



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente

**Procesos de oxidación avanzada fenton para el tratamiento de las aguas
residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo**

Trabajo de Titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera/o
en Manejo y Conservación del
Medio Ambiente

AUTOR:

Mileny Lizzeth Martínez Sánchez.

DIRECTOR:

Ing. Iván Patricio Burneo Saavedra, PhD.

Loja- Ecuador

2023

Certificación

Loja, 20 de Junio de 2023

Ing. Iván Patricio Burneo Saavedra, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Procesos de oxidación avanzada fenton para el tratamiento de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo**, previo a la obtención del título de **Ingeniera en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**, de la autoría de la estudiante **Mileny Lizzeth Martínez Sánchez**, con cédula de identidad Nro. **1150054060**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Ing. Iván Patricio Burneo Saavedra, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Mileny Lizzeth Martínez Sánchez**, declaro ser autora del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula de identidad: 1150054060

Fecha: 20 de Junio del 2023

Correo electrónico: mileny.martinez@unl.edu.ec

Teléfono: 0980971970

Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Mileny Lizzeth Martínez Sánchez**, declaro ser autora del Trabajo de Titulación denominado: **“Procesos de oxidación avanzada fenton para el tratamiento de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo”** como requisito para optar al Título de **Ingeniera en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Digital Institucional en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja a los veinte días del mes de junio de dos mil veintitrés.

Firma: 

Autora: Mileny Lizzeth Martínez Sánchez

Cédula de identidad: 1150054060.

Dirección: Av. Universitaria, entre calle Quito e Imbabura, Loja.

Teléfono: 0980971970

Correo electrónico: mileny.martinez@unl.edu.ec

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Iván Patricio Burneo Saavedra, PhD.

Dedicatoria

Dedico con profundo amor y gratitud este presente trabajo a Dios, quien me ha brindado la fortaleza y guía en cada paso de este camino. A mi amada familia, en especial a mis padres Holger y Elida, cuyo amor y apoyo incondicional han sido mi sostén inquebrantable. A mis hermanos Denis y Yandry, quienes siempre han estado a mi lado, siendo mi fuente constante de motivación y aliento para superarme día a día. Y a mis adorables sobrinas, mis pulguitas: Arantza y Camila, quienes con su inocencia y alegría son mi inspiración más grande. Este logro no sería posible sin su amor y apoyo incondicional.

Los amo mucho.

Mileny Lizzeth Martínez Sánchez

Agradecimiento

Mi primer agradecimiento es para Dios y a la Virgencita del Cisne por haberme dado vida, salud, ser quien guía mi camino y por ser la fuerza de lucha constante.

A mis padres, hermanos, abuelitos y demás familiares, les agradezco de corazón por su apoyo incondicional. Gracias a su amor y los valores que me han inculcado, he podido convertirme en una persona de bien y encontrar la fortaleza para enfrentar cualquier desafío.

A la Universidad Nacional de Loja por darme la oportunidad de iniciar mis estudios en la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente.

A mi director de tesis Dr. Iván Burneo y a la Ing. Andrea Castillo por su invaluable apoyo, comprensión y amistad durante este camino hacia la culminación de mi sueño profesional. También agradezco a toda la planta docente por compartir sus conocimientos y experiencias, enriqueciendo mi formación como una profesional de bien.

A mi compañero de aventuras, gracias por estar siempre a mi lado, brindándome tu apoyo incondicional. Tu presencia ha sido mi fuerza y mi alegría en cada paso del camino.

A mis amigos por cada momento compartido, desde las largas noches de estudio hasta las risas en los descansos entre clases. Los recuerdos que hemos creado juntos son inolvidables y siempre los llevaré en mi corazón.

A la Empresa Pública de Rastro Catamayo, y en particular al Ing. Luis Delgado, agradezco su colaboración y apertura para mi proyecto de titulación. Su apoyo ha sido fundamental en mi desarrollo profesional.

Finalmente, quiero extender mi agradecimiento, a todas las personas que, de una forma u otra, han colaborado en la realización de este proyecto. Que Dios los bendiga a todos. ¡Muchas gracias!

Mileny Lizzeth Martínez Sánchez

Índice de contenidos

Certificación.....	ii
Autoría.....	iii
Carta de autorización.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas:.....	ix
Índice de figuras:.....	x
Índice de anexos:.....	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
2.1. Abstract	3
3. Introducción.....	4
4. Marco Teórico	7
4.1. Contaminación del agua	7
4.2. Aguas Residuales	7
4.3. Parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de mataderos.....	9
4.4. Límites permisibles de descarga de aguas residuales.....	10
4.5. La relación entre la demanda biológica de oxígeno y la demanda química de oxígeno (DBO ₅ /DQO)	11
4.6. Tratamiento de aguas residuales	12
4.7. Procesos de tratamiento de aguas residuales.....	12
4.8. Procesos de Oxidación avanzados.....	13
4.9. Proceso Fenton.	15
4.10. Normativa Nacional	18
5. Metodología.....	19
5.1. Área de estudio.....	19
5.2. Caracterización de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas en la Empresa Pública de Rastro Catamayo.....	20
5.3. Determinación de la dosis óptima del reactivo fenton para la degradación de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo con dos variables respuestas DQO y pH.	27
5.4. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales obtenidas después del proceso fenton	29
5.5. Análisis estadístico.....	29
6. Resultados	31
6.1. Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas en la Empresa Pública de Rastro Catamayo.	31

6.2.	Determinar el efecto de la combinación de los niveles de las variables de estudio (dosificación del reactivo Fenton, FeSO_4 , H_2O_2) en la degradación del efluente líquido de la Empresa Pública de Rastro Catamayo utilizando como variable respuesta la Demanda Química De Oxígeno y pH.	32
6.3.	Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales obtenidas después de los procesos de oxidación Fenton.	34
7.	Discusión	35
8.	Conclusiones	40
9.	Recomendaciones	41
10.	Referencias	42
11.	Anexos	47

Índice de tablas:

Tabla 1.	Características de las aguas residuales antes de la depuración de mataderos	9
Tabla 2.	Límites permisibles de descarga al alcantarillado y cuerpos de agua dulce.	10
Tabla 3.	Relación DBO ₅ /DQO	12
Tabla 4.	Procesos de oxidación avanzada	13
Tabla 5.	Diseño superficie respuesta de la dosis óptima del reactivo fenton.....	27
Tabla 6.	Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo.....	31
Tabla 7.	Variable respuesta Demanda química de oxígeno	32
Tabla 8.	Variable respuesta pH (acidificado y neutralizado)	34
Tabla 9.	Porcentaje de remoción de DQO para la dosis óptima del proceso Fenton	34
Tabla 10.	Caracterización fisicoquímica después de la aplicación del proceso Fenton optimizado de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo	35

Índice de figuras:

Figura 1. Mapa de ubicación de la Empresa Pública de Rastro Catamayo.....	19
Figura 2. Puntos de muestreo	21
Figura 3. Superficie respuesta de la variable DQO.....	33

Índice de anexos:

Anexo 1.	Muestreo en la Empresa Pública de Rastro Catamayo.....	47
Anexo 2.	Análisis in situ de pH, temperatura y conductividad.....	47
Anexo 3.	Análisis de los parámetros fisicoquímicos en laboratorio.....	48
Anexo 4.	Proceso Fenton.	48
Anexo 5.	Análisis de laboratorio UMAPAL del parámetro dureza.	49
Anexo 6.	Modelo lineal para la variable DQO en el software Desing Expert 13.....	50
Anexo 7.	Modelo de 2 FI para la variable DQO en el software Design Expert 13.	50
Anexo 8.	Modelo cuadrático para la variable DQO en el software Design Expert 13.	50
Anexo 9.	Modelo lineal gráfico 3D de la respuesta DQO	51
Anexo 10.	Modelo de dos factores independientes gráfico 3D de la respuesta DQO	52
Anexo 11.	Modelo cuadrático gráfico 3D de la respuesta DQO	53
Anexo 12.	Certificado de traducción a inglés del resumen.....	54

1. Título

Procesos de oxidación avanzada fenton para el tratamiento de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo.

2. Resumen

Los mataderos o camales desempeñan un papel crucial en la producción de alimentos necesarios para la dieta global, pero su actividad genera una gran cantidad de aguas residuales altamente contaminantes que a menudo no son tratadas adecuadamente. Estas aguas residuales representan un riesgo para el medio ambiente y la salud de las personas que viven cerca de estas instalaciones. Para abordar este problema, se llevó a cabo una investigación para evaluar la eficiencia de los procesos de oxidación Fenton en la degradación de estas aguas residuales. El proceso de oxidación Fenton implica la adición de sales de hierro y peróxido de hidrógeno a un medio ácido para formar radicales $\cdot\text{OH}$, los cuales ayudan a descomponer los compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Durante el estudio, se evaluaron varios parámetros, como DBO_5 , DQO, alcalinidad, dureza, pH, conductividad, sólidos totales, turbidez y temperatura. A través del análisis del proceso Fenton y dos variables de respuesta (DQO y pH) utilizando la metodología de superficie de respuesta, se llevaron a cabo 9 experimentos que lograron remociones de DQO superiores al 80%. Se determinó que las concentraciones óptimas de sulfato ferroso (FeSO_4) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) fueron de 2,25 g a 3 g y de 2 ml a 5 ml, respectivamente, lo que resultó en una remoción de DQO superior al 90%. Los resultados demostraron que el proceso Fenton es eficiente en el tratamiento de las aguas residuales de los mataderos, ya que mejoró la mayoría de los parámetros fisicoquímicos iniciales, especialmente DQO y DBO. Además, se encontró que el índice de biodegradabilidad fue de 0,5, lo que indica que las aguas residuales son parcialmente biodegradables. En conclusión, el proceso Fenton resulta ser eficiente y puede ser utilizado como un pretratamiento en el manejo de las aguas residuales en los mataderos.

Palabras clave: Camales, Fenton, aguas residuales, remoción, DQO.

2.1. Abstract

As a key part of the global food production process, slaughterhouses play an essential role. Unfortunately, most of the wastewater they generate is not adequately treated, resulting in high levels of pollution. People living near these facilities are at risk for health and environmental hazards due to this wastewater. In order to address this problem, Fenton oxidation processes were investigated in order to evaluate their efficiency in the degradation of this wastewater. The Fenton oxidation process involves the addition of iron salts and hydrogen peroxide to an acidic medium to form $\cdot\text{OH}$ radicals, which help decompose organic compounds in the wastewater. During the study, several parameters were evaluated, such as BOD₅, COD, alkalinity, hardness, pH, conductivity, total solids, turbidity and temperature. Through the analysis of the Fenton process and two response variables (COD and pH) using response surface methodology, 9 experiments were conducted that achieved COD removals above 80%. The optimum concentrations of ferrous sulfate (FeSO_4) and hydrogen peroxide (H_2O_2) were determined to be 2.25 g to 3 g and 2 ml to 5 ml, respectively. This resulted in COD removal greater than 90%. The results showed that the Fenton process is efficient in the treatment of slaughterhouse wastewater, as it improved most of the initial physicochemical parameters, especially COD and BOD. In addition, the biodegradability index was 0.5, indicating that the wastewater is partially biodegradable. As a conclusion, the Fenton process is efficient and suitable for managing wastewater in slaughterhouses as a pretreatment.

Key words: slaughterhouses, Fenton, wastewater, removal, COD.

3. Introducción

En muchas partes del mundo, la industria cárnica, especialmente los mataderos o camales, se considera como uno de los principales responsables de la producción de alimentos esenciales (Soto et al., 2019). Sin embargo, esta actividad productiva conlleva una serie de problemas que afectan al medio ambiente, siendo uno de las principales preocupaciones la generación de grandes cantidades de aguas residuales, lo que resulta en contaminación ambiental y malestar para la humanidad (Cun & Álvarez, 2017).

Es importante destacar que el agua es el recurso más afectado por la industrialización y comercialización de carnes (Soto et al., 2019). Aproximadamente el 95% de las aguas residuales vertidas por los camales carecen de procedimientos adecuados de tratamiento y se vierten directamente en los ríos, lo que provoca una grave contaminación y la propagación de enfermedades (Espín, 2015). Es común encontrar en las aguas residuales de mataderos sangre, rumen, pelo, grasas, proteínas, así como líquidos resultantes de las operaciones de limpieza y desinfección de equipos e instalaciones (Salas & Condorhuamán, 2008)

En Ecuador, existen algunos cuerpos legales como la ley de prevención de contaminación de 1976, los acuerdos para el control de la contaminación hídrica de 1989 y las leyes de gestión ambiental de 1999. Sin embargo, a pesar de la existencia de legislación adecuada, la Secretaría Nacional del Agua admite que no existe un equipo técnico permanente que supervise el cumplimiento de las normativas para el tratamiento de las aguas residuales (SENAGUA, 2016). El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de etapas y tecnologías diseñadas para eliminar contaminantes y sustancias nocivas presentes en las aguas residuales antes de su liberación al medio ambiente. Las tecnologías de oxidación avanzada (TOA) representan una alternativa para reducir la contaminación hídrica en industrias con contaminantes recalcitrantes (Barrera, 2020). Estas tecnologías se destacan por su versatilidad, la amplia gama de tecnologías específicas disponibles y su capacidad para combinarse con métodos convencionales (Medina et al., 2020). Sin embargo, estas técnicas convencionales tienen limitaciones en cuanto a la eliminación de contaminantes resistentes, lo que las hace lentas e ineficaces y puede generar subproductos con mayor toxicidad (Salas & Condorhuamán, 2008). Entre las tecnologías de oxidación, el proceso Fenton se ha utilizado con éxito en el tratamiento de aguas contaminadas en diversas industrias, como la química, termoeléctrica, cosmética,

agroquímica, textil, petroquímica, alimentaria y en lixiviados de rellenos sanitarios (Sanz et al., 2013).

Los mataderos representan una importante fuente de contaminación ambiental debido a la descarga inadecuada de los desechos generados durante el proceso de matanza, estas descargas pueden contaminar los suelos y las fuentes de agua cercanas (Ruiz, 2011). La Empresa Pública de Rastro Catamayo cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales que comprende de tratamiento primarios (rejillas, pozos de sedimentación y piscina de oxidación...) que no cumplen de manera satisfactoria normas mínimas de descarga, lo que provoca aguas de descarga con presencia de tejidos y un nivel de sólidos no deseados.

En la Empresa Pública de Rastro Catamayo, se ha mostrado un compromiso ambiental en relación con las acciones tomadas para abordar el problema de contaminación por la descarga de sus efluentes líquidos. Estos efluentes, debido a su alta carga de materia orgánica, pueden causar problemas ambientales al entrar en contacto con organismos, como la propagación de malos olores y la presencia de vectores, lo que puede generar problemas de salud pública y afectar negativamente el bienestar de las personas.

En este contexto, el objetivo de esta investigación es utilizar una alternativa de tratamiento de aguas residuales que contribuya a reducir la contaminación. La tecnología seleccionada pertenece a los procesos de oxidación avanzada y se conoce como proceso Fenton, que implica agregar sales de hierro en presencia de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) a un medio ácido para formar radicales $\cdot OH$ (Ghosh et al., 2010). El proceso Fenton puede degradar muchos compuestos orgánicos de manera no selectiva y a altas velocidades de reacción, incluso logrando la mineralización completa de los contaminantes o su transformación en sustancias biodegradables (Bes et al., 2016).

Dado que las medidas de protección ambiental aplicadas en la Empresa Pública de Rastro Catamayo no han sido suficientes y todavía existe una considerable contaminación por las descargas líquidas, es necesario llevar a cabo este proyecto que utiliza una tecnología que ha demostrado resultados satisfactorios y que puede ser beneficiosa para el tratamiento de este tipo de aguas residuales.

Con base en lo expuesto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficiencia de los procesos de oxidación Fenton para la degradación de las aguas residuales de la Empresa

Pública de Rastro Catamayo. Para lograr este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas en la Empresa Pública de Rastro Catamayo.
- Determinar el efecto de la combinación de los niveles de las variables de estudio (dosificación del reactivo Fenton, FeSO_4 , H_2O_2) en la degradación del efluente líquido de la Empresa Pública de Rastro Catamayo utilizando como variable respuesta la Demanda Química de Oxígeno y pH.
- Caracterizar de manera fisicoquímica las aguas residuales obtenidas después de los procesos de oxidación Fenton.

4. Marco Teórico

4.1. Contaminación del agua

El agua es uno de los recursos naturales más importante para el desarrollo sostenible, siendo uno de los componentes limitados más abundantes del planeta y que solamente funciona como recurso renovable si está bien gestionado; por ello, cuando es utilizada por el hombre para el desarrollo de alguna actividad económica se convierte en agua residual que contiene materia orgánica y otras sustancias químicas que alteran su calidad original. Una vez usada, es necesario controlar los parámetros fisicoquímicos y biológicos característicos, antes de desecharla sobre cuerpos de agua o suelos (Mejía, 2005).

4.2. Aguas Residuales

Las aguas residuales son el resultado de la utilización del agua para distintos fines. Como resultado de su uso, el agua recoge materiales en suspensión y en disolución, alterando sus propiedades. Las características de las aguas residuales varían mucho según el tipo de uso; existe una diferencia significativa entre las aguas residuales urbanas o domésticas que se originan en el uso de agua en los hogares y las aguas residuales industriales que son provenientes de instalaciones fabriles (WWAP, 2017)

4.2.1. Aguas Industriales

Las aguas industriales son vertidos generados en los procesos industriales cuyas características dependen del tipo de industria (Espinoza, 2017). Se pueden clasificar en:

Aguas orgánicas. - Constituidos por subproductos de las industrias láctea, alimenticia, textil y de destilería que contienen una alta concentración de materia orgánica.

Aguas tóxicas. - Son el resultado de procesos industriales que involucran productos químicos, metálicos y otros, que pueden causar corrosión y modificar los métodos de tratamiento.

Aguas inertes. - Son vertidos de industrias de cerámica y metalúrgica, que provocan sedimentación y contaminación física.

4.2.2. Aguas residuales de camales

Otra de las actividades económicas que contaminan los recursos hídricos son los mataderos o camales. Los mataderos son establecimientos industriales que pueden ser públicos o privados,

donde se sacrifican animales para su posterior procesamiento, almacenamiento y comercialización como carne u otros productos derivados de animales (Coa, 2016).

Las actividades que se ejecutan en un camal se caracterizan por su número de operaciones de lavado que deben realizarse, así como el mantenimiento de las condiciones higiénicas que requiere este tipo de industria (Salas & Condorhuamán, 2008).

Los vertidos de un matadero dependen del tipo de animal sacrificado (aves, cerdos, terneros, corderos, conejos, etc.), del grado de procesado y de la posible elaboración de harinas (Espinosa, 2011) los mismos que tienen una elevada carga orgánica, tanto disuelta como en suspensión, constituida por ácidos orgánicos volátiles, aminas y otros compuestos orgánicos nitrogenados, también poseen una concentración de grasas, así como una concentración variable de productos lignocelulósicos (Montenegro, 2016).

4.2.3. *Generación de aguas residuales en las etapas del proceso de faenamiento*

Las operaciones de un matadero generan vertidos complejos y variables, dependiendo de factores como tipo de animal sacrificado, grado de procesado, equipamiento y operaciones de limpieza (Espinosa, 2011), estas aguas residuales se identifican por la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Forero et al., 2005). Las sustancias orgánicas están asociadas al material orgánico biodegradable que provienen de las etapas del proceso de faenamiento, como lavado de estiércol acumulado, limpieza en las fases de matanza y desangrado, utilización de agua en escaldadoras y enfriadores, despresado y extracción de vísceras (Arenas & Nuncira, 2010), mientras que, el componente inorgánico está constituido por compuestos derivados de productos usados en la limpieza y desinfección de pisos, equipos y maquinaria industrial y se presenta como material inerte en suspensión y sustancias en disolución (fosfatos, nitratos, etc.) (L. K. Becerra et al., 2014).

En resumen, los residuos líquidos se generan en las operaciones siguientes (Lara, 2011):

- a) Los corrales de reposo, por aguas de lavado, materia fecal y orina, del ganado.
- b) Área de desangrado.
- c) Operaciones de remoción de cueros, pelo, carne y vísceras.
- d) Procesamiento de la carne, vísceras e intestinos: estas aguas pueden contener sangre, grasas, fango, contenido intestinal, pedazos de carne, pelo y desinfectantes.

- e) La operación de trozado de la carne genera sólidos que caen al piso, que se adhieren a cuchillos y equipos, los que luego son eliminados en la operación de limpieza.

Según Borja et al., (2019) el consumo de agua está directamente relacionado con el tamaño del ganado faenado, por lo que, habrá variaciones de caudales en los horarios que se realice el proceso de faenamamiento.

4.2.4. *Composición de los vertidos de un camal*

Los residuos generados durante el proceso de sacrificio se pueden caracterizar como sólidos, líquidos o gaseosos. La excreción de fluidos consiste principalmente en orina, heces, sangre, suciedad, grasa, alimentos no digeridos y agua utilizada para la limpieza (Nolasco, 2018). Además, durante la operación diaria de los mataderos se generan sustancias y elementos como sangre, grasas y heces, que en conjunto otorgan a las aguas residuales las siguientes características: 1) un elevado contenido de sustancias orgánicas (DBO₅ – DQO) en todos los subproductos y aguas de lavado, 2) una alta concentración de grasas, y 3) presencia de sólidos generados durante el proceso de lavado (Hernández & Sánchez, 2014).

4.3. **Parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de mataderos**

La Tabla 1 muestra las características de las aguas residuales antes de depuración en mataderos, como DBO (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), sólidos en suspensión (SST), conductividad, pH, limpieza de las instalaciones, niveles elevados de nitrógeno, fósforo y sal.

Tabla 1. Características de las aguas residuales antes de la depuración de mataderos

Parámetro	Máx.	Mín.
DQO _s (mg O ₂ /l)	35 000	774
DBO ₅ (mg O ₂ /l)	5 350	500
SS (mg/l)	5 000	220
A y G (mg/l)	1 200	23
NT (mg/l)	750	48
PT (mg/l)	90	10
Cl (mg/l)	1 000	649
pH (mg/l)	8	6

Fuente: ESAMUR (2020)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se puede definir como la cantidad de oxígeno consumido para oxidar la materia orgánica, biodegradable o no, en medios ácidos y condiciones energéticas por la acción de un agente químico oxidante fuerte (Metcalf and Eddy INC., 2005).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un indicador que determina indirectamente la concentración de materia orgánica biodegradable a través de la demanda de oxígeno que ejercen los microorganismos a través de la respiración (ESAMUR, 2020). La DBO₅ indica la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante un periodo de incubación de 5 días a una temperatura de 20°C en una muestra de agua para la degradación aeróbica de las sustancias contenidas en el agua (Metcalf and Eddy INC., 2005).

4.4. Límites permisibles de descarga de aguas residuales.

El Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) de Ecuador, provee los valores máximos permisibles para la descarga de aguas residuales a cuerpos de agua, los cuales deben ser respetados con el fin de mantener un equilibrio ambiental (Ministerio del Ambiente, 2015). En la tabla 2 se muestra los límites máximos permisibles para descargas al alcantarillado y a cuerpos de agua dulce.

Tabla 2. Límites permisibles de descarga al alcantarillado y cuerpos de agua dulce.

Parámetro	Expresado Como	Unidad	Límite máximo permisible	
			Alcantarillado	Cauce de agua
Aceites y grasas	A y G	mg/L	70	30
Aluminio	Al	mg/L	5	5
Arsénico total	As	mg/L	0,1	0,1
Bario	Ba	mg/L		2
Boro total	B	mg/L		2
Cadmio	Cd	mg/L	0,02	0,02
Cianuro total	CN*	mg/L	1	0,1
Cloro activo	Cl	mg/L	0,5	0,5
Cloroformo	Ext. Carbón Cloroformo ECC	mg/L	0,1	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/L		1000
Cobre	Cu	mg/L	1	1
Cobalto	Co	mg/L	0,5	0,5
Coliformes fecales	NMP	NMP/100		2000
Color real	Color real	Unidades De color		*Inapreciable en dilución :1/20
Compuestos fenólicos	Expresado como Fenol	mg/L	0,2	0,2
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/L	0,5	0,5
Demanda bioquímica de oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/L	250	100
Demanda química	DQO	mg/L	500	200

de oxígeno				
Estaño	Sn	mg/L		5
Fluoruros	F	mg/L		5
Fósforo total	P	mg/L	15	10
Hierro	Fe	mg/L	25	10
Hidrocarburos	TPH	mg/L	20	20
Totales				
Materia flotante	Visible		Ausencia	Ausencia
Manganeso	Mn	mg/L	10	2
Mercurio	Hg	mg/L	0,01	0,005
Níquel	Ni	mg/L	2	2
Nitrógeno	N	mg/L		30
Amoniacal				
Nitrógeno total	N	mg/L	60	50
Compuestos organoclorados	Organoclorados	mg/L	0,05	0,05
organoclorados	totales			
Organofosforados y carbamatos	Organofosforados	mg/L	0,1	0,1
	Totales			
Plata	Ag	mg/L	0,5	0,1
Plomo	Pb	mg/L	0,5	0,2
Potencial de Hidrógeno	pH		6-9	6-9
Selenio	Se	mg/L	0,5	0,1
Sulfuros	S	mg/L	1	0,5
Sólidos suspendidos	SS	mg/L	220	130
Sulfatos	SO ₄	mg/L	400	1000
Temperatura		°C	<40	Condición natural ±3
Tensoactivos	Substancias activas al alcohol de metileno	mg/L	2	0,5
Turbidez		NTU		**
Zinc	Zn	mg/L	10	5

Fuente: Ministerio del Ambiente (2015)

4.5. La relación entre la demanda biológica de oxígeno y la demanda química de oxígeno (DBO₅/DQO)

El valor DQO siempre será mayor que el valor DBO porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente pero no de forma biológica. La diferencia es que gramos de oxígeno o miligramos de DBO representan a la cantidad de oxígeno necesaria para degradar biológicamente la materia orgánica; mientras que la DQO es la cantidad de oxígeno requerido para la descomposición química de la materia orgánica, y esta relación (DBO₅/DQO) puede

usarse como indicadores mejorados de biodegradabilidad (García et al., 2006). En consecuencia:

Tabla 3.Relación DBO₅/DQO

Relación		Indicador
DBO ₅ /DQO	> 0,60	Contenido orgánico fácilmente biodegradable
DBO ₅ /DQO	≈ 0,41 - 0,59	Contenido orgánico parcialmente biodegradable
DBO ₅ /DQO	< 0,40	Contenido orgánico persistente, no biodegradable

Fuente: García et al. (2006)

4.6. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales es fundamental para proteger el medio ambiente y garantizar la salud pública. Los procesos de tratamiento de aguas residuales se basan en varias técnicas que se utilizan para eliminar los contaminantes del agua residual y hacerla segura para su descarga en el medio ambiente o su reutilización.

En los países de bajos ingresos económicos sólo se trata un 8% de las aguas residuales domésticas e industriales, dicho valor es muy bajo comparado con el 70% del agua residual tratada en los países de ingresos económicos altos (UNESCO, 2017). El 80% - 95% del agua total consumida forma parte del efluente final y se caracteriza por tener concentraciones elevadas de materia orgánica, aceites y grasas (ESAMUR, 2020).

El tratamiento de aguas residuales de camales es un proceso clave no sólo para impedir la contaminación del agua en las áreas circundantes, sino también para proteger la salud pública y garantizar la seguridad alimentaria. El uso de diferentes tipos de tratamientos físicos, químicos y biológicos para mejorar la calidad de las aguas residuales generadas en los camales es limitada, debido a su grado de contaminación por las actividades que se realizan (L. K. Becerra et al., 2014).

4.7. Procesos de tratamiento de aguas residuales

Existen varios procesos y tecnologías utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Estos procesos se clasifican en diferentes etapas de tratamiento, que pueden incluir tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario y tratamiento de lodos. Algunos de los procesos más comunes incluyen:

- *Tratamiento físico:* Incluye procesos de separación física como cribado, desarenado y desengrasado para eliminar sólidos y materiales flotantes (Noyola et al., 2013).
- *Tratamiento biológico:* Utiliza microorganismos para descomponer y estabilizar la materia orgánica presente en las aguas residuales. Ejemplos de procesos biológicos incluyen el proceso de lodos activados y las lagunas de estabilización (Noyola et al., 2013).
- *Tratamiento químico:* Implica la adición de productos químicos para precipitar, coagular o desinfectar el agua residual. Algunos procesos químicos comunes incluyen la coagulación-floculación, la desinfección con cloro o el uso de procesos de oxidación avanzada (Belzona Inc, 2010)
- *Tratamiento avanzado:* Se utilizan procesos más especializados para eliminar contaminantes específicos, como la filtración de membranas, la adsorción con carbón activado, la desinfección ultravioleta y los procesos de oxidación avanzada, como el proceso Fenton (Noyola et al., 2013).

4.8. Procesos de Oxidación avanzados

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son técnicas especializadas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales para la degradación de contaminantes orgánicos recalcitrantes. Estos procesos se basan en la generación de especies químicas altamente oxidantes, como radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$), que son capaces de oxidar y descomponer compuestos orgánicos difíciles de eliminar mediante métodos convencionales de tratamiento (Bes et al., 2016).

4.8.1. Tipos de procesos de oxidación

En la tabla 3 se presentan los principales métodos de oxidación avanzada clasificados en procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos, que implican principalmente la formación del radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) en estos procesos permite una alta efectividad en la oxidación de la materia orgánica, contribuyendo así a la mejora de la calidad del agua tratada.

Tabla 4. Procesos de oxidación avanzada

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino ($\text{O}_3/\text{OH} \cdot$)	Oxidación en agua sub y supercrítica
Ozonización con peróxido de hidrógeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$)	Procesos fotoquímicos
Proceso Fenton ($\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$) y relacionados	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)

Procesos no fotoquímicos

En los procesos no fotoquímicos, el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) se forma a través de reacciones químicas que involucran la interacción entre especies químicas presentes en el sistema como (Doménech et al., 2002):

- *Proceso Fenton:* En el proceso Fenton, se utiliza la reacción entre peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sales de hierro (generalmente Fe^{2+}) en medio ácido. Esta reacción genera el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) altamente reactivo, que ataca y degrada los contaminantes orgánicos presentes en el agua residual.
- *Ozonización:* La ozonización consiste en la aplicación de ozono (O_3) al agua residual. El ozono es un poderoso oxidante que reacciona con los contaminantes orgánicos rompiendo los enlaces químicos y que conduce a posterior degradación. La ozonización puede llevarse a cabo tanto en presencia como en ausencia de luz ultravioleta.

Procesos fotoquímicos

En los procesos fotoquímicos, el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) se forma a través de reacciones inducidas por la irradiación de luz ultravioleta (UV) sobre ciertos compuestos o catalizadores como (Doménech et al., 2002):

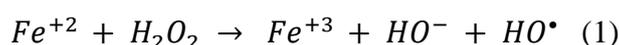
- *Foto-Fenton:* El proceso de foto-Fenton es una variante del proceso Fenton que aprovecha la irradiación de luz ultravioleta (UV) para aumentar la generación de radicales hidroxilos. La presencia de luz UV activa el peróxido de hidrógeno y promueve la formación de $\cdot\text{OH}$, lo que mejora la eficiencia del proceso de oxidación.
- *Fotocatálisis heterogénea:* La fotocatalisis heterogénea se basa en el uso de catalizadores semiconductores, como el dióxido de titanio (TiO_2), junto con la irradiación de luz UV. Cuando la luz UV incide sobre el catalizador, se generan pares de electrones y huecos en la banda de valencia. Estos huecos, también conocidos como huecos electrónicos, son espacios vacantes donde los electrones solían estar. Los huecos resultantes tienen una alta capacidad oxidante y pueden reaccionar con el agua y el

oxígeno para formar radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$). Estos radicales atacan y degradan los contaminantes orgánicos presentes en el agua.

4.9. Proceso Fenton.

El proceso Fenton lleva el nombre de su descubridor, el químico británico Henry John Horstman Fenton, quien lo desarrolló a finales del siglo XIX. Fenton publicó su investigación sobre la reacción de oxidación de compuestos orgánicos utilizando peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sales de hierro en 1894, durante sus investigaciones sobre la reacción de oxidación de ácido tartárico. Observó que la adición de sales de hierro (específicamente cloruro de hierro) al ácido tartárico y peróxido de hidrógeno resultaba en una rápida decoloración de la solución, indicando una oxidación del compuesto orgánico (Pignatello et al., 2006).

La reacción química que tiene lugar en el proceso Fenton se la conoce como reactivo Fenton y se representa de la siguiente manera:

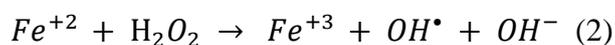


El radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) resultante es un poderoso oxidante capaz de degradar diversos compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Los radicales hidroxilo atacan y rompen los enlaces químicos de los contaminantes orgánicos, transformándolos en productos más simples y menos tóxicos (Ghosh et al., 2010).

4.9.1. Reactivo Fenton

El reactivo Fenton es una combinación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y una sal de hierro, generalmente cloruro ferroso (FeCl_2) o sulfato ferroso (FeSO_4) (Rodríguez, 2003).

Cabe mencionar, que, en la reacción de Fenton, el Fe^{+2} actúa como catalizador para generar radicales $\cdot\text{OH}$ durante la desintegración del peróxido de hidrógeno H_2O_2 como agentes oxidantes (2). En esta reacción, los iones Fe^{+3} son consumidos por los iones Fe^{+2} y la reacción definitivamente se detiene (Delgado, 2018).



El reactivo Fenton se compone de dos componentes principales:

- *Peróxido de hidrógeno (H_2O_2):* Es un compuesto químico conocido comúnmente como agua oxigenada. El H_2O_2 es una fuente de oxígeno y actúa como un oxidante en el proceso Fenton. Cuando se descompone en presencia de un catalizador de hierro, genera radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) altamente reactivos que son capaces de

oxidar y degradar los contaminantes orgánicos presentes en el agua residual (Aranibar, 2016).

– *Sal de hierro:* La sal de hierro utilizada en el reactivo Fenton, generalmente FeCl_2 o FeSO_4 , actúa como catalizador en la reacción. El hierro se encuentra en forma de Fe^{2+} y juega un papel crucial en la generación de los radicales hidroxilo. Durante la reacción, el hierro (Fe^{2+}) se oxida a hierro (Fe^{3+}) y es regenerado por la adición de H_2O_2 . Este ciclo catalítico permite la generación continua de radicales hidroxilo y la oxidación efectiva de los contaminantes orgánicos (Delgado, 2018).

Factores que influyen en el reactivo Fenton

La eficacia del reactivo de Fenton depende de la cantidad de peróxido de hidrógeno, del ajuste del pH, la temperatura, el tiempo de reacción, la adición de catalizador (FeSO_4) y otros factores. En este sentido, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) puede oxidar compuestos orgánicos complicados en organismos más pequeños, menos virulentos y más biodegradables (Rodríguez et al., 2008).

Los parámetros claves involucrados en el correcto funcionamiento del proceso Fenton son:

– ***Tipo de catalizador y concentración***

Las sales de hierro se utilizan como catalizadores en el proceso Fenton para facilitar la generación de radicales hidroxilos a partir del peróxido de hidrógeno. Sin embargo, es necesario tener precaución al dosificar las sales de hierro para evitar un exceso de catalizador que pueda consumir los radicales hidroxilos y afectar la reacción de oxidación. Además, el Fe^{3+} también puede estar presente en el sistema, pero su utilización directa como catalizador principal es limitada. La dosificación adecuada del peróxido de hidrógeno también es importante para garantizar su completa disolución en la solución reactante (Ríos, 2017).

– ***Concentración relativa de reactivos y contaminante***

En el caso del H_2O_2 , su concentración óptima depende del tipo y la concentración de los contaminantes presentes en el agua residual que se está tratando. Es importante encontrar un equilibrio adecuado, ya que una concentración insuficiente de H_2O_2 puede limitar la generación de radicales hidroxilos, mientras que una concentración excesiva puede resultar en reacciones indeseadas y la formación de subproductos no deseados (Rubio et al., 2014). De manera similar, la concentración de las sales de hierro también debe ser considerada cuidadosamente.

La presencia de un exceso de sales de hierro puede tener un impacto negativo en la reacción de oxidación al consumir los radicales hidroxilos generados. Es importante evitar una sobredosificación de sales de hierro para asegurar que los radicales hidroxilos están disponibles para reaccionar con los contaminantes y promover una oxidación eficiente. La concentración de oxidante puede depender del tipo y concentración de los contaminantes presentes, así como de su naturaleza recalcitrante (Bautista et al., 2007).

– ***Temperatura***

La reacción de oxidación de Fenton puede suceder a temperatura ambiente y la velocidad de oxidación se eleva con el aumento de la temperatura, sin embargo, la temperatura de la manipulación no debe exceder los 40 °C, porque por encima de este valor la permanencia del H₂O₂ disminuirá, ya que los valores altos de temperatura se acrecientan con la descomposición de H₂O₂ en O₂ y H₂O (Alves et al., 2009).

– ***Dosificación***

La adición gradual de H₂O₂ beneficia la oxidación de los contaminantes al reducir las reacciones ineficaces entre los grupos de hidroxilo, controlando así la rápida oxidación de Fe⁺² a Fe⁺³, este proceso beneficia la velocidad de reacción, lo cual es importante al inicio y durante dicho proceso (Rivas et al., 2003).

– ***pH***

El proceso Fenton depende del pH como medio de reacción, es decir la velocidad de la reacción tiende a ser máxima a valores de pH cercanos al valor mínimo de 3 y al valor máximo de 5, no obstante los valores de pH más bajos retardan la reacción, porque los iones de hierro son más estables y pueden descomponer el peróxido de hidrógeno, en cambio un pH más alto puede precipitar el hidróxido férrico y los reactivos de peróxido pueden descomponerse (Rivas et al., 2003).

– ***Agitación***

La mezcla adecuada en el proceso Fenton es esencial para favorecer las reacciones químicas y la generación de radicales hidroxilo. También actúa como un oxidante adicional una adecuada mezcla facilita la difusión de oxígeno en las aguas residuales, el oxígeno disuelto contribuye a la generación de especies oxidantes, incluidos los radicales hidroxilos, que participan en la degradación de los contaminantes. Sin embargo, se debe tener cuidado de no generar una

mezcla excesiva que pueda aumentar la dispersión de los contaminantes sin lograr una oxidación efectiva (Naranjo et al., 2021).

4.10. Normativa Nacional

Según la Constitución de la República del Ecuador (2008) a nivel nacional las políticas encaminadas a la protección del ambiente establecidas en la constitución son:

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, Sumak Kawsay. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.

Art. 71.- La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. Así mismo toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza.

Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, según la Asamblea Nacional de la República del Ecuador (2014)

Art.80.- Queda prohibido el vertido directo o indirecto de aguas o productos residuales, aguas servidas, sin tratamiento y lixiviados susceptibles de contaminar las aguas del dominio hídrico público.

La Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental (2004)

Art. 6.- Queda prohibido descargar, sin sujetarse a las correspondientes normas técnicas y regulaciones, a las redes de alcantarillado, o en las quebradas, acequias, ríos, lagos naturales o artificiales, o en las aguas marítimas, así como infiltrar en terrenos, las aguas residuales que contengan contaminantes que sean nocivos a la salud humana, a la fauna, a la flora y a las propiedades.

Art. 9.- Los Ministerios de Salud y del Ambiente, en sus respectivas áreas de competencia, también, están facultados para supervisar la construcción de las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como de su operación y mantenimiento, con el propósito de lograr los objetivos de esta Ley.

El Acuerdo Ministerial N°097 establece que las aguas residuales que no cumplan con los parámetros de límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce establecidos

en esta Norma, deberán ser tratados adecuadamente, sea cual fuere su origen: público o privado. Los sistemas de tratamiento deben contar con un plan de contingencias frente a cualquier situación que afecte su eficiencia.

5. Metodología

5.1. Área de estudio

La Empresa Pública de Rastro Catamayo es una organización dedicada al procesamiento de animales de sacrificio tales como bovinos, porcinos y caprinos, y de la distribución, transporte y comercialización de carne. Ubicada en el cantón Catamayo, sector Buenos Aires a 800 m de la Vía Padre Eliseo Arias Carrión, al sur del país, en la provincia de Loja (GAD Catamayo, 2019).

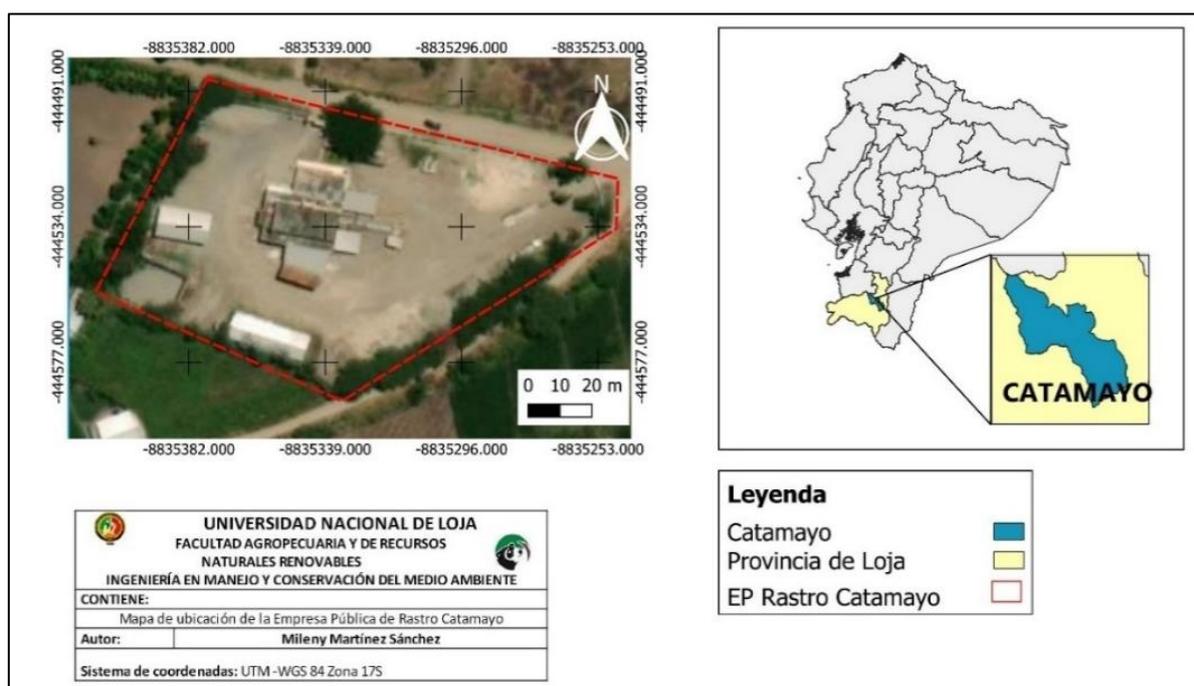


Figura 1. Mapa de ubicación de la Empresa Pública de Rastro Catamayo.

La Empresa Pública de Rastro Catamayo enfrenta una deficiencia en el manejo de sus aguas residuales. El sistema de drenaje de la empresa es deficiente, con rejillas deterioradas que permiten el paso de residuos sólidos. Además, existe una piscina de oxidación limitada entre el punto de sedimentación y el punto de descarga de los efluentes.

En el marco de una investigación experimental, se estudiaron dos factores importantes del proceso Fenton: el sulfato ferroso y el peróxido de hidrógeno, y se consideraron dos variables de respuesta, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el pH.

Se realizaron trabajos de campo para obtener muestras de los vertidos de la Empresa Pública de Rastro Catamayo. Se recolectaron volúmenes de 5 L por muestra en dos puntos, inicial (pozo de sedimentación, antes de la piscina de oxidación) y en el punto de descarga (pozo de descarga) de la piscina de oxidación de manera aleatoria, homogeneizada y representativa. Las reacciones del proceso Fenton se llevaron a cabo con las muestras tomadas en el punto de descarga de la piscina de oxidación. Finalmente, las muestras se llevaron al laboratorio para su caracterización fisicoquímica.

Después de aplicar el proceso Fenton, se realizaron mediciones para evaluar la degradabilidad de las aguas residuales utilizando las variables de respuesta DQO y pH en diferentes concentraciones de los reactivos Fenton. Posteriormente, se seleccionaron únicamente las muestras con un porcentaje de remoción de DQO significativo y se procedió a caracterizarlas fisicoquímicamente para evaluar la eficiencia de remoción de DQO de los procesos Fenton correspondientes.

5.2. Caracterización de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas en la Empresa Pública de Rastro Catamayo.

Para la determinación de las cuantificaciones fisicoquímicas de las aguas residuales, se concibieron en dos tipos de escenarios *in situ* y *ex situ*:

5.2.1. Escenario 1. In situ

– Obtención del agua residual

En el proceso de caracterización de las aguas residuales, se seleccionaron dos puntos (Figura 2) de muestreo clave: el pozo de sedimentación y el pozo de descarga (Anexo 1). Estos puntos representan dos etapas importantes en el flujo del efluente.

El pozo de sedimentación es el lugar donde el efluente ingresa después de pasar por el sistema de drenaje y antes de llegar a la piscina de oxidación. Este pozo tiene como objetivo permitir que los sólidos suspendidos se asienten y se separen del agua antes de continuar con el proceso de tratamiento.

Por otro lado, el pozo de descarga es el lugar donde el agua residual llega después de pasar por la piscina de oxidación. La piscina de oxidación es una etapa del tratamiento diseñada para

reducir la carga orgánica y los contaminantes presentes en el agua residual. Una vez que el agua ha pasado por este proceso, se vierte al río Guayabal a través del pozo de descarga. Las muestras tomadas en este punto permiten evaluar la calidad del agua después de haber pasado por el tratamiento de la piscina de oxidación y determinar si cumple con los estándares ambientales establecidos.



Figura 2. Puntos de muestreo

Para la recolección de las muestras, se siguieron los siguientes procedimientos. Se utilizó un recipiente de plástico con capacidad de 5 litros, una cuerda y una jarra plástica de 1 litro. Antes de su uso, se esterilizó los envases de polietileno para el transporte y almacenamiento de las muestras. Cada envase de 5 litros fue etiquetado con información relevante como la fecha, hora, lugar y punto de muestreo correspondiente.

Se realizaron mediciones de pH, temperatura y conductividad utilizando un equipo HANNA HI9813-6. Previamente, se calibró el electrodo del equipo con disoluciones patrón de conductividad y pH conocidos.

Para garantizar la integridad de las muestras durante su transporte, se colocaron cuidadosamente en una hielera portátil. Se prestó especial atención para evitar derrames y se procuró mantener las condiciones de temperatura y oscuridad.

Posteriormente, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Bromatología y al Laboratorio Ambiental de la Universidad Nacional de Loja, para realizar los análisis de los diferentes parámetros, para el parámetro dureza se realizó en los laboratorios de la Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja (Anexo 5).

5.2.2. Escenario 2. Ex situ

– Caracterización de los parámetros fisicoquímicos en laboratorio

Para la caracterización de las aguas residuales, se empleó el método analítico que combina análisis cualitativos y cuantitativos. Los análisis cualitativos permiten obtener información sobre las características físicas del agua residual, mientras que los análisis cuantitativos se utilizan para determinar de manera precisa la composición química de dicha agua.

Una vez que se recolectaron y acondicionaron las muestras de agua residual, se llevaron a cabo los análisis en diferentes laboratorios especializados. Estos incluyeron el Laboratorio de Suelos, Aguas y Bromatología, el Laboratorio Ambiental de la Universidad Nacional de Loja y el laboratorio de la Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja. En cada uno de estos laboratorios, se siguieron los métodos estandarizados correspondientes a los equipos utilizados.

Cada parámetro se determinó utilizando las técnicas y procedimientos adecuados según los estándares establecidos. Se analizaron los siguientes parámetros fisicoquímicos:

– Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

Preparación de la muestra: Se tomó una muestra representativa de agua y se preservó adecuadamente para evitar cambios en las condiciones de la muestra antes del análisis. La muestra se mantuvo a una temperatura controlada y se almacenó en recipientes apropiados para su posterior procesamiento.

Preparación de los frascos de análisis: Se llenaron los frascos de análisis con la muestra diluida. También se preparó un frasco de control utilizando una solución patrón de DBO₅ para fines de verificación.

Adición de la solución de nutriente: Se agregó una solución de nutrientes que contenía los elementos esenciales para el crecimiento microbiano, como nitrógeno y fósforo, a cada frasco de análisis.

Incubación: Los frascos de análisis se colocaron en una incubadora a una temperatura constante de 20 °C durante un período de 5 días. Durante este tiempo, los microorganismos presentes en la muestra degradaron la materia orgánica consumiendo el oxígeno disuelto, lo que resultó en una disminución de la concentración de oxígeno en el frasco.

– Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Pre calentamiento del termoreactor: Se ajustó la temperatura del termoreactor a 150 °C para garantizar las condiciones adecuadas de digestión de la muestra.

Preparación de los tubos de digestión: Se extrajo la tapa del tubo de digestión de DQO correspondiente al rango de concentración requerido. Por ejemplo, se agregaron 2,00 ml de muestra al tubo si se encontraba en el rango de 20 a 1500 mg/L, o se añadieron 0,2 ml de muestra si estaba en el rango de 20 a 15000 mg/L. A continuación, se agitó el tubo para homogeneizar la muestra.

Digestión en el termoreactor: Los tubos de digestión preparados se colocaron en el termoreactor pre calentado y se mantuvieron a una temperatura de 150 °C durante un período de tiempo específico, que generalmente fue de 2 horas. Durante este proceso, los compuestos orgánicos presentes en la muestra se oxidaron.

Enfriamiento de los tubos: Una vez finalizada la digestión, los tubos se enfriaron a 120 °C. Durante este enfriamiento, se invirtieron varias veces para garantizar una mezcla homogénea de la muestra.

Lectura en el espectrofotómetro UV-VIS: Después de que los tubos de muestra alcanzaron la temperatura ambiente, se realizaron las lecturas correspondientes en un espectrofotómetro UV-VIS. Este instrumento permite medir la absorbancia de la muestra a una longitud de onda específica y determinar la concentración de DQO presente.

– Alcalinidad total

La determinación de la alcalinidad total se llevó a cabo utilizando el método potenciométrico, el cual es recomendado especialmente para aguas turbias y coloreadas. A continuación, se describe el procedimiento detallado:

1. *Preparación de la muestra:* Se tomó una muestra de 100 ml del agua que se deseaba analizar. Esta muestra se colocó en un recipiente adecuado para el análisis.
2. *Medición del pH inicial:* Se introdujo el electrodo del pH-metro en la muestra y se registró el valor inicial del pH.
3. *Adición de ácido sulfúrico:* Utilizando una bureta, se añadió ácido sulfúrico 0.02 N a la muestra mientras se agitaba constantemente. El objetivo era reducir el pH de la muestra hasta alcanzar un valor de 8,2.

4. *Registro del volumen de ácido consumido:* Durante la adición de ácido sulfúrico, se registró el volumen de ácido consumido en función del cambio de pH. La adición de ácido se detuvo cuando el pH de la muestra descendió aproximadamente a 4,5.

5. *Cálculo de la alcalinidad:* La alcalinidad total fue expresada en miligramos por litro (mg/L) de carbonato de calcio (CaCO₃). El volumen de ácido sulfúrico consumido en el paso anterior se utilizó para determinar la alcalinidad de la muestra.

$$\text{Alcalinidad } \frac{\text{mg}}{\text{l}}, \text{ como CaCO}_3 = \frac{V \times N \text{ ácido} \times \text{meq CaCO}_3 \times 10^6}{\text{Volumen de muestra}} \quad (3)$$

En donde:

V: Volumen del ácido empleado

N ácido: Normalidad del ácido empleado

meq CaCO₃: Miliequivalente del CaCO₃ = 0,05 g

– pH

Calibración del electrodo: Antes de realizar las mediciones, se llevó a cabo la calibración del electrodo del pH-metro. Para ello, se utilizan disoluciones patrón de pH conocido, también llamados tampones. Estas soluciones tienen valores de pH preestablecidos y se utilizan como referencia para calibrar el electrodo. El electrodo se sumerge en cada una de las soluciones patrón y se ajusta el pH-metro según los valores indicados (Anexo 2).

Medición in situ: Una vez calibrado el electrodo, se sumerge en la muestra y se espera a que la lectura del pH-metro se estabilice. Una vez que la lectura se estabilizó, se registró el valor del pH.

Medición ex situ: Además de la medición *in situ*, también se realizó una medición del pH en el laboratorio. Para ello, se extrajo una muestra de la muestra original y se llevó al laboratorio. El electrodo del pH-metro se sumergió en la muestra en el laboratorio y se esperó a que la lectura se estabilizara. Una vez estabilizada, se registró el valor del pH.

– Conductividad

Para llevar a cabo el análisis de conductividad, se diluyó la muestra original a un volumen de 100 ml. Esto se hizo para asegurarse de que la muestra estuviera dentro del rango de medición

del equipo conductímetro. La dilución permitió obtener una muestra que se ajustara a la escala del equipo y facilitara la introducción de la célula de conductividad.

Una vez preparada la muestra diluida, se procedió a introducir la célula de conductividad en la muestra. La célula de conductividad es un componente del equipo conductímetro que permite medir la conductividad eléctrica de la muestra. Al sumergir la célula en la muestra, se establece una conexión eléctrica que permite la medición.

Después de sumergir la célula de conductividad en la muestra, se esperó unos segundos a que la lectura se estabilizara. Durante este tiempo, el equipo conductímetro registró y analizó la conductividad eléctrica de la muestra. Una vez que la lectura se estabilizó, se visualizó el resultado en la pantalla del equipo conductímetro. Este resultado representa la conductividad eléctrica de la muestra ($\mu\text{s/cm}$), que puede estar relacionada con la concentración de iones disueltos en el agua.

– **Sólidos Totales**

Para llevar a cabo el análisis de sólidos totales (Anexo 3), se siguieron los siguientes pasos:

Preparación de la muestra de sólidos totales:

- Se colocó una cápsula en un horno precalentado a 105 °C durante 15 minutos para eliminar cualquier humedad residual.
- Posteriormente, la cápsula se transfirió a un desecador para que se enfriara a temperatura ambiente.
- Se registró el peso inicial de la cápsula utilizando una balanza precisa y calibrada.
- Se agregaron 100 ml de muestra al interior de la cápsula.
- La cápsula con la muestra se colocó nuevamente en el horno a 105 °C y se dejó secar durante 24 horas.
- Después de este período, la cápsula se retiró del horno y se colocó nuevamente en el desecador para que se enfriara a temperatura ambiente.
- Finalmente, se registró el peso de la cápsula y su contenido como peso de los sólidos que quedaron como residuo después de evaporar la muestra de agua a 105 °C.

- *Preparación de la muestra de sólidos suspendidos:*

- Se utilizó un filtro de membrana previamente pesado y se colocó en un sistema de filtración.
- Se añadieron 100 ml de la muestra de agua al sistema de filtración.
- Para asegurar que todos los sólidos se transfieran al filtro, se utilizó agua destilada para lavar las paredes del sistema de filtración.
- Una vez que la muestra se filtró por completo, el filtro de membrana con los sólidos suspendidos se retiró del sistema de filtración.
- El filtro de membrana se colocó en el horno a 105 °C y se dejó secar durante 24 horas.
- Después de este período, el filtro se colocó en el desecador para que se enfriara a temperatura ambiente.
- Se registró el peso final del filtro de membrana con los sólidos suspendidos como peso de los sólidos.

Es importante asegurarse de que la cápsula y el filtro de membrana estén limpios y secos antes de su uso, ya que cualquier contaminación o humedad adicional podría afectar los resultados. Además, es fundamental utilizar una balanza precisa y calibrada para obtener mediciones precisas de los pesos iniciales y finales.

Al realizar un balance de masa entre el peso inicial y el peso final de la cápsula en el caso de los sólidos totales, y entre el peso inicial y el peso final del filtro de membrana en el caso de los sólidos suspendidos, se pudo determinar la cantidad de sólidos presentes en la muestra.

– **Turbidez**

El análisis de turbidez se lleva a cabo utilizando un turbidímetro, y se siguen los siguientes pasos:

Preparación de la muestra:

- Se toma una muestra del agua a analizar y se asegura de que esté perfectamente limpia, sin partículas o sedimentos visibles.
- Es importante que la muestra no contenga burbujas de aire, ya que esto podría afectar la precisión de la medición de turbidez.
- La muestra se vierte en el tubo del turbidímetro, llenándolo hasta la marca indicada.

Medición de la turbidez:

- Se coloca el tubo con la muestra en la celda del turbidímetro, asegurándose de que encaje correctamente.
- Se registró el valor más alto de turbidez mostrado en la pantalla del turbidímetro, expresado en Unidades de Turbidez (NTU).

3.2.3 Cálculo del índice de biodegradabilidad (IB)

Utilizando los datos obtenidos de los análisis de DQO y DBO de caracterización inicial, se obtuvieron mediante la siguiente fórmula:

$$IB = \frac{DBO_5}{DQO} \quad (4)$$

En donde:

DBO₅: Demanda biológica de oxígeno.

DQO: Demanda química de oxígeno.

5.3. Determinación de la dosis óptima del reactivo fenton para la degradación de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo con dos variables respuestas DQO y pH.

Para determinar la dosis óptima, se empleó el diseño de superficie de respuesta que es una metodología utilizada para optimizar los procesos y determinar la dosis óptima de ciertos factores o variables que influyen en el resultado deseado. En este caso, los factores de importancia son el sulfato ferroso y el peróxido de hidrógeno, y se utilizó el programa Design Expert 13 para llevar a cabo el análisis.

Para evaluar el efecto de la combinación de estas dos variables independientes (sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno), se utilizaron códigos o valores codificados como Factor A y Factor B, respectivamente. Estos códigos permiten simplificar los cálculos y el análisis

La variable de respuesta en este estudio fue la remoción de contaminantes, medida mediante el parámetro DQO (Demanda Química de Oxígeno) y el potencial de hidrógeno (pH).

Tabla 5. Diseño superficie respuesta de la dosis óptima del reactivo fenton

N° Exp	FACTOR A: FeSO ₄ (g)	FACTOR B: H ₂ O ₂ (ml)
--------	------------------------------------	---

1	3	5
2	3	2
3	2,25	3,5
4	1,18	3,5
5	3,31	3,5
6	2,25	1,37
7	1,5	5
8	1,5	2
9	2,25	5,62

5.3.1. *Proceso Fenton*

Para llevar a cabo el experimento, se tomaron 12 muestras de agua residual de 500 ml cada una. Estas muestras se colocaron en vasos de precipitación de un litro. Para cada experimento se utilizaron 9 muestras, mientras que 3 muestras no recibieron ningún reactivo.

Antes de agregar los reactivos, las muestras se regularon a pH de 3 con ácido sulfúrico. La acidificación a pH 3 se basa en el estudio de Rivas et al., (2003), quienes encontraron que un pH por debajo de 3 desacelera la reacción, lo que permite una mayor estabilidad del ion férrico y evita la descomposición del peróxido de hidrógeno. Por otro lado, a valores de pH superiores, el hidróxido férrico puede precipitar y afectar el proceso.

Después de ajustar el pH, se agregó el reactivo Fenton a cada muestra experimental (Anexo 4). Primero se añadió sulfato ferroso y después de 3 minutos se añadió peróxido de hidrógeno al 30% V/V. Durante todo el proceso, las muestras se agitaron durante 90 minutos a temperatura ambiente.

5.3.2. *Degradación de contaminantes en el agua residual*

Una vez transcurrido el tiempo de agitación en el experimento, se procede a medir el pH de cada muestra. Posteriormente, se realiza la neutralización de cada unidad experimental ajustando el pH a 7 utilizando hidróxido de sodio. Luego, se debe esperar un tiempo suficiente para permitir que los sólidos sedimenten en las muestras.

Una vez sedimentados los sólidos, se preparan los viales para el análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los viales se identifican de acuerdo al experimento realizado. Se agitan los viales y se agrega una cantidad específica de muestra, dependiendo del rango de concentración esperado. Generalmente, se agregan 2,00 ml de muestra para un rango de 20 a

1500 mg/L de DQO, o 0,2 ml para un rango de 20 a 15000 mg/L de DQO. Luego, se agitan nuevamente los viales para homogeneizar la muestra.

Una vez preparados los viales, se colocan en un termo-reactor durante un tiempo de 2 horas a una temperatura de 150 °C. El termo-reactor proporciona las condiciones necesarias para que se produzcan las reacciones químicas pertinentes en las muestras.

Después de las 2 horas de tratamiento térmico, los viales se retiran del termo-reactor y se dejan enfriar. Una vez enfriados, se procede a realizar las lecturas correspondientes en el espectrofotómetro UV-VIS.

5.4. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales obtenidas después del proceso fenton

Para seleccionar las muestras para la caracterización final, se tuvo en cuenta aquellas muestras experimentales que presentaron porcentajes de remoción de DQO más significativos. Estos porcentajes de remoción de DQO se calculan utilizando el siguiente procedimiento:

$$\%Remoción\ DQO = \frac{DQO\ inicial - DQO\ remanente}{DQO\ inicial} \quad (5)$$

- DQO inicial (mg/L): Se toma el valor inicial de DQO antes de aplicar el proceso Fenton.
- DQO remanente (mg/L): Se mide el valor de DQO después de aplicar el proceso Fenton.

El resultado del cálculo del porcentaje de remoción de DQO proporciona una medida de la eficiencia del tratamiento para reducir la carga de contaminantes en el agua residual. Se seleccionaron aquellas muestras que presentaron los porcentajes de remoción más altos, ya que indican un mayor nivel de eficiencia en la eliminación de los contaminantes. Estas muestras son utilizadas para llevar a cabo la caracterización y análisis posteriores.

5.5. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el software Design Expert 13 mediante un diseño de superficie de respuesta. Este tipo de diseño permite explorar y optimizar la relación entre las variables de interés y la respuesta deseada.

El software Design Expert 13 ofrece herramientas específicas para analizar los datos generados a partir del diseño de superficie de respuesta. Estas herramientas permiten realizar análisis de

regresión, ajustar modelos matemáticos, realizar pruebas de significancia estadística y visualizar los resultados de manera gráfica.

A continuación, se describen los pasos generales para llevar a cabo el análisis estadístico utilizando Design Expert 13:

- *Importar los datos:* Se ingresaron los datos experimentales en el software Design Expert 13. Esto incluye las variables independientes (como el sulfato ferroso y el peróxido de hidrógeno) y la variable de respuesta (como la remoción de contaminantes medida como DQO y el pH).
- *Ajuste del modelo:* Design Expert 13 permite ajustar modelos matemáticos a partir de los datos experimentales. Se exploran diferentes modelos, como modelos lineales, cuadráticos, cúbicos o modelos de interacción, para determinar el que mejor se ajuste a los datos.
- *Análisis de significancia:* Una vez ajustado el modelo, se realizan pruebas de significancia estadística para evaluar la importancia de las variables independientes en relación con la variable de respuesta. Esto ayuda a identificar qué variables tienen un impacto significativo en el proceso y cuáles pueden ser descartadas.
- *Optimización:* Una vez identificadas las variables significativas, Design Expert 13 permite realizar análisis de optimización para encontrar la dosis óptima de los factores o variables independientes. El software utiliza algoritmos para encontrar la combinación de variables que maximiza o minimiza la variable de respuesta, según los objetivos establecidos.
- *Visualización de resultados:* Design Expert 13 proporciona diversas herramientas gráficas para visualizar los resultados del análisis estadístico. Esto incluye gráficos de superficie de respuesta, gráficos de contorno y gráficos de respuesta deseados. Estas representaciones visuales facilitan la interpretación de los datos y ayudan en la toma de decisiones.

En resumen, el software Design Expert 13 permitió realizar un análisis estadístico completo utilizando el diseño de superficie de respuesta. A través de esta herramienta, se ajustaron modelos matemáticos, se realizaron pruebas de significancia, se optimizaron las variables de interés y se visualizaron los resultados de manera gráfica. Lo cual ayudó a comprender la

relación entre las variables y la respuesta deseada, y a tomar decisiones informadas para optimizar el proceso.

6. Resultados

6.1. Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas en la Empresa Pública de Rastro Catamayo.

Los parámetros que se mencionan a continuación se refieren a los resultados obtenidos de dos puntos de muestreo realizados en la Empresa Pública de Rastro Catamayo. Estas muestras fueron posteriormente analizadas en el Laboratorio Ambiental de la Universidad Nacional de Loja para determinar sus características fisicoquímicas, mientras que para el parámetro de dureza se utilizaron los servicios del Laboratorio de la Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja (Anexo 5).

En la tabla 6 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales provenientes de la Empresa Pública de Rastro Catamayo. Estos parámetros son indicadores de diferentes características del agua y permiten evaluar su calidad y composición. Uno de los parámetros mencionados es el índice de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) del punto de descarga (punto 2), el cual tiene un valor de 0,40 que indica que las aguas residuales son consideradas como no biodegradables, lo que implica que su contenido orgánico no es fácilmente descompuesto por los microorganismos presentes en los procesos de tratamiento.

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo

Parámetros	Unidad	Muestras	
		Punto 1(Pozo de sedimentación)	Punto 2 (Pozo de descarga)
pH	-	6,5	6,5
Temperatura	°C	26,2	23,6
Conductividad Eléctrica	µs/cm	895	916
Turbidez	NTU	82,5	140
Dureza	mg/L	772,5	721
Alcalinidad	mg/L	3000	4000
DQO	mg/L	1600	2220
DBO ₅	mg/L	886	900
Sólidos Totales	mg/L	2633	2359

6.2. Determinar el efecto de la combinación de los niveles de las variables de estudio (dosificación del reactivo Fenton, FeSO₄, H₂O₂) en la degradación del efluente líquido de la Empresa Pública de Rastro Catamayo utilizando como variable respuesta la Demanda Química De Oxígeno y pH.

En la tabla 7 se encuentran los detalles de los experimentos llevados a cabo utilizando el diseño experimental de superficie respuesta para dos factores: FeSO₄ (factor A) y H₂O₂ (factor B). Estos experimentos se realizaron con el objetivo de determinar las condiciones óptimas del proceso Fenton para tratar las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo. Los datos experimentales obtenidos se presentan en la Tabla 7, donde se registran los valores de los factores A y B, así como la variable respuesta, que en este caso es la Demanda Química de Oxígeno (DQO) medida en mg/L.

Para analizar los resultados y determinar las condiciones óptimas, se utilizó el software Design Expert 13. Se seleccionó y ajustó el diseño experimental utilizando los datos de la Tabla 6. En esta tabla se muestran las respuestas obtenidas para la variable Demanda Química de Oxígeno (DQO) en función de las diferentes condiciones del reactivo Fenton.

Los resultados obtenidos fueron modelados aplicando modelos lineales (Anexo 6; Anexo 9), modelos con 2 factores independientes (Anexo 7; Anexo 10) y modelos cuadráticos (Anexo 8; Anexo 11) para analizar los datos. Sin embargo, ninguno de estos modelos muestra efectos significativos en la variación de los niveles de las variables dentro de los intervalos analizados. No obstante, se observa una reducción importante de DQO en los tratamientos M1, M2 y M3 según se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Variable respuesta Demanda química de oxígeno

N° Exp	FACTOR A: FeSO₄ (g)	FACTOR B: H₂O₂ (ml)	DQO mg/L
M1	3	5	120
M2	3	2	173
M3	2,25	3,5	72
M4	1,18	3,5	202
M5	3,31	3,5	172
M6	2,25	1,37	158
M7	1,5	5	187
M8	1,5	2	214
M9	2,25	5,62	245

La Figura 3 muestra una representación bidimensional de la variable respuesta DQO con el modelo cuadrático (6), donde se muestran los valores de combinación de FeSO_4 y H_2O_2 que resultan en un mayor porcentaje de remoción de DQO. En la figura se puede observar una elipse central que delimita las dosis más óptimas del proceso Fenton, las cuales se encuentran dentro de esta elipse y se detallan en la tabla 7. Estos valores representan las dosis ideales de FeSO_4 y H_2O_2 para lograr una mayor remoción de DQO en el tratamiento de las aguas residuales.

$$DQO = 72 - 18,80A + 5,38B - 6,50AB + 52,31A^2 + 59,56B^2 \quad (6)$$

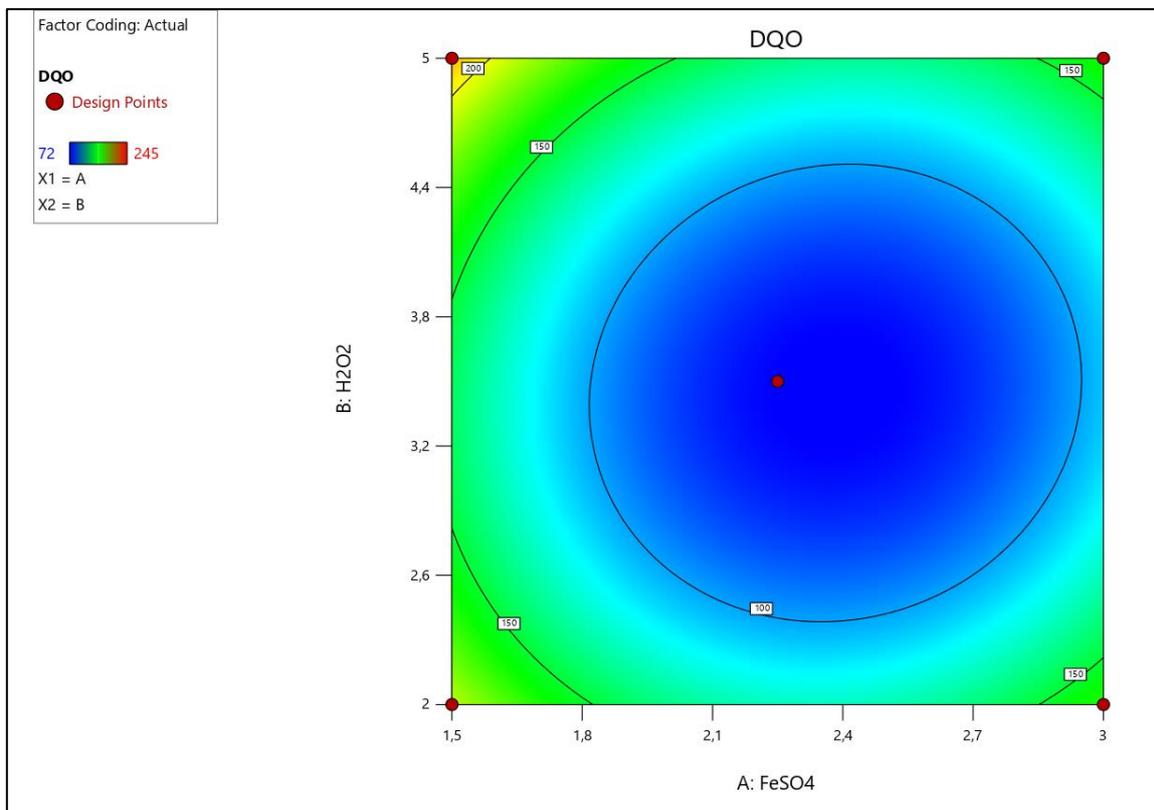


Figura 3. Superficie respuesta de la variable DQO

Como segunda variable respuesta se consideró el pH, pero debido a la modificaciones de la acidez demandadas por el proceso Fenton y los posteriores análisis de DQO esta fue descartada, dado que estos procedimientos no permitían cuantificar su evolución (tabla 8). En el proceso Fenton, es necesario acidificar el medio a un pH de 3 para que ocurra la reacción deseada. Por otro lado, para realizar el análisis químico de DQO, se requiere neutralizar la muestra a un pH de 7.

Por lo tanto, en el análisis de los resultados y en la determinación de las condiciones óptimas del proceso Fenton, se debe tener en cuenta que el pH no puede ser considerado como una variable respuesta, ya que su valor se modifica durante el proceso debido a las necesidades específicas de acidificación y neutralización.

Tabla 8. Variable respuesta pH (acidificado y neutralizado)

N° Exp	FACTOR A:	FACTOR B:	pH	
	FeSO ₄ (g)	H ₂ O ₂ (ml)	acidificado	neutralizado
M1	3	5	2,5	7,0
M2	3	2	2,5	7,1
M3	2,25	3,5	2,6	7,1
M4	1,18	3,5	2,8	7,1
M5	3,31	3,5	2,9	7,2
M6	2,25	1,37	2,6	7,1
M7	1,5	5	2,9	7,2
M8	1,5	2	2,6	7,1
M9	2,25	5,62	2,7	7,1

6.3. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales obtenidas después de los procesos de oxidación Fenton.

En la tabla 9 muestra que los 9 experimentos alcanzaron remociones de DQO por encima del 80%, donde se eligieron los 3 experimentos (M1, M2, M3) con porcentajes de remoción de DQO más importantes que fueron del 94.6%, 92.2% y 96.7%.

Tabla 9. Porcentaje de remoción de DQO para la dosis óptima del proceso Fenton

N° Exp	FACTOR A:	FACTOR B:	DQO	% De
	FeSO ₄ (g)	H ₂ O ₂ (ml)	mg/L	remoción de
				DQO
M1	3	5	120	94,6
M2	3	2	173	92,2
M3	2,25	3,5	72	96,7
M4	1,18	3,5	202	85,3
M5	3,31	3,5	172	87,5
M6	2,25	1,37	158	88,5
M7	1,5	5	187	89,1
M8	1,5	2	214	87,5
M9	2,25	5,62	245	85,7

Se realizó un análisis adicional de la composición química de las aguas residuales de tres tratamientos (M1, M2, M3) que mostraron un porcentaje mayor de remoción, así como de un blanco de referencia (MB). Los resultados de este análisis se presentan en la tabla 10, donde se observa una mejora en los parámetros analizados en las muestras de aguas residuales tratadas,

especialmente en los parámetros de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).

Estos resultados indican que los tratamientos han logrado reducir la concentración de sustancias químicas y materia orgánica en las aguas residuales. En particular, la DQO y la DBO han experimentado una disminución importante lo que indica una mejora en la calidad del agua tratada. Además, el índice de biodegradabilidad (IB), que se calcula a partir de la relación DBO_5/DQO , ha alcanzado un valor de 0,5.

Un valor de IB igual a 0,5 se considera como agua residual parcialmente biodegradable. Esto implica que una proporción significativa de la materia orgánica presente en el agua residual ha sido degradada durante el tratamiento. Esta mejora en el índice de biodegradabilidad es un indicador positivo, ya que sugiere que el agua residual tratada es más susceptible de ser tratada posteriormente por procesos biológicos y, en última instancia, de ser devuelta al medio ambiente con menor impacto negativo.

Tabla 10. Caracterización fisicoquímica después de la aplicación del proceso Fenton optimizado de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo

Parámetros	Unidad	Muestras			
		M1	M 2	M3	MB
pH	-	7,1	7,2	7,1	7,1
Temperatura	°C	18,3	19,1	18,2	18,2
Conductividad Eléctrica	µs/cm	46,7	43,8	38,4	1337
Turbidez	NTU	6,2	56,3	2,32	197
Dureza	mg/L	463,5	875,5	1133	927
Alcalinidad	mg/L	2000	1000	1000	3000
DQO	mg/L	120	173	72	1410
DBO_5	mg/L	68,6	90,1	38,9	569,8
Sólidos Totales	mg/L	995,55	1081	1090	2229
IB (DBO_5/DQO)	-	0,57	0,52	0,54	0,40

7. Discusión

La Empresa Pública de Rastro Catamayo enfrenta un desafío con respecto a las aguas residuales que genera, ya que presentan niveles elevados de DQO y DBO, lo que las hace no apropiadas para su descarga directa en cuerpos de agua. Los parámetros característicos de las aguas residuales superan los límites permitidos establecidos en el TULSMA. El índice de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) de 0,4 que de acuerdo con García et al. (2006), un valor de

0,4 para el índice de biodegradabilidad indica que las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo son consideradas no biodegradables, esto implica que una proporción significativa de la materia orgánica presente en estas aguas residuales no puede ser descompuesta eficientemente por los microorganismos, lo cual se debe a que en la Empresa Pública de Rastro Catamayo enfrenta problemas en su sistema de tratamiento de aguas residuales. Tanto la piscina de oxidación como el sistema de rejillas presentan deficiencias notables, lo que provoca el aumento de los índices DQO, DBO, turbidez, alcalinidad, debido presumiblemente al lavado de los sólidos sedimentados en la piscina de oxidación, que conduce a una descarga más contaminada comparada con su estado inicial. Además, se ha observado la presencia de tejidos, grasas y sólidos indeseables en el agua residual del punto de descarga de la piscina de oxidación. Estas condiciones son indicativas de una falta de mantenimiento y una gestión inadecuada de los sistemas de tratamiento en la empresa, lo que compromete la calidad del agua y puede tener consecuencias negativas para el medio ambiente circundante. Es fundamental que se tomen medidas correctivas para mejorar tanto la piscina de oxidación como el sistema de rejillas, con el fin de garantizar un tratamiento adecuado de las aguas residuales y prevenir la liberación de contaminantes no deseados al medio ambiente. Por lo tanto, en base a los resultados y la caracterización inicial de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo, es evidente que es necesario realizar un tratamiento previo antes de su descarga.

En cuanto a los 9 experimentos realizados, se puede considerar que han sido exitosos, ya que muestran porcentajes de remoción de DQO superiores al 80%. Sin embargo, es importante tener en cuenta la concentración de los reactivos para lograr un porcentaje óptimo de remoción de DQO. Como menciona Ríos (2017), es necesario evitar una dosificación excesiva de catalizador, ya que esto puede perjudicar la reacción de oxidación. Las sales de hierro presentes pueden descomponer el peróxido de hidrógeno y consumir radicales hidroxilos, lo cual afecta la eficiencia del proceso. Por lo tanto, la naturaleza del contaminante es un factor crucial para determinar la eficiencia del proceso de oxidación (Bautista et al., 2007).

Para el proceso de tratamiento de aguas residuales utilizando el reactivo Fenton, se ha encontrado que la reactividad máxima ocurre en un rango de pH de 3 a 5 al igual que en el estudio de Rivas et al. (2003). Si se altera el pH de la solución, podría haber efectos negativos en la formación de hidróxido férrico y en la efectividad del peróxido de hidrógeno, lo que reduciría la eficacia del proceso residuales (M. Becerra & Cadena, 2016; Medina, 2022;

Segovia, 2020). Sin embargo, se ha investigado que utilizando agentes quelantes, se puede trabajar con un pH neutro y reducir el costo del tratamiento de aguas (Isch, 2016).

En esta investigación, se descartó el pH como una variable de respuesta, ya que se observó que una alcalinidad por encima de 5 disminuye la reactividad del reactivo de Fenton. Esto representa una desventaja significativa, considerando que la mayoría de las aguas residuales de camales tienen un pH de 6 a 9 (Borja et al., 2019). Por lo tanto, la muestra del efluente se acidificó a pH 3 utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4). Si bien el uso de ácidos inorgánicos permite una acidificación con cantidades pequeñas, también puede formar complejos con el hierro, lo que limita la eficiencia del reactivo de Fenton (Delgado, 2018). Se debe tener en cuenta la filtración después del proceso Fenton para mejorar el porcentaje de remoción de los parámetros evaluados, como se ha mencionado en investigaciones anteriores (M. Becerra & Cadena, 2016).

La adecuación del modelo de optimización muestra que ni los modelos lineales, modelos con dos factores independientes, ni cuadráticos pueden explicar adecuadamente los datos obtenidos, esto puede ser debido a que la muestra de datos utilizada no sea lo suficientemente representativa para reflejar las variaciones significativas en los niveles de las variables estudiadas. Por otra parte, Di Rienzo et al. (2005), explica que la falta de significancia puede ser atribuida, también, a la presencia de variabilidad aleatoria en los datos, lo cual dificulta detectar efectos significativos. Es importante tener en cuenta que los modelos estadísticos son una aproximación para comprender y predecir el comportamiento de las variables, pero no pueden abarcar todos los factores y complejidades del sistema estudiado. Por lo tanto, es necesario considerar otros enfoques o realizar análisis más detallados para obtener una comprensión completa de los fenómenos observados.

Después de la aplicación del proceso Fenton, se obtuvieron resultados satisfactorios en la mayoría de los parámetros analizados en las muestras de aguas residuales tratadas. Sin embargo, se observaron valores elevados de dureza en las muestras M2 y M3, por encima de la caracterización inicial del punto 2, lo que indica un agua residual muy dura.

El aumento de la dureza en las aguas residuales tratadas mediante el proceso Fenton puede estar influenciado por varios factores como las etapas de acidificación y neutralización de las muestras en los protocolos experimentales. Durante el proceso Fenton, se realiza una

acidificación inicial para ajustar el pH del agua residual a un rango óptimo para la oxidación. Esto se ha realizado debido a que se ha observado que las eficiencias de degradación son altas en un rango de pH de 3 a 4, mientras que los valores de pH neutro disminuyen la eficiencia debido a la precipitación de Fe (III) y la generación menos efectiva de radicales hidroxilo (Rezaei & Vione, 2018). Posteriormente, se neutraliza el pH para restablecerlo a un valor cercano a la neutralidad. Durante este proceso de acidificación y neutralización, pueden ocurrir reacciones químicas que resulten en la formación de sales disueltas en el agua, lo que contribuye al aumento de la dureza. Por otra parte, de acuerdo con Noé (2019), la acidificación inicial es necesaria en el proceso Fenton para ajustar el pH del agua residual, ya que crea un ambiente ácido que activa las reacciones químicas necesarias. Según Landivar (2014), la neutralización posterior en el proceso Fenton es crucial para restablecer el pH del agua residual a un valor cercano a la neutralidad.

Bermeo et al. (2017), menciona que, durante el proceso de acidificación y neutralización en el tratamiento de aguas residuales, pueden ocurrir reacciones químicas que conducen a la formación de sales disueltas en el agua, lo que contribuye al aumento de la dureza del agua tratada. El alto de la dureza de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo, puede ser debida a las sales disueltas como carbonatos, bicarbonatos y sulfatos por el uso de agua entubada sin tratamiento de potabilización y a los desechos de faenamiento. Durante el proceso Fenton, algunas de estas sales pueden precipitar y formar partículas sólidas o sedimentos, lo que aumenta la dureza del agua.

El proceso Fenton también puede dar lugar a la formación de compuestos insolubles de calcio y magnesio, como hidróxidos o carbonatos, debido a los cambios en las condiciones químicas del agua, especialmente durante la neutralización del pH y, por lo tanto, también, éstos compuestos contribuyen al aumento de la dureza.

Para controlar y mitigar el aumento de la dureza del agua en el proceso Fenton, es esencial implementar estrategias de tratamiento adecuadas. Méndez et al. (2010) mencionan que el uso de la filtración después del proceso Fenton resulta más eficiente en la remoción de contaminantes. Además, Medina et al. (2020) destacan que la filtración posterior al proceso Fenton ayuda a reducir la dureza, ya que su estudio demostró una reducción del 81% en este

parámetro. Sin embargo, el proceso de sedimentación, también se puede considerar como una opción para eliminar la mayoría de sales y sólidos precipitados.

Otro de los parámetros que se siguió para medir la eficiencia del proceso Fenton es el índice de biodegradabilidad. La biodegradabilidad mejoró aproximadamente en un 20%, lo que indica que el agua residual tratada se considera parcialmente biodegradable según García et al. (2006) (ver tabla 3). Esto coincide con los hallazgos de Medina et al. (2020) en su investigación sobre el tratamiento de aguas residuales de canales con el proceso Fenton. Es probable que durante la oxidación se hayan formado compuestos orgánicos con características recalcitrantes, lo que sugiere que un tratamiento biológico posterior puede contribuir a obtener un mayor porcentaje de remoción.

En general, el proceso Fenton demostró ser eficiente en el tratamiento de las aguas residuales de canales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo, ya que la mayoría de los parámetros fisicoquímicos iniciales mejoraron y los valores de DQO y DBO se encontraron dentro de los límites establecidos para la descarga de efluentes en cuerpos de agua dulce.

Además, se observó una mejora en las características visuales del agua tratada mediante el proceso Fenton, como señalan Medina et al. (2020), durante el proceso, se produjo floculación y precipitación de la materia coloidal presente en el agua residual, ya que, puede tener un impacto positivo en la claridad visual del agua tratada, debido a que las partículas coloidales suspendidas son responsables de la turbidez y la apariencia del agua.

El tratamiento mediante el proceso Fenton presenta varias ventajas importantes en comparación con otros procesos, como señala García (2014). En primer lugar, destaca el bajo coste del hierro utilizado como catalizador en la reacción. El hierro es un metal común y relativamente económico, lo que contribuye a reducir los costos asociados al tratamiento. Además, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que es el reactivo principal en el proceso Fenton, es fácil de manejar y se descompone en productos inocuos para el medio ambiente, lo que garantiza una mayor seguridad en su uso.

Otra ventaja del proceso Fenton mencionada por García (2014) es que el proceso puede llevarse a cabo con equipos y tecnologías comunes en la industria del tratamiento de aguas residuales, lo que facilita su implementación y operación.

Sin embargo, Pliego (2012) señala que la aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales industriales tiene limitaciones específicas. Uno de los principales desafíos es

el tratamiento de efluentes con altos contenidos de DQO, ya que se requieren altas cantidades de H_2O_2 , lo que implica un elevado coste operacional. Además, debido a los altos requerimientos de hierro, se generan importantes volúmenes de lodos de $Fe(OH)_3$ en la etapa de neutralización. Esto implica la necesidad de gestionar adecuadamente los lodos generados, lo cual puede representar un desafío adicional tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

Por ello, es importante tener en cuenta las características y el tipo específico de agua residual a tratar para garantizar la eficiencia del proceso de Fenton. Cabe destacar que los resultados de esta investigación son específicos para las condiciones establecidas y que sería necesario realizar pruebas preliminares bajo otras condiciones.

8. Conclusiones

- El punto de descarga de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo reveló características fisicoquímicas que superan ampliamente los límites establecidos por la normativa ecuatoriana (Punto 2: DQO = 2220 mgO₂/L, DBO = 900 mgO₂/L), y su índice de biodegradabilidad de 0,40 indica que se trata de aguas residuales no biodegradables.
- La aplicación del proceso Fenton en las aguas residuales, utilizando la metodología de superficie de respuesta, demostró que las concentraciones óptimas de $FeSO_4$ (2,25 g-3 g) y H_2O_2 (2 ml-5 ml) resultaron en una remoción de DQO superior al 90%. Esto confirma la eficiencia del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de camales.
- Los 9 experimentos realizados fueron considerados óptimos, ya que lograron porcentajes de remoción de DQO superiores al 80%. Específicamente, los experimentos M1, M2 y M3 obtuvieron porcentajes de remoción por encima del 90% (DQO: M1=120 mgO₂/L, M2=173 mgO₂/L, M3=72 mgO₂/L).
- Aunque el pH fue una variable manipulada en este estudio y no se consideró como una variable de respuesta, sin embargo, para futuras investigaciones se puede usar diferentes niveles de pH para evaluar la eficiencia del proceso Fenton en relación con esta variable.
- Se observó una mejora significativa en el índice de biodegradabilidad (IB = 0,5) del agua residual tratada, lo cual indica que las aguas residuales se volvieron

parcialmente biodegradables. Además, se encontró una mejoría en todos los parámetros estudiados, a excepción del parámetro de dureza que aumentó en las muestras M2 y M3. Por lo tanto, se concluye que el uso del proceso Fenton como pretratamiento es viable.

9. Recomendaciones

- Determinar la dosis óptima del proceso Fenton: Es fundamental tener en cuenta que la dosis óptima del proceso Fenton puede variar según las características específicas de cada muestra de agua residual y las condiciones ambientales. Por lo tanto, se sugiere utilizar los valores obtenidos en esta investigación como punto de partida y realizar pruebas preliminares para ajustar la dosis de reactivos en futuras investigaciones.
- Considerar la filtración post-Fenton: Con el fin de obtener mejores porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos, se recomienda implementar la filtración como etapa adicional después del proceso Fenton. La filtración ayudará a eliminar los sólidos suspendidos y cualquier material residual, mejorando así la calidad del agua tratada.
- Implementar etapas de neutralización, floculación y sedimentación: Para aumentar la eficiencia general del tratamiento, se recomienda incluir etapas de neutralización para ajustar el pH, seguido de procesos de floculación y sedimentación. Estas etapas adicionales ayudarán a eliminar los compuestos precipitados y los sólidos finos, mejorando la claridad y calidad del agua tratada.
- Realizar experimentos más detallados: Es recomendable llevar a cabo experimentos a mayor escala para explorar una variedad más amplia de combinaciones de dosis de reactivos Fenton. Esto permitirá obtener una comprensión más completa de la relación entre las dosis y la eficiencia de remoción, brindando información relevante para una futura implementación.
- Optimizar el tiempo de reacción: Para lograr una remoción efectiva de la carga contaminante, se sugiere realizar una serie de experimentos previos para optimizar el tiempo de reacción del proceso Fenton. Ajustar y determinar el tiempo óptimo permitirá maximizar la eficiencia del tratamiento y mejorar los resultados obtenidos.

10. Referencias

- Alves, A., Homem, V., Dias, Z., & Santos, L. (2009). Preliminary feasibility study of benzo(a)pyrene oxidative degradation by fenton treatment. *Journal of Environmental and Public Health*, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/149034>
- Aranibar, M. (2016). Aplicación del reactivo fenton para la remoción de DQO del lixiviado de un depósito de seguridad a escala laboratorio. In *Universidad Nacional Agraria La Molina*.
- Arenas, S., & Nuncira, A. (2010). *Evaluación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales del sector industrial avícola*. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Asamblea Nacional. (2008). Constitución de la República del Ecuador. *Registro Oficial 449 de 20-Oct.-2008*.
- Barrera, H. (2020). *Degradación de compuestos fenólicos, mediante un proceso de oxidación avanzada*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Bautista, P., Mohedano, A. F., Gilarranz, M. A., Casas, J. A., & Rodriguez, J. J. (2007). Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewaters treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1–2), 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.004>
- Becerra, L. K., Horna, M. V., & Barrionuevo, K. I. (2014). Nivel de contaminación en los efluentes provenientes de camales de la región la libertad. *Rev. Cuerpo Med. HNAAA*, 7(3), 23–26.
- Becerra, M., & Cadena, S. (2016). *Evaluación de la aplicación del método fenton a nivel laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Aguas San Juan*.
- Belzona Inc. (2010). Tratamiento de Aguas Residuales. In A. Tronconis (Ed.), *Belzona*.
- Bermeo, M., Bonilla, S., & Coloma, T. (2017). Neutralización: aplicado a aguas residuales. In *Grupo Compás*.
- Bes, S., Silva, A., & Bengoa, C. (2016). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. In *Tritón-316Rt0506* (Issues 978-84-09-08637–5).
- Borja, D., Salazar, K., & Brito, H. (2019). Cuantificación de efluentes de aguas residuales del Camal Frigorífico Riobamba. *Ciencia Digital*, 3(2), 783–794. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.497>

- Coa, L. (2016). *Propuesta de diseño de una planta de faenamiento y procesamiento de carne en el distrito de Cabanilla Provincia Lampa Región Puno*. Universidad Nacional Del Altiplano Puno.
- Cun, M., & Álvarez, C. (2017). Estudio De Impacto Ambiental De Un Camal Municipal Urbano En La Provincia De El Oro . *Conference Proceedings, 1*, 335–344.
- Delgado, J. (2018). *Eficiencia de remoción de tres parámetros fisicoquímicos del efluente líquido del camal “Régulo Bernal Torres” utilizando proceso de oxidación avanzado fenton*. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., González, L., Tablada, E., Díaz, M., Robledo, C., & Balzarini, M. (2005). *Estadística para las ciencias agropecuarias* (Editorial).
- Doménech, X., Jardim, W., & Litter, M. (2002). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. *CYTED*, 1–19.
- ESAMUR. (2020). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en la industria alimentaria*.
- Espín, A. (2015). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el camal municipal del cantón Alausi*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Espinosa, J. J. (2011). *Tratamiento de aguas residuales de matadero con elevado contenido en sangre mediante la combinación de procesos anaerobio de película fija (BAPF) y aerobio de membrana (MBR)*. Universidad de Burgos, España.
- Espinoza, S. (2017). *Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales del Camal Municipal del Distrito de Tumán*.
- Forero, J. E., Ortiz, O. P., & Rios, F. (2005). Advanced oxidation processes as phenol treatment in industrial sewage. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro, 3*(1), 97–109.
- GAD Catamayo. (2019). *Plan de Ordenamiento Territorial del Cantón Catamayo 2019-2023*. 440.
- García, J. (2014). Procesos fenton y foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales de laboratorio microbiológico empleando Fe₂O₃ soportado en nanotubos de carbono. In *Repositorio Ujaveriana*. Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá.
- García, J., Torrades, F., García, J. A., Doménech, X., & Peral, J. (2006). Degradation of Procion Red H-E7B reactive dye by coupling a photo-Fenton system with a sequencing batch reactor. *Journal of Hazardous Materials, 134*(1–3), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.013>

- Ghosh, P., Samanta, A. N., & Ray, S. (2010). COD reduction of petrochemical industry wastewater using Fenton's oxidation. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 88(6), 1021–1026. <https://doi.org/10.1002/cjce.20353>
- Hernández, D., & Sánchez, J. (2014). Diseño De Una Planta De Tratamiento De Agua Residual Para El Municipio De San Marcos-Departamento De Sucre. In *Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico*.
- Isch, T. (2016). *Estudio de un sistema para el tratamiento de efluentes contaminados con compuestos surfactantes por un método fenton y fenton modificado con un agente quelante (EDTA)*.
- Landivar, V. (2014). *Aplicación de técnicas avanzadas de oxidación (TAOs) combinadas con biofiltros para el tratamiento de aguas residuales de la industria gráfica*. Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- Lara, L. (2011). *Las aguas residuales del camal municipal del Cantón Baños y su incidencia en la contaminación del río Pastaza en la provincia de Tungurahua*. Universidad Técnica de Ambato.
- Medina, C. (2022). *Sistema electro-Fenton para tratar aguas residuales del camal municipal de Chota*.
- Medina, C., Uriarte, W., Cárdenas, E., & Orrego, S. (2020). Treatment wastewater of slaughterhouses through technology advanced oxidation: fenton process. *Revista Ingeniería UC*, 27(2), 165–174.
- Mejía, M. (2005). Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria , en la microcuenca El Limón , San Jerónimo , Honduras . *Research and Higher Education Center*, 123.
- Méndez, R. I., Pietrogiovanna, J. A., Santos, B., Sauri, M. R., Giácoman, G., & Castillo, E. R. (2010). Determinación de la dosis óptima de reactivo fenton en un tratamiento de lixiviados por fenton-adsorción. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 26(3), 211–220.
- Metcalf and Eddy INC. (2005). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización (Vol 1)*. McGraw-Hill.
- Ministerio del Ambiente. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. *Registro Oficial*, 1–184.

- Montenegro, J. (2016). *Diseño de tratabilidad del agua residual del centro de faenamiento Provincia de Santa Elena*. Universidad de Guayaquil.
- Naranjo, D., Morillo, L., Pérez, J., Villacis, W., Vargas, P., & Muñoz, F. (2021). Procesos Fenton como tratamiento complementario para la remoción de tensoactivos y coliformes de aguas residuales domésticas. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(2), 364–377. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052021000200364>
- Noé, C. (2019). *Aplicación del proceso fenton para la reducción de la materia orgánica presente en el agua de bombeo de la industria pesquera, Callao, 2019*. Universidad Cesar Vallejo.
- Nolasco, C. (2018). Influencia del vertido del efluente líquido del Camal Municipal de Nueva Cajamarca en el ecosistema acuático del canal Galindona. *Universidad Católica Sedes Sapientiae*.
- Noyola, A., Morgan, J., & Güereca, L. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. In *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*.
- Pignatello, J. J., Oliveros, E., & MacKay, A. (2006). Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the fenton reaction and related chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(1), 1–84. <https://doi.org/10.1080/10643380500326564>
- Pliego, G. (2012). *Intensificación del proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales industriales*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. (2017). Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado. In *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París, UNESCO.
- Rezaei, F., & Vione, D. (2018). Effect of pH on zero valent iron performance in heterogeneous Fenton and Fenton-like processes: A review. *Molecules*, 23(12). <https://doi.org/10.3390/molecules23123127>
- Ríos, C. (2017). *Evaluación de catalizadores fenton Fe - Nanotubos de carbono para la degradación de amoxicilina*. Universidad Nacional de Colombia.
- Rivas, F. J., Beltrán, F., Gimeno, O., & Carvalho, F. (2003). Fenton-like oxidation of landfill leachate. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous*

Substances and Environmental Engineering, 38(2), 371–379.
<https://doi.org/10.1081/ESE-120016901>

- Rodríguez, M. (2003). Fenton and UV-vis based advanced oxidation processes in wastewater treatment: Degradation, mineralization and biodegradability enhancement. *Departament D'Enginyeria Química I Metal·lúrgia*, 296.
- Rodríguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008). Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. *Revista Facultad de Ingeniería*, 46, 24–38.
- Rubio, A., Chica, E. L., & Peñuela, G. A. (2014). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería Y Competitividad*, 16(2), 211–223. <https://doi.org/10.25100/iyc.v16i2.3696>
- Ruiz, S. (2011). *Plan de gestión de residuos del camal del cantón Antonio Ante*. Escuela Politécnica Nacional.
- Salas, G., & Condorhuamán, C. (2008). Tratamiento De Las Aguas Residuales De Un Centro De Beneficio O Matadero De Ganado. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 11(1), 29–35.
- Sanz, J., Lombraña, J. I., & De Luis, A. (2013). Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: Nuevos desarrollos y futuras tendencias. *Afinidad LXX*, 70(561), 24–32.
- Segovia, E. (2020). *Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea*. 785–801.
- SENAGUA. (2016). Estrategia Nacional de Calidad del Agua. *Ministerio Del Ambiente, Ecuador*, 97.
- Soto, A., Panimboza, A., Ilibay, C., Valverde, C., & Diéguez, K. (2019). Impacto ambiental de la operación del Centro de faenamiento de la ciudad de Puyo, Pastaza, Ecuador. *Prospectiva*, 18(1). <https://doi.org/10.15665/rp.v18i1.2101>
- UNESCO. (2017). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017. Cifras y datos: Las aguas residuales*. 12.

11. Anexos

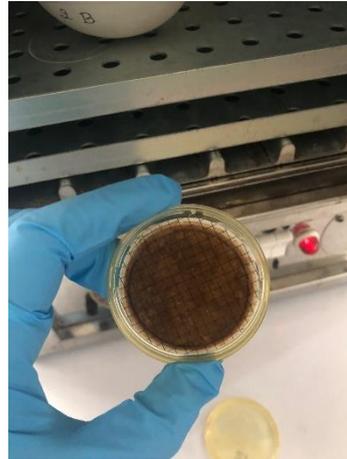
Anexo 1. Muestreo en la Empresa Pública de Rastro Catamayo.



Anexo 2. Análisis in situ de pH, temperatura y conductividad.



Anexo 3. Análisis de los parámetros fisicoquímicos en laboratorio.



Anexo 4. Proceso Fenton.



Anexo 5. Análisis de laboratorio UMAPAL del parámetro dureza.



ANÁLISIS DE LABORATORIO

Solicitante: Srta. Mileny Martinez
 Procedencia: EMPRESA PÚBLICA DE RASTRO CATAMAYO
 Presentación y cantidad: Botella de vidrio ambar de 500 ml
 Tipo de agua: Residual
 Muestreador: Srta. Mileny Martinez

PUNTO 1. Camal Catamayo 6/07/2022

ANÁLISIS QUÍMICO

PARÁMETROS QUÍMICO	UNIDADES	RESULTADOS	LÍMITE PERMISIBLE
Dureza total	mg/l	772,5	No Indica

PUNTO 2. Catamayo 06/07/2022

ANÁLISIS QUÍMICO

PARÁMETROS QUÍMICO	UNIDADES	RESULTADOS	LÍMITE PERMISIBLE
Dureza total	mg/l	721	No Indica

M1. Agua con Tratamiento 07/07/2022

ANÁLISIS QUÍMICO

PARÁMETROS QUÍMICO	UNIDADES	RESULTADOS	LÍMITE PERMISIBLE
Dureza total	mg/l	463,5	No Indica

M2. Agua con Tratamiento 07/07/2022

ANÁLISIS QUÍMICO

PARÁMETROS QUÍMICO	UNIDADES	RESULTADOS	LÍMITE PERMISIBLE
Dureza total	mg/l	875,5	No Indica

M3. Agua con Tratamiento 07/07/2022

ANÁLISIS QUÍMICO

PARÁMETROS QUÍMICO	UNIDADES	RESULTADOS	LÍMITE PERMISIBLE
Dureza total	mg/l	1133	No Indica

MB. Sin Tratamiento 07/07/2022

ANÁLISIS QUÍMICO

PARÁMETROS QUÍMICO	UNIDADES	RESULTADOS	LÍMITE PERMISIBLE
Dureza total	mg/l	927	No Indica

OBSERVACIONES:

SEGÚN ACUERDO DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE, ANEXO 1, NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA. TABLA 9. LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE. NO INDICA EL LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE

Ing. Cristina Vélez
 TÉCNICA UMAPAL

Ing. Magaly Cueva
 TÉCNICA UMAPAL

Dr. Alberto Gama
 RESPONSABLE PLANTA PUCARÁ

Anexo 6. Modelo lineal para la variable DQO en el software Desing Expert 13.

Response 1: DQO						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
<i>Model</i>	3060,03	2	1530,02	0,5084	0,6252	not significant
A-FeSO ₄	2828,51	1	2828,51	0,9399	0,3697	
B-H ₂ O ₂	231,52	1	231,52	0,0769	0,7908	
<i>Residual</i>	18056,19	6	3009,37			
<i>Cor Total</i>	21116,22	8				

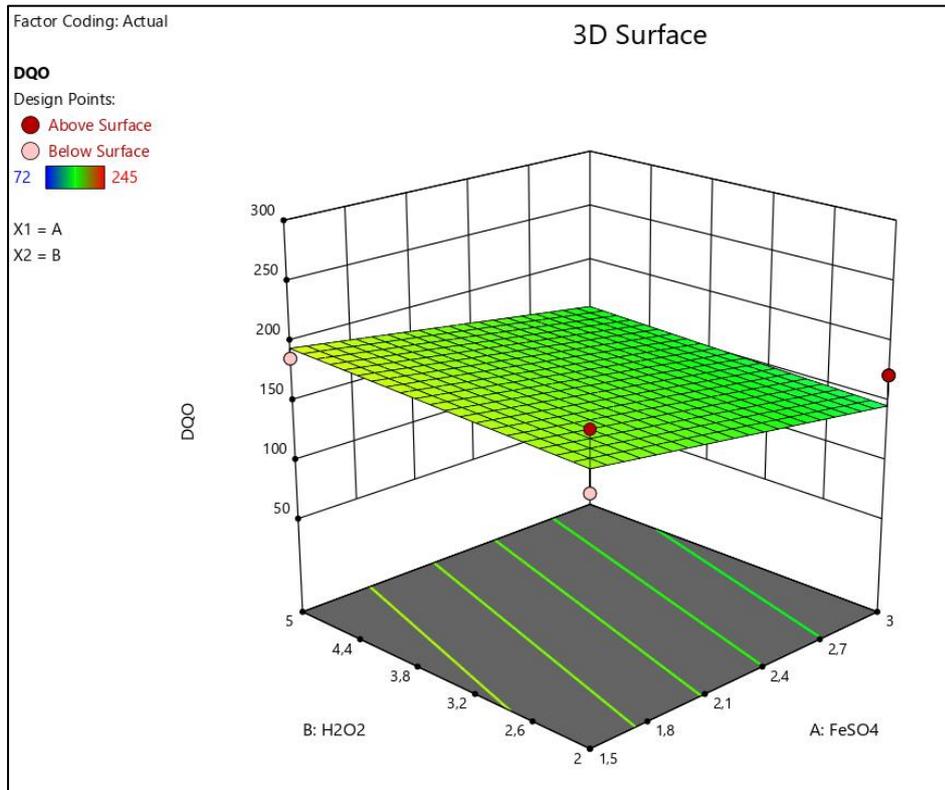
Anexo 7. Modelo de 2 factores independientes para la variable DQO en el software Design Expert 13.

Response 1: DQO						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
<i>Model</i>	3229,03	3	1076,34	0,3009	0,8241	not significant
A-FeSO ₄	2828,51	1	2828,51	0,7907	0,4146	
B-H ₂ O ₂	231,52	1	231,52	0,0647	0,8093	
AB	169,00	1	169,00	0,0472	0,8365	
<i>Residual</i>	17887,19	5	3577,44			
<i>Cor Total</i>	21116,22	8				

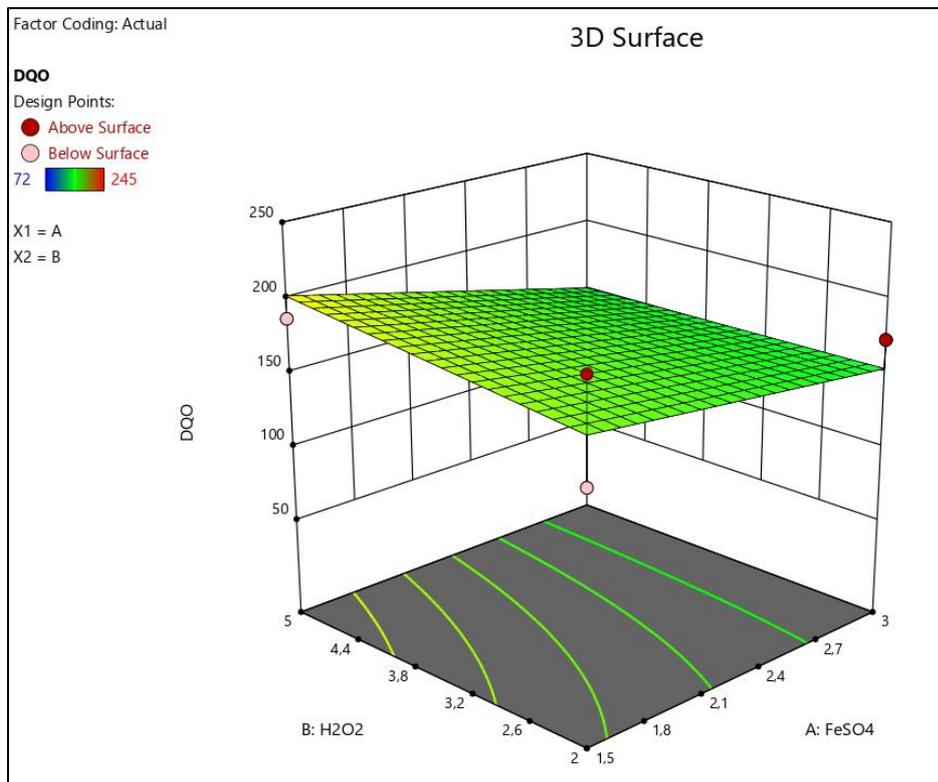
Anexo 8. Modelo cuadrático para la variable DQO en el software Design Expert 13.

Response 1: DQO						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
<i>Model</i>	14564,63	5	2912,93	1,33	0,4324	not significant
A-FeSO ₄	2828,51	1	2828,51	1,30	0,3378	
B-H ₂ O ₂	231,52	1	231,52	0,1060	0,7661	
AB	169,00	1	169,00	0,0774	0,7989	
A ²	7961,01	1	7961,01	3,65	0,1522	
B ²	10320,56	1	10320,56	4,73	0,1180	
<i>Residual</i>	6551,59	3	2183,86			
<i>Cor Total</i>	21116,22	8				

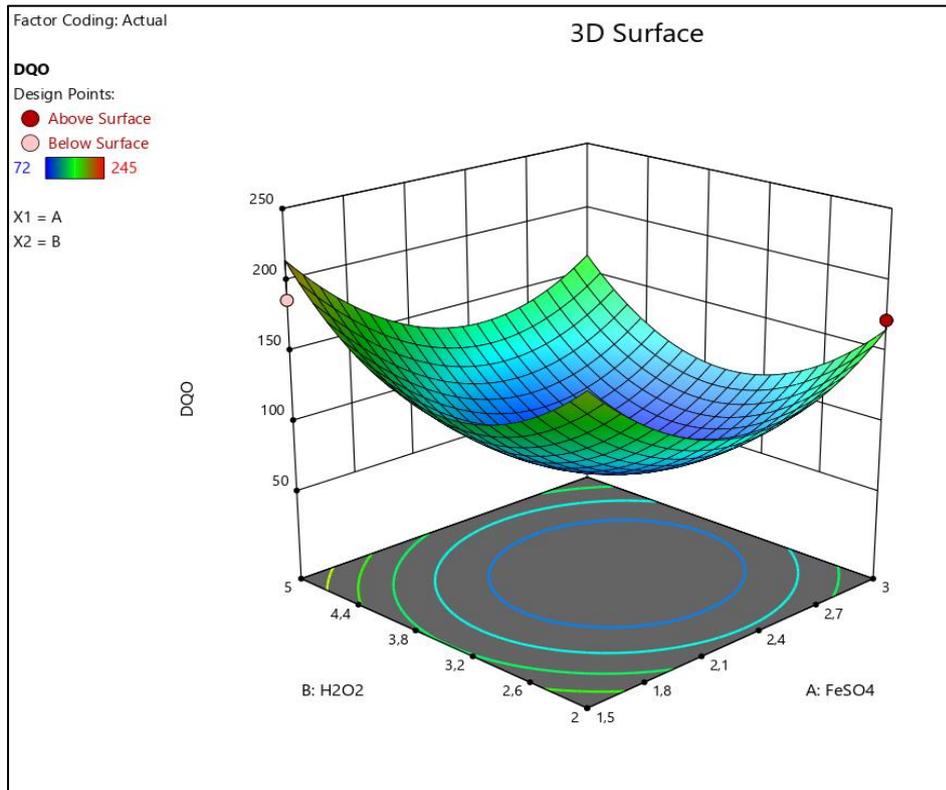
Anexo 9. Modelo lineal gráfico 3D de la respuesta DQO



Anexo 10. Modelo de dos factores independientes gráfico 3D de la respuesta DQO



Anexo 11. Modelo cuadrático gráfico 3D de la respuesta DQO



Anexo 12. Certificado de traducción a inglés del resumen



Mg. Yanina Quizhpe Espinoza
Licenciada en Ciencias de Educación mención Inglés
Magister en Traducción y mediación cultural

Celular: 0989805087
Email: yaniges@icloud.com
Loja, Ecuador 110104

Loja, 3 de junio de 2023

Yo, Lic. Yanina Quizhpe Espinoza, con cédula de identidad 1104337553, docente del Instituto de Idiomas de la Universidad Nacional de Loja, y certificada como traductora e interprete en la Senescyt y en el Ministerio de trabajo del Ecuador con registro **MDT-3104-CCL-252640**, certifico:

Que tengo el conocimiento y dominio de los idiomas español e inglés y que la traducción del resumen del Trabajo de Titulación **Procesos de oxidación avanzada fenton para el tratamiento de las aguas residuales de la Empresa Pública de Rastro Catamayo**, de autoría de la estudiante Mileny Lizzeth Martínez Sánchez, con cédula 1150054060, es verdadero y correcto a mi mejor saber y entender.

Atentamente

YANINA
BELEN
QUIZHPE
ESPINOZ
A

Firmado digitalmente por YANINA BELEN QUIZHPE ESPINOZA
Fecha: 2023.06.03 20:44:58 -05'00'

Yanina Quizhpe Espinoza.

Traductora Freelance