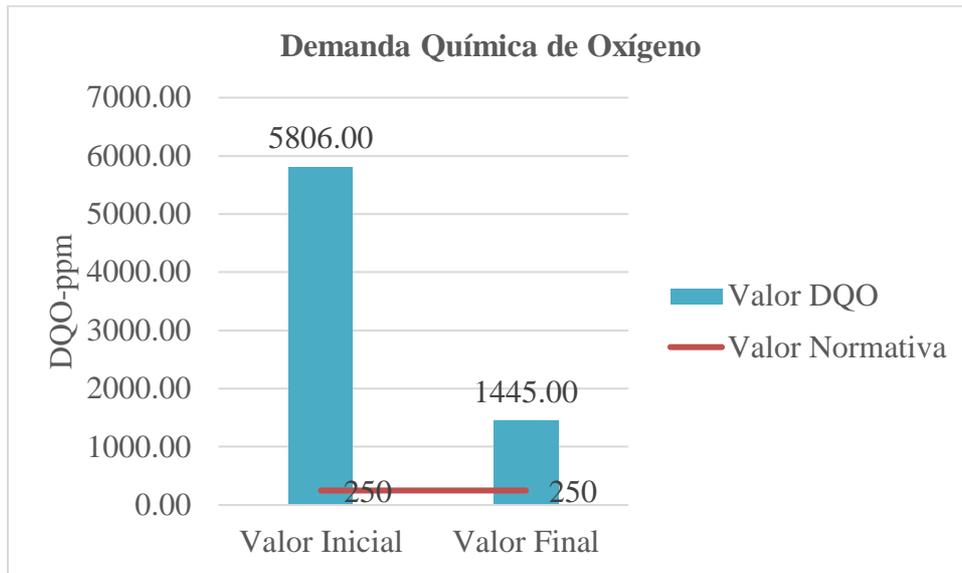
**Elaborado por:** David Yépez



**Figura 8:** Valor inicial y final de DBO<sub>5</sub> comparado con la normativa

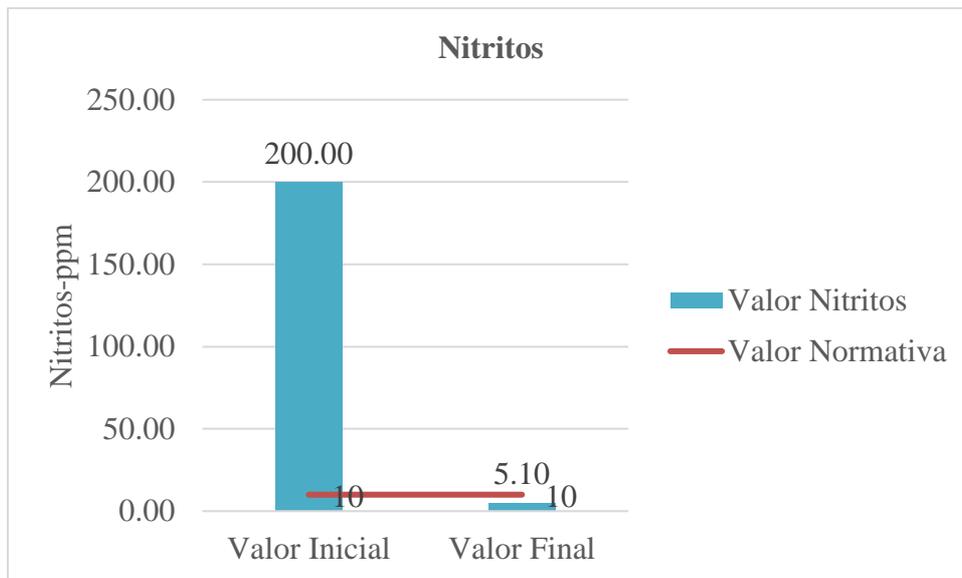
**Elaborado por:** David Yépez

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Figura 9:** Valor inicial y final de DQO comparado con la normativa

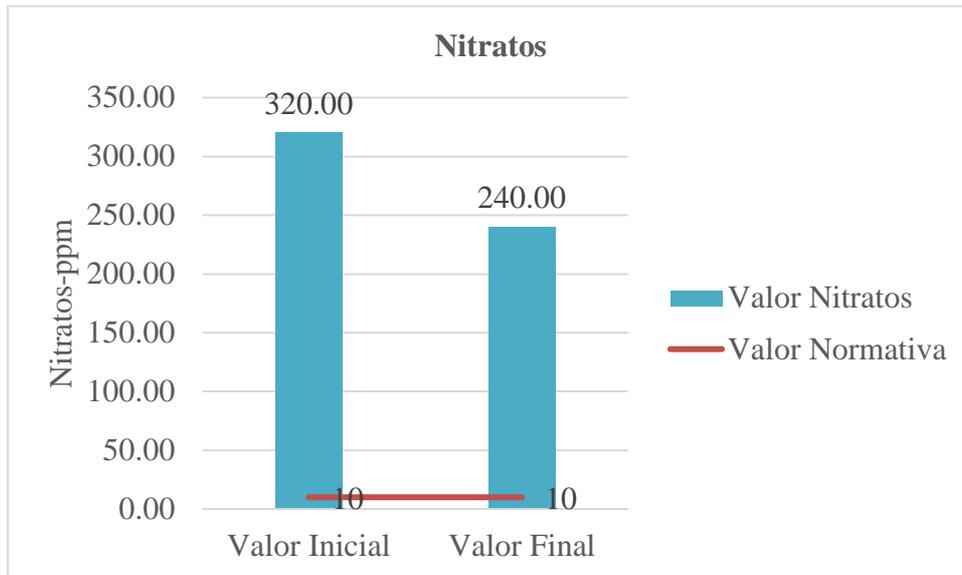
**Elaborado por:** David Yépez



**Figura 10:** Valor inicial y final de Nitritos comparado con la normativa

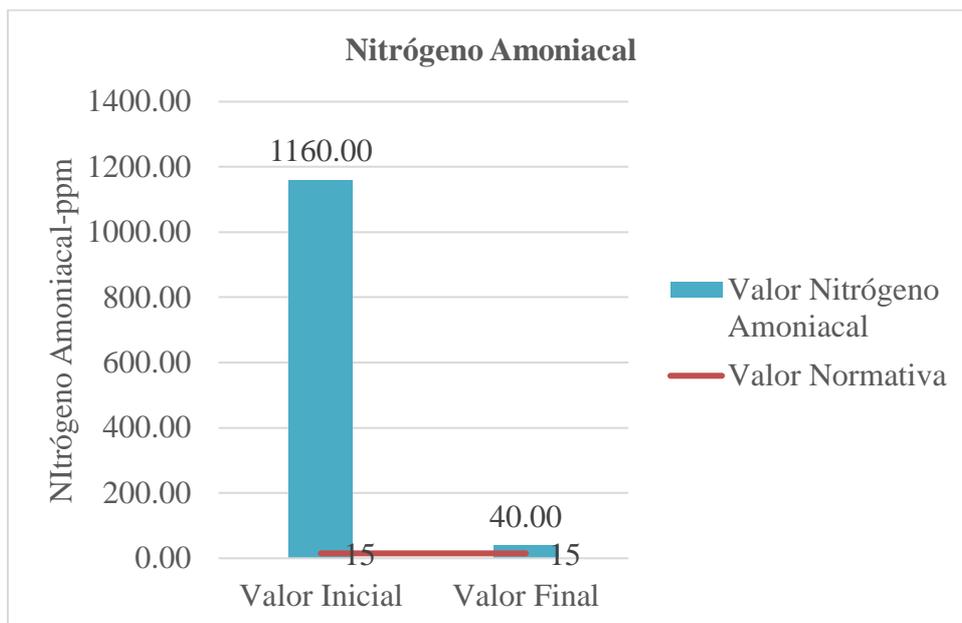
**Elaborado por:** David Yépez

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Figura 11:** Valor inicial y final de Nitratos comparado con la normativa

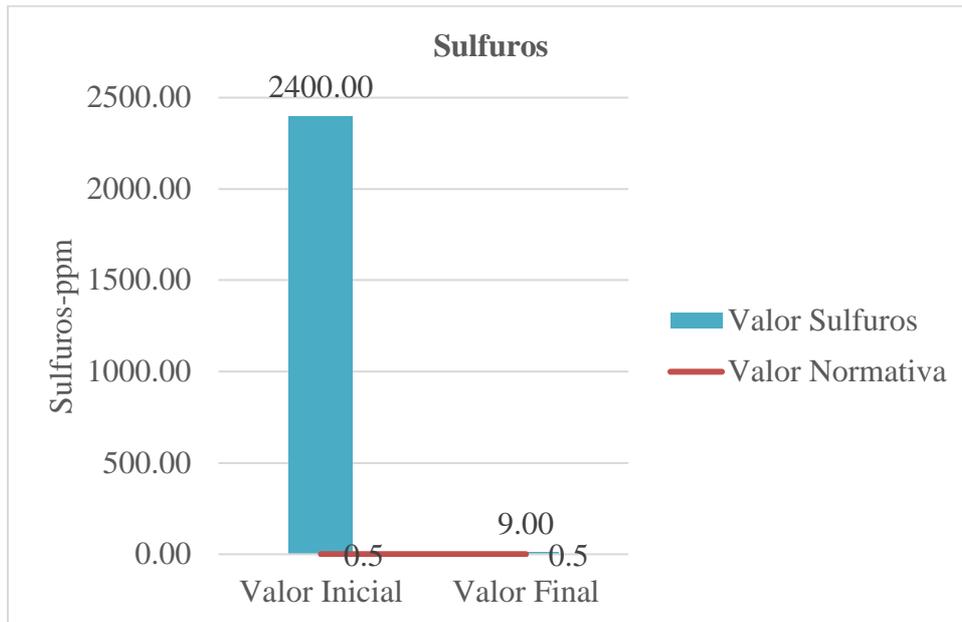
**Elaborado por:** David Yépez



**Figura 12:** Valor inicial y final de Nitrógeno Amoniacal comparado con la normativa

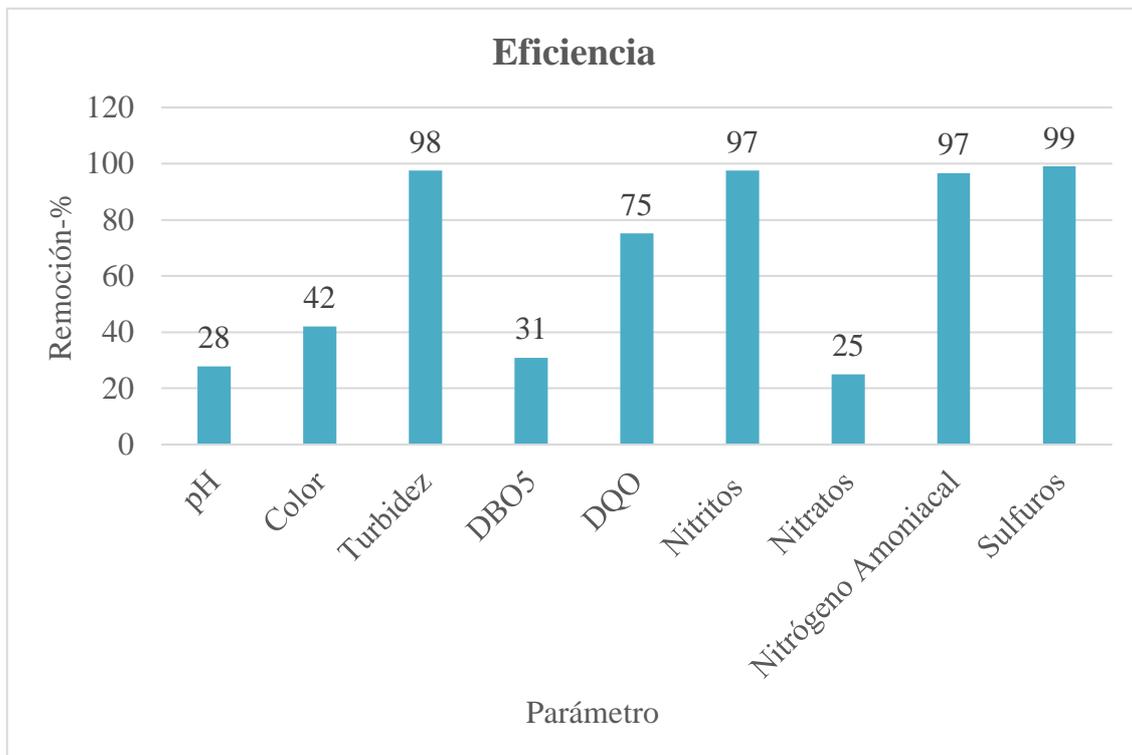
**Elaborado por:** David Yépez

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Figura 13:** Valor inicial y final de Sulfuros comparado con la normativa

Elaborado por: David Yépez



**Figura 14:** % de remoción de cada parámetro

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

**Elaborado por:** David Yépez

El análisis de costos de la reacción FENTON para la muestra de lixiviado tomada de la piscina 13 del relleno sanitario El Inga, se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Análisis de costo para 250 mL de muestra de lixiviado

COSTO DE REACTIVOS				COSTO PARA 250 mL	
Reactivo	Unidad	Cantidad	Costo (\$)	Cantidad	Costo (\$)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (30%)	L	4	74	0,0103	0,19
FeSO <sub>4</sub> × 7H <sub>2</sub> O	kg	0,5	44,82	0,0185	1,66

**Elaborado por:** David Yépez

Basándose en los costos de tratamiento para la muestra de 250 mL se calculó el costo de reactivos químicos para todo el volumen de la piscina 13 del relleno sanitario El Inga, se muestran en la Tabla 6 los resultados.

**Tabla 6:** Costo de tratamiento para la piscina 13 del relleno sanitario El Inga

COSTO PARA PISCINA DE LIXIVIADO	
Volumen piscina 13 lixiviado (m <sup>3</sup> )	5378
Costo por m <sup>3</sup> de lixiviado (\$)	762,20
Costo tratamiento para piscina (\$)	4 099 111,60

**Elaborado por:** David Yépez

**DISCUSIÓN**

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

Debido a la elevada concentración de cada uno de los parámetros que se analizaron en el presente trabajo, fue indispensable la realización de diluciones previas a la medición de los mismos.

En DLC1 (10,2797 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% y 18,5048 g FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O) se aplicó la dosis a una muestra con 5806 ppm de DQO, obteniéndose un resultado final de 1445 ppm, valor que no cumple con la normativa establecida dentro de los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce, pero presenta una reducción de 75% con respecto a la concentración inicial.

En DLC2 (9,1377mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% y 16,4490g FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O) se aplicó la dosis a una muestra con 5161 ppm de DQO, con un resultado final de 3045,2 ppm, mismo que no cumple con la normativa establecida dentro de los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce, pero presenta una reducción de 41%.

En DLC3 (9,7096mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% y 17,4785g FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O) se aplicó la dosis a una muestra con 5484 ppm de DQO, dejando un resultado final de 2129 ppm, mismo que no cumple con la normativa establecida dentro de los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce, que además presentó una reducción de 61%.

En DLC4 (9,3661mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% y 16,8602g FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O) se aplicó la dosis a una muestra con 5290 ppm de DQO, obteniéndose un resultado final de 2619,4 ppm, mismo que no cumple con la normativa establecida dentro de los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce, pero presenta una reducción de 50%.

Los resultados de laboratorio comprueban que el método es efectivo removiendo la carga orgánica del agua alcanzando una eficiencia máxima de 75%, no obstante, la remoción lograda no es suficiente para cumplir con los valores de la normativa, esto se debe a la antigüedad del lixiviado, (Mendez et al., 2010) establecen que los lixiviados

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

maduros contienen materiales orgánicos difíciles de degradar, por lo que el proceso de oxidación generado por la reacción FENTON resulta menos eficiente en lixiviados más antiguos.

Para analizar la influencia del método en el lixiviado, se realizó con la muestra de la dosis más efectiva, una medición del resto de parámetros, donde se obtuvieron considerables reducciones.

El pH de la muestra original era básico, fundamentalmente, con un valor de 9, no obstante, su valor final fue de 6,5, porque al trabajar la reacción FENTON únicamente en un medio ácido, este valor tendió a neutralizarse.

El color disminuyó de 8200 a 4750 Un Pt/Co, presentando un valor considerablemente menor, pero que sigue considerándose elevado, debido a la presencia de hierro, metal que hace que la muestra tratada tome un tono rojizo. Presentó una reducción de 42%. La turbidez se redujo de 368 a 9 ppm, presentando 98% de reducción. Presentando un valor menor al límite establecido por la normativa.

La DBO tuvo una disminución de 1293 a 893 ppm, esta no es tan sustancial porque la biodegradabilidad del lixiviado no es alta debido a la antigüedad del mismo, sin embargo, presentó una reducción de 31%.

La concentración de nitritos bajó de 200 a 5,10 ppm y la de nitratos de 320 a 240 ppm, cuando se utilizan métodos biológicos los componentes de nitrógeno suelen ser de especial interés, pero al utilizarse un método de oxidación forzada este no es tan efectivo removiendo el nitrógeno total del lixiviado, no obstante, los nitritos presentaron una reducción de 97% y los nitratos 25%.

La concentración de sulfuros disminuyó de 2400,0 a 9,0 ppm siendo el parámetro con la reducción más representativa (99%), junto con el nitrógeno amoniacal bajando de

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

1160 a 40 ppm y mostrando 97% de reducción, lo que significa que el amoníaco pasó a otras formas del nitrógeno presentes en el lixiviado, como nitratos y nitritos.

Después de realizar el análisis de costos del tratamiento aplicado a la piscina 13 del relleno sanitario El Inga, de donde se tomaron las muestras, se estimó un costo de \$762,20 por cada m<sup>3</sup>, por lo que se determinó que, a pesar de ser un método efectivo, su costo es mucho más elevado que el que es realizado al presente en el relleno, sin embargo, se deberían realizar pruebas con reactivos calidad industrial para valorar un costo menor.

En el estudio de Anrango (2018), se reportaron eficiencias de 89% de remoción de DQO, manteniendo pH y tiempo de contacto igual al tratamiento realizado. Cabe recalcar que el lixiviado poseía un valor promedio de DQO de 3844 ppm, siendo este menor el estudiado, por lo que naturalmente el tratamiento resultaría más eficiente.

Méndez *et al.* (2010) reportó 72% de remoción en un lixiviado de 9080 ppm de DQO promedio, con pH de 4 y tiempo de contacto de 20 min, con el proceso Fenton, seguido de tratamiento por coagulación- floculación. Un factor determinante de eficiencia es el pH, el cual es indispensable para que exista reacción, por otro lado, la adición del proceso de coagulación puede aumentar el porcentaje de remoción.

### CONCLUSIONES

El proceso óptimo para el tratamiento con reacción FENTON para 250 mL de muestra fue de 10,2797mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% y 18,5048g de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O con una relación molar 1:5 de Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, con un pH ácido de entre 2,5 y 3, agitando a 100 rpm durante 60 min, dándole 24 horas de reposo posteriormente.

El método FENTON resultó ser un tratamiento efectivo al momento de remover la carga orgánica y el valor de DQO del lixiviado, llegando a una eficiencia máxima de

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

75% de remoción de Demanda Química de Oxígeno, es difícil llegar a una remoción mayor debido a la antigüedad del lixiviado de la piscina de donde se extrajeron las muestras.

Al ser el lixiviado antiguo, presenta una composición variable, por lo cual su biodegradabilidad se ve afectada negativamente, obteniéndose que la demanda bioquímica de oxígeno se redujo un 30% con el tratamiento brindado. De todas formas, el tratamiento con reacción FENTON puede aumentar su efectividad si se complementa con tratamientos posteriores para reducir la carga contaminante restante.

Con respecto a los demás parámetros analizados, aunque no se llegó a cumplir con la normativa, se obtuvieron resultados prometedores en cuanto a turbidez, nitritos, nitrógeno amoniacal y sulfuros, que presentaron reducciones mayores al 90%. Sin embargo, los nitratos redujeron su concentración un 25%, esto puede deberse a que la oxidación de los nitritos, los transformó a nitratos aumentando la concentración inicial de este parámetro. Consecuentemente se debe evaluar formas alternativas para la reducción de nitratos, una vez completada la reacción FENTON.

A pesar de ser eficiente la reacción FENTON, los valores finales no llegaron a cumplir con los límites máximos permisibles exigidos por la legislación ecuatoriana, presentando inconvenientes en cuanto al uso del catalizador de Hierro, mismo que produce coloración rojiza en la muestra tratada y genera lodo que se debe limpiar a continuación de terminado el proceso de tratamiento. Su aplicación a escala industrial debe ser valorada y evaluada con más detalle.

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

El costo de tratamiento se aproxima a los \$762,20 por m<sup>3</sup>, resultando superior al tratamiento que se realiza actualmente en el relleno, sin embargo, se debe indicar que los reactivos utilizados en esta investigación fueron de grado reactivo, con costos elevados por su nivel de pureza. Este mismo tratamiento con reactivos grado industrial pueden disminuir el valor del tratamiento y convertirlo en más atractivo para su aplicación.

### RECOMENDACIONES

Se recomienda complementar el uso de la reacción FENTON con un pre o post tratamiento ya sea físico, químico o biológico, para reducir la carga contaminante del lixiviado y hacer más efectiva su implementación.

Se recomienda ampliar el estudio del tratamiento para ser utilizado en lixiviados más jóvenes, que presenten menor variabilidad en su composición, lo que puede mejorar la reducción de parámetros.

Se recomienda realizar estudios de fitorremediación, que puedan servir como complemento al tratamiento, ayudando con la remoción del hierro restante del proceso. Nuevas pruebas con reactivos de grado industrial se hacen necesarias para establecer costos menores y que el tratamiento que presenta efectividad química, lo sea también desde el punto de vista económico.

Una recomendación importante es evaluar el nivel de incremento de lodos producto del tratamiento FENTON, su volumen por m<sup>3</sup> de tratamiento de efluente y su posible aprovechamiento como complemento al proceso de depuración de efluentes.

Se recomienda realizar pruebas in situ en una de las múltiples piscinas de lixiviados del Relleno Sanitario, para evaluar su aplicación a gran escala.

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

## Literatura citada

- André, F. J., & Cerdá, E. (2009). Gestión de residuos sólidos urbanos : análisis económico y políticas públicas. *Gestion de Residuos Solidos Urbanos*, 1(1), 21.  
<https://doi.org/10.1002/dac.2753>
- Anrango Pavón, M. J. (2018). Metodos alternativos para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del canton Mejia, Pichincha, Ecuador. *Universidad Internacional SEK*, 38.
- APHA. (2015a). *Apha- Chemical Oxygen Demand*. (5000), 14–19.
- APHA. (2015b). *Apha-Biochemical-Oxygen-Demand-White-Paper*. *Apha 5210*, (5000), 2–13.
- APHA. (2017). Color , True and Apparent. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater and National Council for Air and Stream Improvement (NCASI) Methods*, 30(11), 2771–2775.
- APHA, AWWA, & WEF. (2017). Method 4500 - NO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Nitrogen (Nitrate)\*. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 552.  
<https://doi.org/10.1246/nikkashi1948.74.894>
- EMGIRS. (2017). *Informe de gestión 2017.Rendición de cuentas correspondiente al 2017 implementa “ realidad aumentada ” para brindarte información multimedia sobre nuestra gestión*.
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*, 0(14), 44. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>
- HACH. (2017). *Nitrogen , Ammonia; USEPA Nessler Method 8038*. 1–6.
- HACH. (2018). *Sulfide Method 8131*. 1–6.
- Jurado, B. (2009). *Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto- Fenton*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099.1/8325>

# APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

Méndez Novelo, Roger; Castillo Borges, Elba; Sauri Riancho, María Rosa; Quintal

Franco, Carlos; Giacoman Vallejos, Germán; Jiménez Mejía, B. (2004).

Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería*, 8(2), 155–163. Retrieved from <https://www.redalyc.org/html/467/46780213/>

Mendez, R., Garcia, R., Castillo, E., & Sauri, M. R. (2010). Tratamiento de Lixiviados por oxidacion Fenton. *Ingeniería e Investigación*, 30(1), 80–85. Retrieved from <https://www.redalyc.org/html/643/64312498015/>

Ministerio de Ambiente. (2015). Registro Oficial Edición Especial 387, Acuerdo Ministerial 097-A. *Secretaría Nacional Del Agua*, 1–7.

Rivadeneira, L. (2016). Caracterización y análisis del funcionamiento del sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario El Inga. *Universidad San Francisco de Quito*, 29. [https://doi.org/Doi 10.1016/S0168-9274\(97\)00017-2](https://doi.org/Doi 10.1016/S0168-9274(97)00017-2)

Rodriguez, R., Flesler, F., & Lehmann, V. (2010). OXIDACION AVANZADA - SISTEMA FENTON – EN TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE ALTA CARGA ORGANICA. Retrieved August 6, 2019, from <https://studylib.es/doc/5748962/sistema-fenton—en-tratamiento-de-efluentes>

Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 25(3), 157–167.

**APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR**

**ANEXOS**

**APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR**

**ANEXO 1**

**Normativa**

Registro Oficial Edición Especial 387, Acuerdo Ministerial 097-A

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

**Tabla 1.** Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce TABLA 9. Registro Oficial

Edición especial 387, Acuerdo Ministerial 097-A

**TABLA 9. LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE**

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sust. solubles en hexano	mg/l	30,0
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro Total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Ext. carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	2000
Color real <sup>1</sup>	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr <sup>VI</sup>	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10,0
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	50,0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Compuestos Organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2

Continua...

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

Continuación...

TABLA 9. LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE

Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1 600
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/l	1000
Sulfuros	S <sup>-2</sup>	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ± 3
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0
<sup>1</sup> La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida			

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

**ANEXO 2**

**Procedimiento de la metodología de laboratorio**

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

Cada uno de los parámetros, antes y después del tratamiento, fue analizado siguiendo los procedimientos especificados en el Standard Methods y el manual HACH, a continuación, se detallan los pasos.

### **Determinación de color APHA – Standard Methods No. 8025**

- Filtrar 50 mL de muestra previamente a la medición.
- Realizar la dilución 1:100 de la muestra filtrada.
- Colocar la muestra en una celda de 10 mL y en otra colocar agua destilada para utilizarse como blanco.
- Correr el programa 120 Color a 455 nm en el espectrofotómetro con el blanco y luego con la muestra.

### **Determinación de Turbidez**

La medición de la turbidez fue realizada utilizando un turbidímetro portátil Orion AQ4500 Termo Scientific.

- Colocar la muestra previamente diluida (1:100) en la celda del turbidímetro e iniciar el programa.

### **Determinación de Demanda Biológica de Oxígeno – APHA - Standard Methods No. 5210.**

- Colocar 200 mL de lixiviado en un vaso de precipitación.
- Airear la muestra durante 20 minutos y determinar el oxígeno disuelto inicial con la ayuda del multiparámetro.
- Posteriormente realizar diluciones en dos balones aforados en donde se colocan 3 mL de muestra de lixiviado previamente aireado y aforar hasta completar los 1000 mL con agua destilada en el primer balón.

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

- Colocar 6 mL de muestra de lixiviado previamente aireado y aforar hasta completar los 1000 mL con agua destilada en el segundo balón.
- Colocar en los frascos Winkler de 300 mL las muestras de cada dilución realizada y añadir la solución buffer (nutrientes) en cada frasco.
- Llevar a la incubadora durante 5 días. Y determinar el oxígeno disuelto final de cada uno de los frascos.

### **Determinación de Demanda Química de Oxígeno APHA – Standard Methods**

#### **No.5220 B**

#### *Preparación de reactivos*

##### *Preparación de solución de Dicromato de Potasio $K_2Cr_2O_7$ 0,25N*

- Pesar 12,259 g de Dicromato de Potasio  $K_2Cr_2O_7$  de calidad reactivo, secado previamente a 103 °C durante 2 horas.
- Colocar el Dicromato de Potasio  $K_2Cr_2O_7$  en un vaso de precipitación de 100 mL y disolverlo con aproximadamente 200mL de agua destilada.
- Trasvasar la mezcla anterior a un balón aforado de 1000mL, lavar el vaso con agua y colocarla en el balón. Ayudados de una piseta aforar a 1000 mL.

##### *Preparación del reactivo ácido sulfúrico – sulfato de plata*

- Pesar 10,12 g de Sulfato de plata  $Ag_2SO_4$ .
- Colocar el reactivo en un litro de ácido sulfúrico concentrado. Dejar reposar de 1 2 días para disolver el sulfato de plata.

##### *Preparación de la solución indicadora ferroína*

- Pesar 1,485 g de 1-10 fenatrolina monohidratado.
- Pesar 0,695 g de Sulfato ferroso  $FeSO_4$ .

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

- Colocar los reactivos en un vaso de precipitación de 100 mL y disolverlos con aproximadamente 50 mL de agua destilada.
- Trasvasar la mezcla anterior a un balón aforado de 100 mL, lavar el vaso con agua y colocarlo en el balón. Ayudados de una piseta aforar a 100 mL. Esta solución de denomina ferroín.

### *Preparación del Sulfato ferroso amoniacal $(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,0625N*

- Pesar 24,5 g de Sulfato ferroso amoniacal  $(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .
- Colocar el reactivo en un Erlenmeyer de 25 mL y disolverlo con aproximadamente 200 mL de agua destilada.
- Añada 20 mL de Acido sulfúrico concentrado.
- Trasvasar la mezcla anterior a un balón aforado de 1000 mL, lavar el vaso con agua y colocarlo en el balón. Ayudados de una piseta aforar a 1000 mL.

### *Preparación de la muestra para el análisis de DQO*

- Colocar 10 mL de muestra problema o de la dilución adecuada en el balón de destilación.
- Añadir 0,1 g de sulfato de mercurio.
- Añadir 5 mL de solución de dicromato de potasio 0,25N.
- Anladir 15 mL de la mezcla de ácido sulfúrico – sulfato de plata, con mucho cuidado y con un baño frío en la parte superior del balón, utilizando una bureta. Añadir núcleos de ebullición.
- Armar el equipo de reflujo abierto, conectar la plancha calefactora y dejar la muestra en reflujo por espacio de 2 horas.

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

- Una vez terminado el tiempo de reflujó enfríese y lávese el refrigerante con agua destilada y diluya la mezcla hasta aproximadamente el doble de su volumen con agua destilada.
- Enfríe a temperatura ambiente y determine el exceso de dicromato de potasio con la solución de sulfato ferroso amoniacal SAF y usando como indicador el ferroín. Coloque 3 gotas de ferroín a la muestra digerida.
- Titular la muestra con sulfato ferroso amoniacal 0,0625N de sodio 0,0109N hasta que se dé el primer cambio de color de azul verdoso a marrón rojizo. Anotar los mL de SAF gastado.
- Paralelamente a todo el procedimiento anterior digiera y titule una muestra blanco, utilizando para la digestión 10 mL de agua destilada.

### *Valoración de la Normalidad del sulfato ferroso amoniacal*

- Colocar en un vaso de precipitación 5 mL de solución de ácido sulfúrico – sulfato de plata.
- Diluya a aproximadamente 50 mL con agua destilada.
- Añada 3 gotas del indicador ferroín.
- Titular la mezcla con sulfato ferroso amoniacal 0,0625N de sodio 0,0109N hasta que se dé el primer cambio de color de azul verdoso a marrón rojizo.

### **Determinación de Nitritos y Nitratos APHA – Standard Methods No.4500E**

#### *Nitritos*

- Realizar la dilución 1:100 de la muestra.
- Colocar la muestra sin reactivo en una celda de 10 mL para utilizarse como blanco.

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

- Colocar la muestra en otra celda y agregar el reactivo Nitri Ver 2, agitar hasta disolver y dejar reposar por 10 minutos.
- Correr el programa 2600 a 585 nm en el espectrofotómetro con el banco y luego con la muestra.

### *Nitratos*

- Realizar la dilución 1:100 de la muestra.
- Colocar la muestra sin reactivo en una celda de 10 mL para utilizarse como blanco.
- Colocar la muestra en otra celda y agregar el reactivo Nitra Ver 5, agitar por 1 minuto y dejar reposar por 5 minutos.
- Correr el programa 361 a 500 nm en el espectrofotómetro con el banco y luego con la muestra.

### **Determinación de Nitrógeno Amoniacal – HACH 8038 (Standard Methods No.4500-NH<sub>3</sub> B & C)**

- Realizar la dilución 1:100 de la muestra.
- Destilar aproximadamente 50 mL de la muestra.
- Colocar agua destilada en una celda de 25 mL, para utilizarse como blanco, colocar 3 gotas de estabilizador mineral, 3 gotas de Polyvinyl Alcohol Dispersing Agent y 1 mL de Reactivo Nessler y dejar reposar por 1 minuto.
- Colocar la muestra en otra celda de 25 mL, colocar 3 gotas de estabilizador mineral, 3 gotas de Polyvinyl Alcohol Dispersing Agent y 1 mL de Reactivo Nessler y dejar reposar por 1 minuto.

## APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR

- Correr el programa 380 a 675 nm en el espectrofotómetro con el banco y luego con la muestra.

### **Determinación de Sulfuros – HACH 813 (Standard Methods No.4500S<sup>2</sup>-D)**

- Realizar la dilución 1:100 de la muestra.
- Colocar la muestra, sin reactivo, en una celda de 10 mL, para ser usado como blanco.
- Colocar la muestra en otra celda de 10 mL, agregar 0,5 mL del reactivo Sulfide 1 y girar para mezclar, agregar 0,5 mL del reactivo Sulfide 2 y girar para mezclar, dejar reposar por 5 minutos.
- Correr el programa 690 a 665 nm en el espectrofotómetro con el banco y luego con la muestra.

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO  
PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA,  
QUITO ECUADOR

**ANEXO 3**

**Anexo Fotográfico**

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Imagen 1.** Piscina 13 del relleno sanitario El Inga

**Fuente:** David Yépez



**Imagen 2.** Peróxido de Hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%

**Fuente:** David Yépez

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Imagen 3.** Sulfato ferroso heptahidratado  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

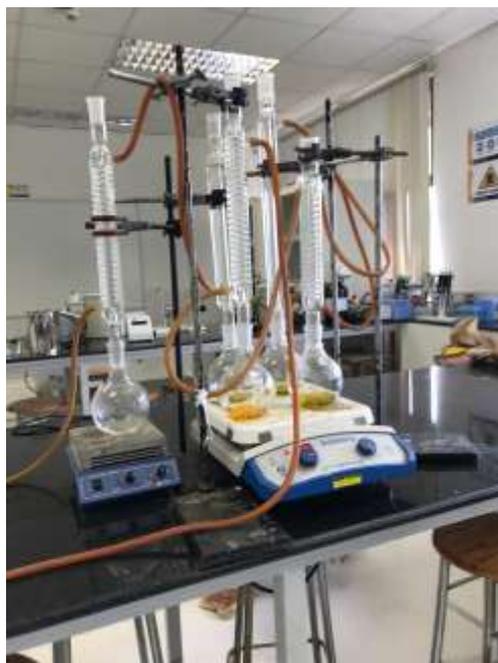
**Fuente:** David Yépez



**Imagen 4.** Destilación de la muestra

**Fuente:** David Yépez

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Imagen 5.** Análisis de DQO previo al tratamiento

**Fuente:** David Yépez



**Imagen 6.** Aplicación de reacción FENTON en el lixiviado

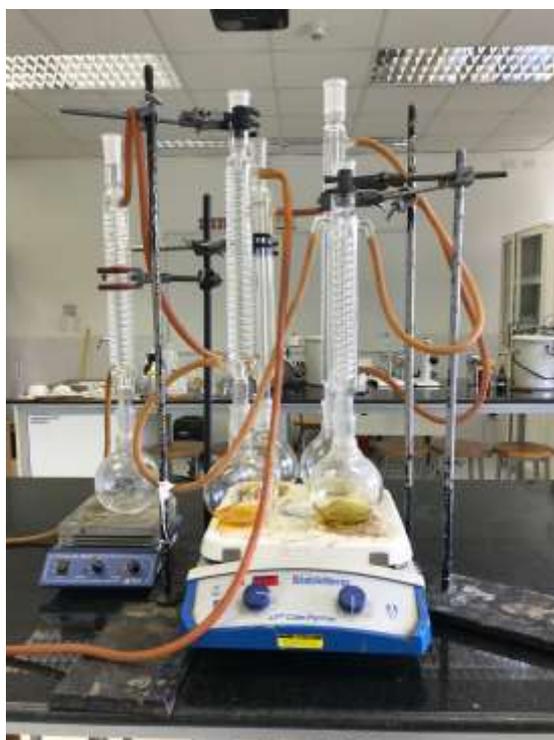
**Fuente:** David Yépez

APLICACIÓN DE REACCIÓN FENTON COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DE EL INGA, QUITO ECUADOR



**Imagen 7.** Lixiviado tratado con reacción FENTON en diferentes dosis

**Fuente:** David Yépez



**Imagen 8.** Análisis de DQO posterior al tratamiento con reacción FENTON

**Fuente:** David Yépez