

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS**

**TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PTAR SAN JERÓNIMO MEDIANTE  
EL PROCESO FENTON**

**PRESENTADO POR:**

Br. AMELIA CALLAPIÑA QUICO

Br. FRANKLIN DAVID PORROA CONTOY

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO QUÍMICO**

**ASESORA:**

Dra. AMANDA ROSA MALDONADO FARFÁN

**FINANCIADO POR EL PROGRAMA  
“YACHAYNINCHIS WIÑARINAMPAQ” –  
UNSAAC**

**CUSCO – PERÚ**

**2025**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor ATANDA ROSA TALDONADO FARFAN  
..... quien aplica el software de detección de similitud al  
trabajo de investigación/tesis titulada: TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES  
DE LA PTAR SAN JERONIMO MEDIANTE EL PROCESO FENTON

Presentado por: AMELIA CALLAPIÑA QUILCO DNI N° 73863679 ;  
presentado por: FRANKLIN DAVID PORROA CONTOY DNI N°: 74613148  
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO QUÍMICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el  
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de  
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2 %.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

| Porcentaje     | Evaluación y Acciones                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Marque con una (X)                  |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Del 1 al 10%   | No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.                                                                                                                                                                                                                                                               | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las subsanaciones.                                                                                                                                                                                                                                                                     | <input type="checkbox"/>            |
| Mayor a 31%    | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. | <input type="checkbox"/>            |

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 19 de SEPTIEMBRE de 2025

Atanda Rosa Taldonado Farfan  
Firma

Post firma ATANDA ROSA TALDONADO FARFAN

Nro. de DNI 23822559

ORCID del Asesor 0000-0002-4870-7078

#### Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:500712924

# TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PTAR SAN JERÓNIMO MEDIANTE EL PROCESO FENTON.pdf



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::27259:500712924

Fecha de entrega

18 sep 2025, 11:38 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

18 sep 2025, 11:43 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PTAR SAN JERÓNIMO MEDIANTE EL PROCESO FENTON.pdf

Tamaño del archivo

3.9 MB

126 páginas

19.986 palabras

115.642 caracteres

## 2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

### Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **Dedicatoria**

A Dios, por ser mi guía y cuidarme en todo momento; a mi papá Humberto, por su ejemplo de perseverancia y sabiduría; a mi mamá Elena, por su amor incondicional y sus motivaciones diarias; a mis hermanos Vladimir, Nohelia y Ahdemir, quienes son mi motor y motivo de mi superación diaria.

A mis docentes, quienes no solo transmitieron información, sino inspiraron mi pasión por la carrera, desafiaron mi pensamiento crítico y me guiaron en mi desarrollo profesional y personal.

Br. Amelia Callapiña Quico

A mi familia, por ser mi pilar fundamental y acompañarme con amor y apoyo en cada etapa de este desafío. Esta meta alcanzada es también suya.

A mis docentes, por haberme formado con dedicación y transmitido sus conocimientos, los cuales han sido fundamentales en mi desarrollo profesional y personal.

Br. Franklin David Porroa Contoy

## **Agradecimientos**

A Dios, por ser nuestro guía incondicional y protector en cada etapa de este largo camino académico.

A nuestros padres quienes son el pilar fundamental en nuestras vidas, gracias por su amor incondicional, sus sacrificios y enseñanzas.

A nuestra asesora de tesis Dra. Amanda Rosa Maldonado Farfan, por su apoyo constante, su dedicación y paciencia. Gracias por compartir sus conocimientos, su sabiduría no solo en esta investigación sino también en las aulas.

Agradecemos al Ingeniero Uriel quien nos brindó el Laboratorio de Tecnologías de la Escuela Profesional de Ingeniería Química para poder desarrollar la parte experimental del presente trabajo de investigación.

Agradecemos a todos los ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, quienes nos formaron nuestro carácter profesional y académico.

A nuestros compañeros y amigos, gracias por los momentos compartidos.

Br. Amelia Callapiña Quico

Br. Franklin David Porroa Contoy

## Presentación

Sr. Decano y docentes de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

Señores miembros del Jurado

Según el Estatuto Universitario y el Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Facultad de Ingeniería de Procesos y con el anhelo de obtener el título profesional de Ingeniero Químico, se presenta el siguiente trabajo de investigación titulado: **“TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PTAR SAN JERÓNIMO MEDIANTE EL PROCESO FENTON”**, con el fin de optar al título de Ingeniero Químico.

Br. Amelia Callapiña Quico

Br. Franklin David Porroa Contoy

## Índice General

|                                         |      |
|-----------------------------------------|------|
| Dedicatoria .....                       | i    |
| Agradecimientos .....                   | ii   |
| Presentación .....                      | iii  |
| Índice General .....                    | iv   |
| Lista de acrónimos .....                | ix   |
| Lista de figuras.....                   | x    |
| Lista de tablas .....                   | xii  |
| Resumen.....                            | xiii |
| Abstract .....                          | xiv  |
| CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....         | 9    |
| 1.1. Introducción.....                  | 9    |
| 1.2. Planteamiento del problema .....   | 10   |
| 1.2.1. Definición del problema.....     | 10   |
| 1.2.2. Formulación del problema .....   | 11   |
| 1.3. Justificación .....                | 12   |
| 1.4. Objetivos de la investigación..... | 13   |
| 1.4.1. Objetivo general .....           | 13   |



|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.2. Objetivos específicos.....                                                              | 13 |
| CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....                                                        | 14 |
| 2.1. Antecedentes.....                                                                         | 14 |
| 2.2. Bases teóricas .....                                                                      | 16 |
| 2.2.1. Aguas residuales.....                                                                   | 16 |
| 2.2.2. PTAR San Jerónimo.....                                                                  | 17 |
| 2.2.3. Manejo y operación de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Jerónimo..... | 17 |
| 2.2.4. Contaminantes persistentes y bioacumulables .....                                       | 26 |
| 2.2.5. Vías de ingreso de contaminantes persistentes y bioacumulables al ecosistema .....      | 26 |
| 2.2.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) .....                                               | 28 |
| 2.2.7. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....                                                   | 28 |
| 2.2.8. Relación entre la DBO y la DQO.....                                                     | 29 |
| 2.2.9. Procesos de oxidación avanzada (POA).....                                               | 30 |
| 2.2.10. Radical hidroxilo ( <b><i>OH •</i></b> ) .....                                         | 33 |
| 2.2.11. Proceso Fenton .....                                                                   | 34 |
| 2.2.12. Tipos de procesos Fenton.....                                                          | 36 |
| 2.2.13. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales .....              | 37 |
| 2.2.14. Parámetros significativos del proceso Fenton.....                                      | 38 |

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 2.2.15. Dosis de reactivos en la reacción Fenton ..... | 40 |
| 2.2.16. Diseño experimental.....                       | 41 |
| 2.2.17. Marco Conceptual .....                         | 46 |
| 2.3. Hipótesis de la investigación .....               | 46 |
| 2.3.1. Hipótesis general .....                         | 46 |
| 2.3.2. Hipótesis específica.....                       | 47 |
| CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....               | 48 |
| 3.1. Diseño de la investigación.....                   | 49 |
| 3.2. Tipo de investigación.....                        | 49 |
| 3.3. Nivel de la investigación .....                   | 49 |
| 3.4. Enfoque de la investigación.....                  | 49 |
| 3.5. Muestra .....                                     | 50 |
| 3.6. Materiales .....                                  | 50 |
| 3.6.1. Materiales de vidrio y otros.....               | 50 |
| 3.6.2. Reactivos .....                                 | 51 |
| 3.6.3. Equipos.....                                    | 51 |
| 3.6.4. Instrumentos .....                              | 51 |
| 3.7. Procedimientos .....                              | 52 |
| 3.7.1. Monitoreo de campo y obtención de muestra ..... | 54 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 3.7.2. Caracterización fisicoquímica de la muestra.....    | 55 |
| 3.7.3. Remoción de materia orgánica total.....             | 59 |
| 3.7.4. Modelo matemático.....                              | 66 |
| 3.7.5. Parámetros del proceso.....                         | 67 |
| 3.8. Consideraciones éticas.....                           | 67 |
| CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                  | 69 |
| 4.1. Caracterización fisicoquímica de la muestra .....     | 69 |
| 4.2. Remoción de la materia orgánica total .....           | 71 |
| 4.2.1. Prueba exploratoria .....                           | 71 |
| 4.2.2. Proceso Fenton .....                                | 72 |
| 4.3. Modelo matemático .....                               | 77 |
| 4.3.1. ANOVA para el diseño experimental Box Behnken ..... | 77 |
| 4.3.2. Diagrama de Pareto y efectos estimados.....         | 79 |
| 4.3.3. Modelo Matemático .....                             | 83 |
| 4.3.4. Gráficas de Superficies de Respuesta.....           | 84 |
| 4.4. Parámetros del proceso .....                          | 85 |
| CONCLUSIONES .....                                         | 86 |
| RECOMENDACIONES.....                                       | 88 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                            | 89 |

|                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| APÉNDICES.....                                                                                                                                                                  | 100 |
| Apéndice N°1, Informe del análisis fisicoquímico de agua residual de la PTAR San Jerónimo.                                                                                      | 100 |
| Apéndice N°2, Informe del análisis de la demanda química del oxígeno, prueba exploratoria.                                                                                      | 101 |
| Apéndice N°3, Informe del análisis de la demanda química del oxígeno, primera experimentación.....                                                                              | 102 |
| Apéndice N°4, Informe del análisis de la demanda química del oxígeno, segunda experimentación.....                                                                              | 103 |
| Apéndice N°5, Informe del análisis de la demanda química del oxígeno, tercera experimentación.....                                                                              | 104 |
| ANEXOS .....                                                                                                                                                                    | 105 |
| Anexo A, Convenio de cooperación específico para la ejecución de la tesis con la empresa prestadora de servicios de saneamiento publico de accionario municipal SEDA CUSCO S.A. | 105 |
| Anexo B: Hoja de seguridad del reactivo ácido sulfúrico 95-97%.....                                                                                                             | 109 |
| Anexo C: Hoja de seguridad del reactivo peróxido de hidrógeno 30%.....                                                                                                          | 111 |
| Anexo C: Hoja de seguridad del reactivo hidróxido de sodio. ....                                                                                                                | 113 |
| Anexo C: Hoja de seguridad del reactivo sulfato de hierro (II) heptahidratado. ....                                                                                             | 115 |

### Lista de acrónimos

|                                      |                                             |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| DBO <sub>5</sub>                     | : Demanda Bioquímica de Oxígeno             |
| DQO                                  | : Demanda Química de Oxígeno                |
| PTAR                                 | : Planta de Tratamiento de Aguas Residuales |
| LMP                                  | : Límite Máximo Permisible                  |
| STS                                  | : Sólidos Totales en Suspensión             |
| pH                                   | : Potencial de Hidrógeno                    |
| FeSO <sub>4</sub> *7H <sub>2</sub> O | : Sulfato de Hierro Heptahidratado          |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>        | : Peróxido de Hidrógeno                     |
| mg/L                                 | : Miligramos por Litro                      |
| °C                                   | : Grados Celsius                            |
| POAs                                 | : Procesos de Oxidación Avanzada            |
| PPM                                  | : Partes por Millón                         |
| ANOVA                                | : Análisis de Varianza                      |
| Box-B                                | : Diseño de Box-Behnken                     |

## Lista de figuras

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2. 1</b> Área de pretratamiento de la PTAR San Jerónimo .....                                            | 18 |
| <b>Figura 2. 2</b> Sedimentadores primarios .....                                                                  | 20 |
| <b>Figura 2. 3</b> Filtros percoladores primarios.....                                                             | 21 |
| <b>Figura 2. 4</b> Filtros percoladores secundarios .....                                                          | 22 |
| <b>Figura 2. 5</b> Sedimentadores secundarios.....                                                                 | 23 |
| <b>Figura 2. 6</b> Área de desinfección .....                                                                      | 24 |
| <b>Figura 2. 7</b> Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.....                          | 25 |
| <b>Figura 2. 8</b> Ciclo de ingreso de los contaminantes emergentes al ecosistema.....                             | 27 |
| <b>Figura 2. 9</b> Esquema de la clasificación de los POA .....                                                    | 33 |
| <b>Figura 2. 10</b> Representación gráfica del diseño Box Behnken para tres factores.....                          | 43 |
| <b>Figura 2. 11</b> Interpretación grafica de superficies de respuesta.....                                        | 45 |
| <b>Figura 3. 1</b> Ubicación de la PTAR San Jerónimo.....                                                          | 48 |
| <b>Figura 3. 2</b> Vista de los reactivos utilizados en la experimentación.....                                    | 52 |
| <b>Figura 3. 3</b> Diagrama de flujo experimental .....                                                            | 53 |
| <b>Figura 3. 4</b> Recolección de la muestra en el efluente de la PTAR y medición de parámetros<br>iniciales ..... | 55 |
| <b>Figura 3. 5</b> Medición de la DQO inicial y acidificando cada muestra con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ..... | 59 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 3. 6</b> Pesado del catalizador sulfato y disolución en cada muestra acidificada en la prueba de jarras ..... | 60 |
| <b>Figura 3. 7</b> Neutralización de la muestra post experimentación y precipitación de material en suspensión .....    | 61 |
| <b>Figura 3. 8</b> Análisis de la DQO residual .....                                                                    | 62 |
| <b>Figura 4. 1</b> Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....                                                    | 79 |
| <b>Figura 4. 2</b> Grafica de efectos principales para %DQOr .....                                                      | 81 |
| <b>Figura 4. 3</b> Grafica de interacción del H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> con el pH .....                             | 82 |
| <b>Figura 4. 4</b> Gráficos de superficie de respuesta a Fe <sup>2+</sup> +fijo de 90.....                              | 84 |

## Lista de tablas

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 2. 1</b> Ventajas y desventajas de los POA.....                                            | 32 |
| <b>Tabla 2. 2</b> Ventajas y limitaciones del proceso Fenton.....                                   | 38 |
| <b>Tabla 3. 1</b> Concentración de reactivos para la prueba exploratoria .....                      | 63 |
| <b>Tabla 3. 2</b> Código de niveles del Diseño Box Behnken para aplicación del proceso Fenton ..... | 64 |
| <b>Tabla 3. 3</b> Tabla de contenido de dosis reactivos en la experimentación Fenton .....          | 65 |
| <b>Tabla 4. 1</b> Caracterización fisicoquímica del efluente de la PTAR de San Jerónimo .....       | 69 |
| <b>Tabla 4. 2</b> Resultados de la prueba exploratoria .....                                        | 71 |
| <b>Tabla 4. 3</b> Códigos de niveles seleccionados en la prueba exploratoria .....                  | 73 |
| <b>Tabla 4. 4</b> Tabla de resultados de la DQOf.....                                               | 74 |
| <b>Tabla 4. 5</b> Porcentaje de reducción de la DQO .....                                           | 76 |
| <b>Tabla 4. 6</b> Análisis de varianza para el diseño experimental Box Behnken .....                | 78 |



## Resumen

La investigación tuvo como objetivo aplicar el proceso Fenton para la remoción de materia orgánica no biodegradable o contaminantes persistentes, medidos como DQO, en el efluente de la PTAR San Jerónimo, Cusco. Se empleó un diseño experimental con cinco pruebas exploratorias preliminares y un diseño factorial Box Behnken, para determinar las concentraciones óptimas de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  y el pH, parámetros críticos en la eficiencia del proceso.

Las muestras de 1000 mL fueron obtenidas del canal del efluente de la PTAR, caracterizado inicialmente por un pH de 7.8, una DQO de 180 mg/L, DBO de 75 mg/L, aceites y grasas de 5 mg/L, sólidos suspendidos de 150 mg/L y una temperatura de 20 °C. Estos datos permitieron establecer la línea base del estudio. En la fase exploratoria se observó una disminución progresiva de la DQO al incrementar las concentraciones de los reactivos. Por ello, se eligió como punto de partida 30 mg/L de  $\text{Fe}^{2+}$  y 300 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , y como punto prospectivo 90 mg/L de  $\text{Fe}^{2+}$  y 900 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , necesarios para el diseño Box Behnken, con 15 experimentos y dos réplicas cada uno, totalizando 45 ensayos.

Los resultados evidenciaron una alta eficiencia del proceso Fenton, alcanzando un 89.0% de remoción de DQO con 60 mg/L de  $\text{Fe}^{2+}$ , 600 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y pH 3.0. Este experimento logró una reducción significativa de la materia orgánica no biodegradable, confirmando la viabilidad del proceso como alternativa eficaz para optimizar el tratamiento de aguas residuales en plantas convencionales.

**Palabras Claves:** Proceso Fenton, diseño Box Behnken, DQO, materia orgánica no biodegradable.

## Abstract

The aim of this research was to apply the Fenton process for the removal of non-biodegradable organic matter or persistent pollutants, measured as COD, in the effluent of the San Jerónimo Wastewater Treatment Plant (WWTP), Cusco. An experimental design was applied, consisting of five preliminary exploratory tests and a Box-Behnken factorial design, to determine the optimal concentrations of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , and pH, which are critical parameters for process efficiency.

Samples of 1000 mL were collected from the effluent channel of the WWTP, initially characterized by pH 7.8, COD 180 mg/L, BOD 75 mg/L, oils and grease 5 mg/L, total suspended solids 150 mg/L, and temperature 20 °C. These values established the baseline of the study. During the exploratory phase, a progressive decrease in COD was observed as the concentrations of the reagents increased. Therefore, 30 mg/L of  $\text{Fe}^{2+}$  and 300 mg/L of  $\text{H}_2\text{O}_2$  were selected as the first point, while 90 mg/L of  $\text{Fe}^{2+}$  and 900 mg/L of  $\text{H}_2\text{O}_2$  were projected as the second point, required for the Box-Behnken design, which involved 15 experiments with two replicates each, totaling 45 tests.

The results demonstrated high efficiency of the Fenton process, reaching 89.0% COD removal with 60 mg/L of  $\text{Fe}^{2+}$ , 600 mg/L of  $\text{H}_2\text{O}_2$ , and pH 3.0. This experiment achieved a significant reduction of non-biodegradable organic matter, confirming the feasibility of the process as an effective alternative to improve wastewater treatment in conventional plants.

**Keywords:** Fenton process, Box-Behnken design, COD, non-biodegradable organic matter.

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

### **1.1. Introducción**

Hoy en día, los contaminantes persistentes y bioacumulables están dispersos en el entorno ambiental, afectando el agua, suelo y aire. Estos contaminantes, provenientes de diversas fuentes domésticas e industriales, están presentes en concentraciones bajas pero significativas, lo que puede tener efectos adversos a pesar de sus bajas concentraciones.

Al llegar a las PTAR, los contaminantes persistentes y bioacumulables atraviesan diversos tratamientos convencionales, los cuales incluyen etapas primarias y secundarias; así como, desinfección mediante cloración. Sin embargo, debido a la complejidad y resistencia de estos contaminantes, su eliminación no es completa, permitiendo que algunos de ellos sean liberados al medio ambiente a través del efluente tratado. Además, estos contaminantes persistentes y bioacumulables contribuyen al incremento de la concentración total de la materia orgánica no removido en los procesos.

Cuando estos contaminantes llegan al medio ambiente, ya sea a través del agua o al interactuar con plantas, pueden bioacumularse en concentraciones significativas. Esta acumulación puede tener impactos en la salud humana; como consumir alimentos o agua contaminada. Los riesgos incluyen la aparición de nuevas enfermedades, resistencia antimicrobiana y resistencia a compuestos específicos, lo que podría tener consecuencias perjudiciales tanto a nivel local como global.

Actualmente, los investigadores están centrando su atención en estudiar cada uno de estos contaminantes. Según la Red Norman, se han descubierto hasta ahora alrededor de 117,000 contaminantes persistentes y bioacumulables mediante una variedad de técnicas y experimentos

realizados en diversas fuentes. Este aumento en el descubrimiento de nuevos compuestos resalta la magnitud creciente del problema (Geissen, 2015).

En respuesta, se busca establecer técnicas de remoción eficaces y en base a ello tener normativas y regulaciones para abordar el control de estos contaminantes persistentes. Estas normas podrían requerir una mayor supervisión y control tanto por parte de las PTAR y de las industrias que generan estas sustancias. Esta acción es esencial para mitigar los riesgos potenciales que puede traer en un futuro el incremento de este tipo de contaminantes en el entorno.

## **1.2. Planteamiento del problema**

### ***1.2.1. Definición del problema***

El uso de fármacos, productos de limpieza y desinfección han incrementado drásticamente debido a la presencia de las diferentes enfermedades infecciosas que surgieron en los últimos 4 años, por ejemplo la Influenza A y B, Virus Sincitial Respiratorio (VSR), Asma, SARS COV-19 y Neumonía (Organización Panamericana de la Salud, n.d.); este tipo de productos son los principales en generar contaminantes persistentes y bioacumulables después de su aplicación o uso. Además, la mayoría de estos contaminantes ingresan al agua por el uso que se les da. Sin embargo, la PTAR de San Jerónimo no puede remover estos contaminantes por su compleja estructura química y su alto nivel de solubilidad en el agua, por tanto, es liberado al río Huatanay, evidenciándose de forma general en los resultados de DQO, lo cual es un problema para la región local ya que estos no tienen un tratamiento especial.

La presencia de estos contaminantes en el río Huatanay tiene repercusiones ambientales y de salud pública ya que son bioacumulables, poniendo en riesgo a las comunidades aledañas que utilizan este recurso para el riego tecnificado de productos agrícolas. Además, estos contaminantes

pueden interferir con los ecosistemas acuáticos y contribuir a la proliferación de organismos patógenos.

Para abordar este desafío, es crucial desarrollar y proponer alternativas efectivas para la eliminación o disminución de este tipo de contaminantes en la PTAR. Estas alternativas deben considerar los parámetros operativos clave que permitan su escalamiento a nivel piloto y su eventual implementación a gran escala. Esto no solo ayudará a optimizar la calidad del agua residual tratada, sino que de igual forma contribuirá a la conservación de la cuenca hidrográfica del río Huatanay, asegurando un entorno más saludable y sostenible para las futuras generaciones.

### **1.2.2. *Formulación del problema***

#### **Problema general**

- ¿El proceso Fenton remueve adecuadamente la materia orgánica residual no biodegradable del efluente de la PTAR San Jerónimo?

#### **Problemas específicos**

- ¿Qué características fisicoquímicas presenta el efluente de la PTAR San Jerónimo a tratar?
- ¿Cuál es el efecto de la dosis de peróxido de hidrógeno, catalizador sulfato ferroso y pH, sobre la remoción de la materia orgánica total (%DQO) del efluente de la PTAR San Jerónimo?
- ¿Cuál es el modelo matemático que relaciona las variables de estudio; peróxido de hidrógeno, catalizador sulfato ferroso y pH?
- ¿Cuáles son los parámetros de peróxido de hidrógeno, sulfato ferroso y pH que logran una mayor remoción de DQO?

### 1.3. Justificación

A través del tiempo, las PTAR se centraron en eliminar compuestos orgánicos y algunos contaminantes particulares, siguiendo las normativas ambientales. Sin embargo, el surgimiento de nuevos contaminantes con diversas propiedades químicas, exige la implementación de tratamientos avanzados para su eliminación y para garantizar la adecuada reintegración de las aguas residuales en el entorno ambiental. Cabe destacar que estos nuevos contaminantes aún no están regulados en el Perú.

La PTAR San Jerónimo no cuenta con un tratamiento terciario desarrollado para la remoción de estos contaminantes persistentes (plaguicidas, insecticidas, micro plásticos, contaminantes emergentes, productos farmacéuticos, de limpieza, etc). Consecuentemente, los efluentes son liberados directamente al río Huatanay, lo que ha empezado a llamar la atención debido a sus efectos negativos. Esta situación contribuye a un problema de salud pública, ocasionando la pérdida de especies, desequilibrios hormonales, y la acumulación en el ambiente. Además, los agricultores utilizan el agua del río en la actividad de riego, permitiendo que estos contaminantes ingresen a la cadena alimenticia y se bioacumulen<sup>1</sup> en plantas y seres vivos.

En respuesta a esta problemática, surge la justificación para investigar métodos de remoción de esta materia orgánica no biodegradable. Entre estos métodos, destaca el proceso Fenton, ya que el proceso funciona a presión y temperatura ambiente, no se forman compuestos clorados, es una tecnología económica y el proceso es fácil de diseñar y operar. En comparación con otras técnicas, presenta una rápida velocidad de reacción debido a su empleo de un catalizador

---

<sup>1</sup> Proceso por el cual los contaminantes se acumulan en los organismos vivos, a menudo en mayor concentración que en su entorno.

de hierro. Así, se lograría eliminar la materia orgánica no biodegradable o de baja biodegradabilidad, inactivándola o convirtiéndola en compuestos menos peligrosos.

#### **1.4. Objetivos de la investigación**

##### **1.4.1. *Objetivo general***

- Remover la materia orgánica residual no biodegradable del efluente de la PTAR San Jerónimo, mediante el proceso Fenton.

##### **1.4.2. *Objetivos específicos***

- Determinar las características fisicoquímicas del efluente de la PTAR San Jerónimo a tratar.
- Determinar el efecto de la dosis de peróxido de hidrógeno, catalizador sulfato de hierro y pH, sobre la remoción de la materia orgánica total (%DQO) del efluente de la PTAR San Jerónimo.
- Determinar el modelo matemático que relacione las variables en estudio.
- Determinar los parámetros de peróxido de hidrógeno, sulfato ferroso y pH que logren una mayor remoción de DQO.

## CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Antecedentes

Choque (2024) desarrolló una investigación en La Paz - Bolivia, enfocada en la evaluación de la calidad del efluente de la PTAR del Municipio de Viacha, con los objetivos principales de evaluar la calidad de los efluentes, determinar sus parámetros fisicoquímicos y comparar los resultados obtenidos con las normas ambientales establecidas. El sistema de tratamiento analizado está constituido por las siguientes unidades operativas: cárcamo de bombeo, desarenador, rejillas finas, tanque aerobio, sedimentador y sistema de lodos activados, donde en relación al parámetro de DQO se registraron valores que oscilaron entre 121 mg/L O<sub>2</sub> y 324 mg/L O<sub>2</sub> representando valores mínimos y máximos respectivamente. Los resultados de la investigación evidenciaron que, aunque la calidad del efluente final de la PTAR cumple con los Límites Máximos Permisibles establecidos por la normativa vigente, se identificó un incremento significativo en las concentraciones de nitrógeno amoniacal, oxígeno disuelto y contaminantes emergentes, situación que representa un factor de riesgo potencial para la calidad del cuerpo receptor, ya que dichos parámetros pueden inducir proceso de eutrofización en el sistema acuático.

Rubio (2014) desarrolló una investigación en Colombia sobre la aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico, identificando los parámetros críticos que influyen en la eficiencia del proceso: concentración del agente oxidante H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y del catalizador, temperatura, pH, tiempo de reacción y tipo de contaminante presente. Los resultados experimentales demostraron que con una concentración de 50 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se logró una degradación del 90% de los contaminantes después de 90 minutos de reacción, mientras que al incrementar la concentración a 150 mg/L, la eficiencia de remoción disminuyó al 80%, evidenciando que existe una concentración óptima del agente oxidante para maximizar la



degradación. El estudio concluyó que el proceso Fenton constituye una alternativa tecnológicamente viable y eficiente para el tratamiento de aguas residuales industriales, siempre que se consideren y optimicen las variables operacionales específicas según las características particulares de cada tipo de contaminante a tratar.

Medina (2020) desarrolló una investigación en Chota, Peru, enfocada en el tratamiento de aguas residuales provenientes del camal municipal mediante la aplicación del proceso Fenton como oxidación avanzada y tratamiento terciario, identificando como variables críticas del proceso pH, la concentración de sulfato ferroso y la concentración de peróxido de hidrogeno. La metodología experimental incluyo un pretratamiento de las muestras para eliminar solidos totales y gruesos, garantizando una mezcla homogénea para la experimentación, la cual se realizó en un sistema de vasos precipitados con agitación controlada, empleando el diseño experimental Box-Behnken y la metodología de superficie de respuesta para la optimización de las variables operacionales. Los resultados obtenidos fueron positivos, alcanzando una remoción del 79.9% de la DQO y una reducción significativa del índice de biodegradabilidad, demostrando la efectividad del proceso Fenton como alternativa tecnológica viable para el tratamiento de aguas residuales de origen cárnico con altas grasas orgánicas.

León *et al.* (2020) desarrollaron una investigación en Ecuador sobre la aplicación del proceso Foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, utilizando muestras del efluente de la quesera “Airon” y analizando los parámetros de DQO, DBO5, turbidez, solidos suspendidos y coliformes fecales como indicadores de la calidad del agua tratada. A través de la optimización experimental, los investigadores determinaron que las concentraciones óptimas para maximizar la reducción de DQO fueron 400 mg/L de ion hierro como catalizador y 6000 mg/L de peróxido de hidrógeno como agente oxidante, condiciones que permitieron obtener

resultados excepcionalmente positivos al reducir la concentración inicial de DQO de 6925 mg/L hasta 539.25 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 92.21%, lo que demuestra la alta efectividad del proceso Foto-Fenton como tecnología de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales con elevadas cargas orgánicas provenientes de la industria de procesamiento de productos lácteos.

Zuñiga (2023) desarrolló una investigación en Cusco, Perú, enfocada en la reducción de la demanda química de oxígeno mediante la aplicación el proceso Fenton en las aguas residuales del camal municipal de Calca, estableciendo como variables independientes la concentración del catalizador de hierro, la concentración de peróxido de hidrógeno y el pH, mientras que la variable respuesta fue la concentración final de DQO. A través de un diseño experimental optimizado, se obtuvieron resultados altamente satisfactorios empleando las condiciones operacionales de 1234 mg/L de catalizador hierro, 709.65 mg/L de peróxido de hidrógeno y pH de 4.5, logrando reducir la concentración inicial de DQO de 7402.79 mg/L a 178.84 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción excepcional del 97.5%, lo que demuestra la alta efectividad del proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales con elevadas cargas orgánicas provenientes de actividades de procesamiento cárnico.

## **2.2.Bases teóricas**

### **2.2.1. Aguas residuales**

Las aguas residuales consisten en una mezcla de efluentes de agua, originados en viviendas, oficinas hoteles, restaurantes, comercios, instituciones, industrias e incluso en actividades agrícolas. Además, incluye aportes de aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que se incorporan a la corriente de agua residual.

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2014) define las aguas residuales como aquellas que han sido alteradas por actividades antropogénicas y que requieren un tratamiento previo antes de ser vertida al medio ambiente o a un sistema de alcantarillado. Estas pueden clasificarse en industriales, domésticas y municipales.

### **2.2.2. PTAR San Jerónimo**

La PTAR de la ciudad del Cusco, se ubica en la comunidad campesina de Collana Chahuanccosco, ocupando un área total de 7.4 Has. Consiste en una planta convencional de tratamiento de aguas residuales que recibe efluentes domésticos, industriales y de establecimiento comercial provenientes de todos los distritos de la ciudad. Esta planta procesa un caudal promedio anual de 550 L/s y puede atender un caudal máximo de 802 L/s (Empresa Prestadora de Servicios SEDACUSCO Sociedad Anonima, EPS SEDACUSCO S.A., 2022).

El objetivo principal de esta planta es asegurar que las aguas residuales sean tratadas de forma adecuada, evitando la contaminación del medio ambiente y permitiendo su retorno seguro a la naturaleza.

### **2.2.3. Manejo y operación de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Jerónimo**

A continuación, se detalla las etapas de tratamiento de la planta:

**Pretratamiento.** El pretratamiento es una etapa crucial en la PTAR, diseñada para acondicionar el efluente antes de los procesos principales de tratamiento. Esta fase inicial incluye operaciones físicas y mecánicas para remover los contaminantes de mayor tamaño y aquellos que podrían dañar o interferir con los equipos y procesos posteriores (Huerta Piqueras, 2021).

En la PTAR San Jerónimo, la etapa de pre tratamiento incluye el desbaste y los desarenadores aireados, que se describen a continuación:

- **Desbaste:** El desbaste grueso se realiza con dos rejas mecánicas de 25 mm de abertura entre barras, y el desbaste fino, con dos rejas mecánicas de 6 mm. Las rejas están montadas en 2 canales paralelos, y en cada canal trabajan en serie una reja gruesa seguida de una fina, ambas mecánicas. Cada batería está ubicada en un canal de 1.80 m de ancho y 1.80 de profundidad (Nieto *et al.*, 2021, p. 3 ).
- **Desarenadores aireados:** Los desarenadores están diseñados para retener arena y minerales inerte o pesados en las aguas residuales. Se dispone de 5 desarenadores aireados tipo tornillo, los que el aire se introduce por la parte inferior para acelerar la separación de materiales pesados (tierra, arena, grava) y la flotación de las grasas (Nieto *et al.*, 2021, p. 3 ).

En la Figura 2. 1, se muestra el área de pretratamiento de la PTAR San Jerónimo, donde se realiza la remoción inicial de sólidos presentes en el efluente.

**Figura 2. 1**

*Área de pretratamiento de la PTAR San Jerónimo*



*Nota.* Izquierda: reja de pretratamiento, derecha: desarenadores aireados; área de pre tratamiento de la PTAR San Jerónimo, donde se efectúa la remoción inicial de sólidos presentes.

El mantenimiento regular de los equipos de pretratamiento es crucial para garantizar su eficacia. Los operadores de la planta deben realizar limpiezas periódicas de las rejillas, desarenadores y desengrasadores para evitar obstrucciones y asegurar un funcionamiento óptimo. El pretratamiento eficaz no solo protege los equipos posteriores, sino que también mejora significativamente la eficiencia de los tratamientos primarios y secundarios, contribuyendo así a la calidad final del efluente tratado.

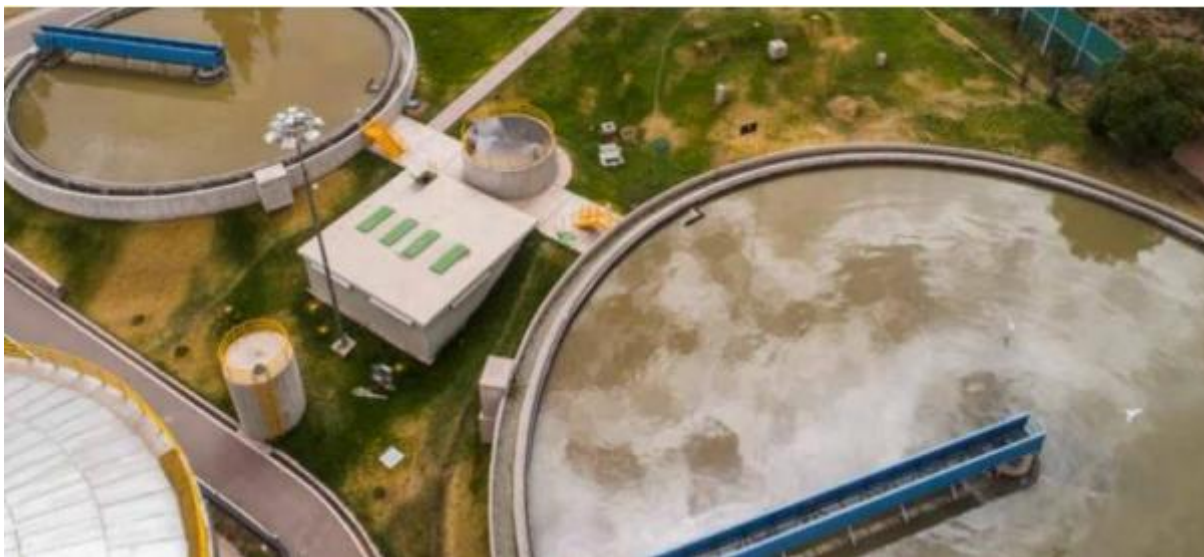
**Tratamiento primario.** En este tratamiento es donde se eliminan los sólidos suspendidos y material orgánico mediante procesos físicos, principalmente la sedimentación por gravedad. En esta fase, se logra separar una proporción significativa de material orgánico, restos de alimentos y materia fecal que no fueron retenidos en el pretratamiento. La eficiencia es alta, eliminando en promedio el 90% de las materias decantables y el 70% de materiales en suspensión. Además, se consigue una reducción de la DBO en un 35% (EPS SEDACUSCO S.A., 2022, p. 135).

En la PTAR San Jerónimo, la etapa de tratamiento primario consta del sedimentador primario, que se describen a continuación:

- **Sedimentación primaria:** Se cuenta con dos sedimentadores, las estructuras son de concreto armado de forma cónica. El agua a tratar ingresa por el centro del sedimentador y sale mediante un canal periférico provisto a vertederos, con un tiempo de retención de 2.5 a 3.0 h, tiempo que sedimenta casi el 90% de material sólido; además, cuenta con un recolector giratorio que recoge las natas, grasas que se encuentran en la superficie. Los lodos acumulados en la base cónica son succionados periódicamente a la cámara de los espesadores, como se ve en la Figura 2. 2.

**Figura 2. 2**

*Sedimentadores primarios*



*Nota.* Vista aérea de los sedimentadores primarios de la PTAR de San Jerónimo, donde ocurre la separación de sólidos sedimentables del proceso.

**Tratamiento secundario.** Se enfoca en la eliminación biológica de la materia orgánica biodegradable con microorganismos que descomponen los contaminantes orgánicos, reduciendo la DBO. En este proceso, el agua residual entra en contacto con microorganismos en un tanque de aireación, donde las bacterias consumen la materia orgánica y forman flóculos que sedimentan en un tanque clarificador (Huaroto, 2022).

En la PTAR se trabaja con el uso de filtros biológicos, que son los filtros percoladores primarios, filtros percoladores secundarios y sedimentadores secundarios, su funcionamiento se indica a continuación:

- **Filtros percoladores primarios:** Estos filtros reciben a los efluentes de los sedimentadores primarios por gravedad, ya que el efluente estático es bastante para alcanzar la presión necesaria para el acondicionamiento de los brazos de los filtros y cada filtro tiene aireación natural que ingresan por 80 ventanas, evidenciándose en la Figura 2. 3 (Ballarte, 2024, p. 33).

**Figura 2. 3**

*Filtros percoladores primarios*



- **Filtros percoladores secundarios:** Estas unidades funcionan de manera similar a los filtros primarios, pero aprovechan las características del medio filtrante y tienen aproximadamente el doble de altura. Reciben ventilación natural a través de 44 ventanas, como se muestra en la Figura 2. 4, lo que optimiza su rendimiento.

**Figura 2. 4**

*Filtros percoladores secundarios*



- **Sedimentadores Secundarios:** Se cuenta con dos sedimentadores secundarios, los cuales reciben efluentes de los filtros percoladores secundarios, las estructuras son de concreto armado según especificaciones técnicas y características particulares de los equipos, son de forma cónica de flujo ascendente, tal como se ve en la Figura 2. 5.



**Figura 2. 5**

*Sedimentadores secundarios*



**Desinfección por cloración.** el objetivo del sistema de cloración es eliminar los microorganismos patógenos mediante la adición de cloro en cantidades que no afecten los usos posteriores del agua. Finalmente, el agua tratada es conducida al río Huatanay a través de un canal de salida (EPS SEDACUSCO S.A., 2022, p. 136).

En la PTAR de San Jerónimo, el tratamiento final está conformado por una cámara de contacto de cloro y una cámara de agua tratada que son descritas a continuación:

- **Cámara de contacto de cloro:** Se cuenta con un ambiente adecuado en el que se tiene los cilindros de cloro, las balanzas y equipos de dosificación de cloro, aquí se recibe el fluente de los sedimentadores.

- **Cámara de agua tratada:** Este canal es de tipo Parshall, aquí las aguas residuales ya tratadas y cloradas son conducidas al río Huatanay, aquí se mide a través de un medidor de ultra sonido el volumen del efluente tratado.

La Figura 2. 6 ilustra la disposición de los sistemas de cloración y medición de caudal que completan el proceso de tratamiento antes de descargar al río Huatanay.

**Figura 2. 6**

*Área de desinfección*



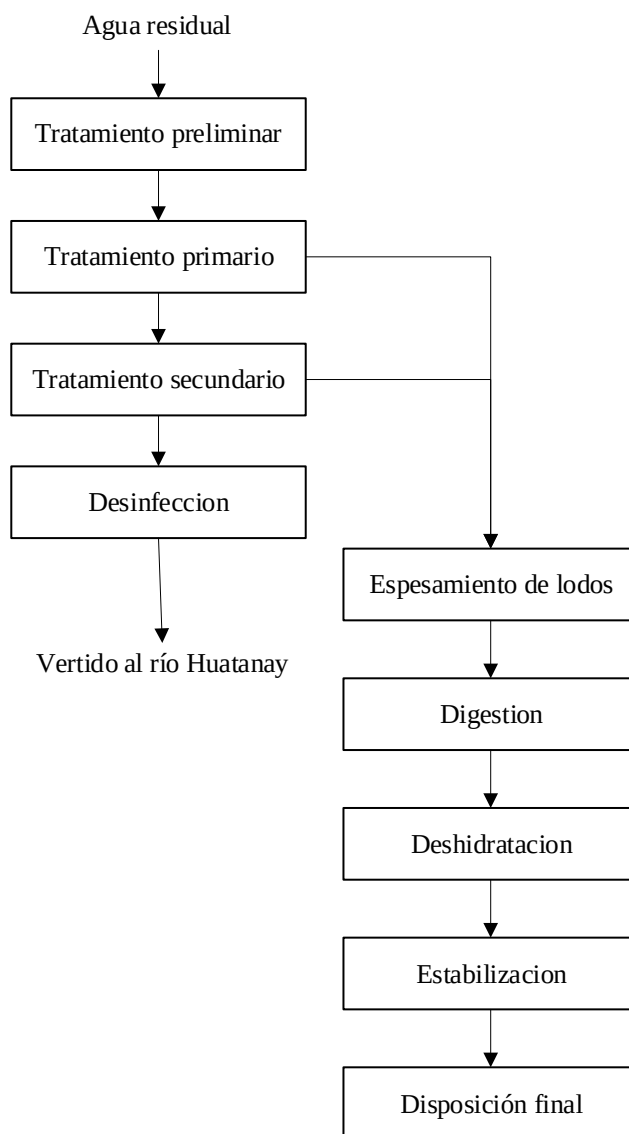
*Nota.* Área de desinfección de la PTAR de San Jerónimo, donde el efluente tratado recibe un tratamiento final para eliminar microorganismos patógenos antes de su vertido.

La Figura 2.7 muestra el diagrama de flujo de la PTAR, se observa la secuencia de procesos a los que es sometida el agua residual, iniciando con el tratamiento preliminar, seguido del

tratamiento primario y el tratamiento secundario, tras lo cual se aplica un proceso de desinfección antes de su vertido al Río Huatanay.

**Figura 2. 7**

*Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales*



#### **2.2.4. Contaminantes persistentes y bioacumulables**

Los contaminantes persistentes y bioacumulables o contaminantes emergentes representan un desafío creciente en la protección del ambiente y la salud de los seres vivos. Estos compuestos de diverso origen, aunque presente en bajas concentraciones, están siendo cada vez más detectados, dando preocupación por sus potenciales efectos adversos (Espinoza & Arriaga, 2021, p. 21). Su persistencia se debe en parte a que su tasa de introducción en el ambiente puede superar su tasa de transformación o remoción. Las principales fuentes de estos contaminantes incluye efluentes domésticas, hospitalarios, residuos de actividades agrícolas y ganaderas; así como, plantas de tratamiento de aguas que carecen de un tratamiento terciario adecuado (Gil *et al.*, 2012, p. 3).

Entre los contaminantes emergentes más estudiados se encuentran residuos de surfactantes, productos farmacológicos; de cuidado personal, antisépticos, esteroides y hormonas (Pachés, 2009, p. 3-6). La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) los define como sustancias con efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente (Cuenca, 2019, p. 6). Esta definición subraya la importancia de continuar investigando y desarrollado estrategias para su detección, monitoreo y eliminación efectiva de los ecosistemas acuáticos.

#### **2.2.5. Vías de ingreso de contaminantes persistentes y bioacumulables al ecosistema**

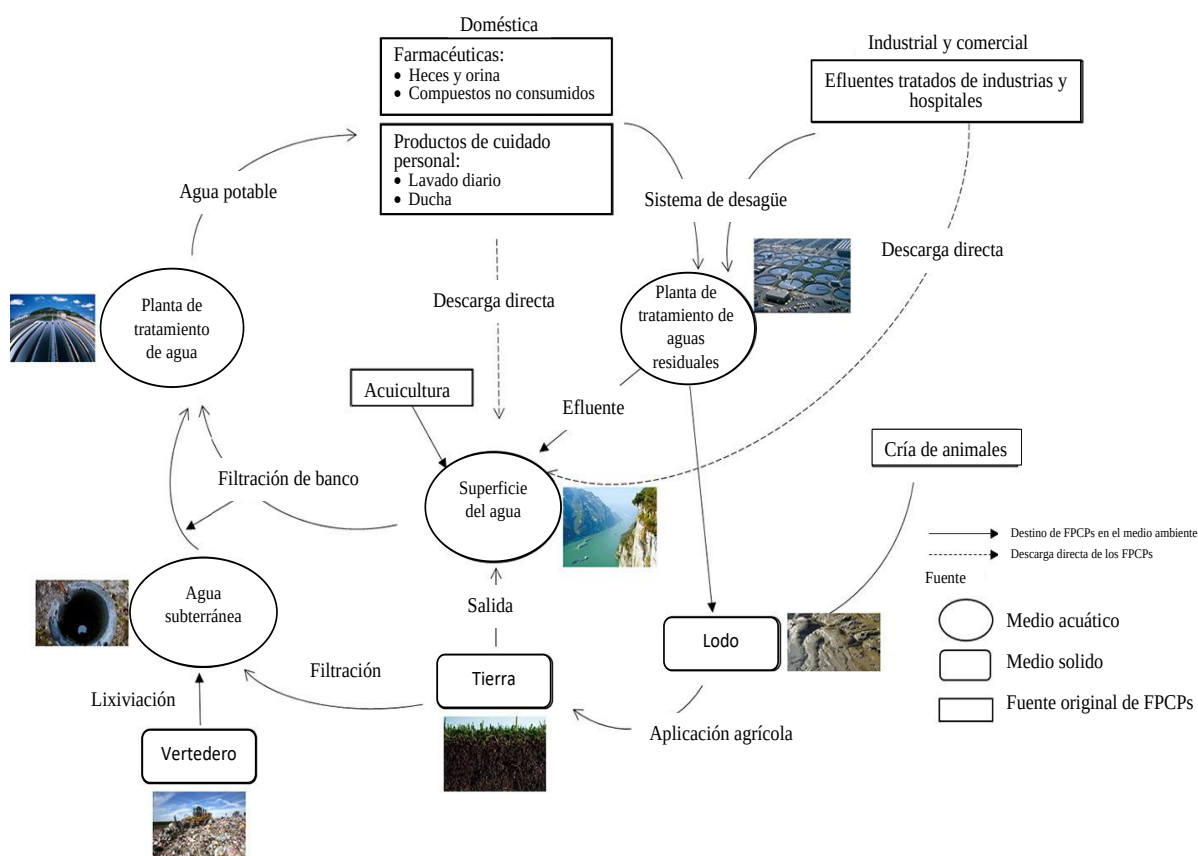
Díaz (2020) describe que “las principales vías de ingreso de contaminantes persistentes al ecosistema incluyen la descarga de efluentes de PTAR, efluentes industriales, eliminación inadecuada de sustancias químicas no utilizadas o caducadas, y derrames accidentales durante la producción o destrucción” (p. 8), como se muestra en la Figura 2. 8.

Los contaminantes emergentes de tipo farmacológicos son absorbidos por humanos o animales. Después de la ingestión, son atacados por metabolitos degradándolos. Sin embargo,

fracciones originales son excretados en forma no metabolizada o como metabolitos activos<sup>2</sup> (Khetan & Collins, 2007), aunque la concentración de estos en el medio ambiente es baja, su entrada ininterrumpida representa una amenaza a largo plazo para los organismos acuáticos y terrestres (Ahmadpour *et al.*, 2021).

**Figura 2. 8**

*Ciclo de ingreso de los contaminantes emergentes al ecosistema*



*Nota.* Ciclo de ingreso de contaminantes emergentes al medio ambiente, mostrando las principales fuentes de emisión y su dispersión en distintos ecosistemas. Recuperado de (Yang *et al.*, 2017).

<sup>2</sup> Forma química de un compuesto que, tras ser transformado en el cuerpo, sigue ejerciendo efectos biológicos o farmacológicos.

### **2.2.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

La DBO es la cantidad de oxígeno disuelto, expresada en miligramos por litro (mg/L), que los microorganismos aeróbicos requieren para descomponer la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de temperatura, tiempo y ausencia de luz. Generalmente, el periodo de incubación estándar es de cinco días a 20 °C, por lo que este parámetro también se conoce como DBO<sub>5</sub> (Lambertz *et al.*, 2024).

La DBO se utiliza como un indicador clave para evaluar la carga orgánica de las aguas residuales y su impacto potencial en cuerpos receptores. Un valor elevado de DBO implica una mayor cantidad de materia orgánica biodegradable y, por tanto, un mayor consumo de oxígeno disuelto, lo que puede afectar negativamente a la vida acuática. No obstante, la DBO no considera compuesto orgánico no biodegradable ni sustancias tóxicas que inhiben la actividad microbiana (Hodaifa *et al.*, 2023).

### **2.2.7. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Según Lambertz *et al.* (2024) la DQO es la cantidad de oxígeno (expresada en mg/L), requerido para oxidar la materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidación química presente en una muestra de agua. Para su determinación, se emplean agentes oxidantes inorgánicos como el permanganato o el dicromato de potasio. La concentración de DQO puede verse afectada por la presencia de compuestos orgánicos de difícil degradación biológica, que sí son susceptibles de oxidación química, así como por reacción de ciertas sustancias inorgánicas con el dicromato, lo que puede incrementar el valor aparente de la DQO.

A diferencia de la DBO, la DQO permite determinar la cantidad total de compuestos susceptibles de ser oxidados, incluyendo aquellos que no son biodegradables. Por esta razón, suele

presentar valores más elevados que la DBO y se utiliza ampliamente como indicador de la carga orgánica total de las aguas residuales, tanto en proceso de tratamiento como en el monitoreo ambiental (Tchobanoglous *et al.*, 2014, p. 602).

### **2.2.8. Relación entre la DBO y la DQO**

Para evaluar si un agua residual es fácilmente degradable o contienen materia orgánica persistente, se calcula la división entre la DBO<sub>5</sub> y la DQO, según la ecuación (1). El valor resultante permite determinar el tipo de agua residual a tratar.

$$IB = \frac{DBO_5}{DQO} \quad (1)$$

La relación DBO<sub>5</sub>/DQO mide el índice de biodegradabilidad (IB) que es un indicador de toxicidad, eficiencia de tratamiento y cumplimiento normativo. Su valor varía de cero a la unidad; para saber si el agua tratada tuvo una biodegradación completa el índice de biodegradabilidad debe ser superior a 0.4 ya que si son inferiores indica que el proceso es no biodegradable; para valores entre los 0.4 y 0.7 indica que el proceso es poco biodegradable; para valores entre 0.7 y 0.8 nos indica que el proceso es biodegradable y los valores mayores a 0.8 nos indica que el proceso es muy biodegradable (Saravanathamizhan & Perarasu, 2021).

El bajo IB de ciertas aguas residuales (DBO<sub>5</sub>/DQO<0.4) se atribuye principalmente a tres factores: la presencia de contaminantes emergentes, compuestos orgánicos recalcitrantes<sup>3</sup> o xenobióticos, sustancias tóxicas que inhiben la actividad microbiana, y moléculas orgánicas complejas que los microorganismos no pueden descomponer fácilmente. Esta característica reduce la eficacia de los tratamientos convencionales para la remoción de contaminantes, lo que hace

---

<sup>3</sup> Los compuestos orgánicos recalcitrantes son aquellos que, debido a su estructura química, resisten la biodegradación y persisten en el ambiente por periodos prolongados

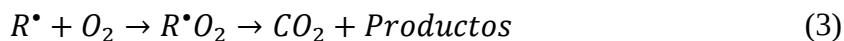
necesario recurrir a métodos avanzados como la oxidación química, la adsorción o tratamientos físico-químicos para lograr una depuración adecuada de estas aguas.

### 2.2.9. *Procesos de oxidación avanzada (POA)*

Los POA son tecnologías eficientes para el tratamiento de aguas residuales provenientes de descargas industriales; esta tecnología se basa en procesos fisicoquímicos donde se forman especies de oxígeno altamente oxidantes como el radical hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ ), que tiene una elevada capacidad oxidante altamente reactiva, produciendo cambios significativos en la estructura química de los contaminantes (Bustillo, 2020, p. 3).

Gonzales & Medina, (2019) cita a GilPavas, (2011, p. 39) quien describe que debido a la alta reactividad del  $\text{OH}^\bullet$ , es posible eliminar o transformar compuestos orgánicos e inorgánicos en  $\text{CO}_2$ , agua e iones inorgánicos, logrando convertirlos en compuestos más biodegradables que sus predecesores. Esto reduce la DQO, carbono orgánico total (COT) y toxicidad en las aguas residuales tratadas. Los POA son adecuados para tratar aguas con compuestos recalcitrantes, tóxicos y contaminantes solubles no biodegradables (Chiva *et al.*, 2017, p. 29).

**Principio Químico de los POA.** El principio fundamental del POA consiste en la formación de compuestos altamente oxidantes, principalmente radicales  $\text{OH}^\bullet$ , quienes oxidan una amplia gama de compuestos orgánicos. Estos radicales atacan moléculas orgánicas, iniciando reacciones que pueden generar una mineralización completa de los contaminantes, convirtiéndolos en dióxido de carbono, agua y sales inorgánicas, como se detalla en la siguiente ecuación:





El radical  $OH^\bullet$  de la ecuación (2) reacciona con el contaminante orgánico y se produce un radical orgánico. Este radical orgánico, en la ecuación (3), reacciona con el oxígeno para producir peroxiradicales que luego se forman una serie de reacciones y hacen posible la mineralización de los contaminantes.



En la ecuación (4) y la ecuación (5), los radicales hidroxilo reaccionan con el compuesto orgánico siguiendo un mecanismo de reacción diferente, ya que existe la transferencia de electrones y se forma un nuevo compuesto (Cabrera & Mucha, 2024, p. 52).

**Ventajas y Desventajas de los POA.** Los procesos de oxidación avanzada frente a los tratamientos convencionales radican en su capacidad para degradar contaminantes complejos de manera más eficiente, para mayor detalle de las ventajas y desventajas, véase la Tabla 2. 1.

**Tabla 2. 1***Ventajas y desventajas de los POA*

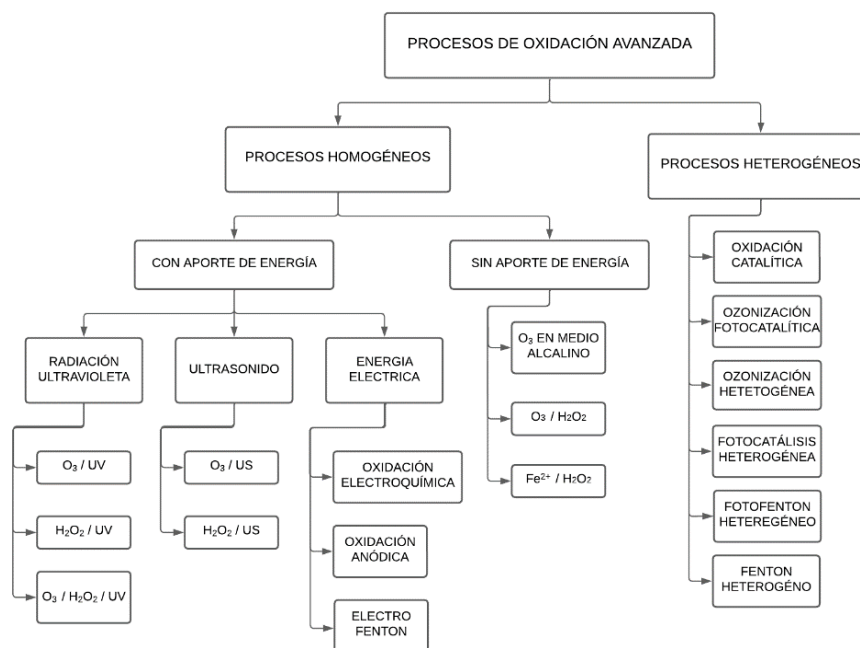
| <b>Ventajas</b>                                                                                          | <b>Desventajas</b>                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Transforman químicamente a los contaminantes hasta conseguir su mineralización completa (destrucción).   | Elevado coste por el uso de productos químicos y equipos especializados.                                                   |
| Minimiza el riesgo a enfermedades relacionadas con la exposición a aguas contaminadas.                   | Los tiempos de reacción pueden ser más prolongados, según el proceso que se aplica y los tipos de contaminantes presentes. |
| Los reactivos utilizados generalmente se descomponen en sub compuestos que no son nocivos para la salud. | La infraestructura y los equipos necesarios para este proceso tienen un costo inicial significativo.                       |
| Eliminan los contaminantes que resisten otros métodos de tratamiento, como el biológico.                 | Se necesita mano de obra especializada para manejar adecuadamente los reactivos y monitorear el proceso.                   |

*Nota.* (Fernandes, 2014)

**Clasificación de los POA.** En la Figura 2. 9, se muestra el esquema de clasificación de los POA.

**Figura 2. 9**

*Esquema de la clasificación de los POA*



*Nota.* Adaptado de (Poyatos, 2010).

### 2.2.10. Radical hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ )

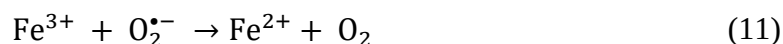
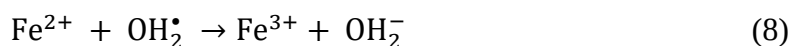
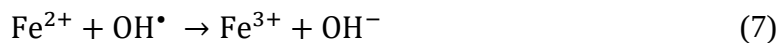
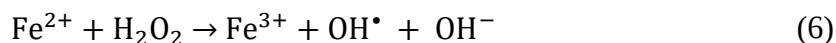
El radical  $\text{OH}^\bullet$  es un compuesto químico que contiene un átomo de oxígeno, un átomo de hidrógeno y un electrón desapareado en el oxígeno que le da su carácter radical. Es altamente reactivo y puede reaccionar con una amplia gama de compuestos. Este radical se genera a través de reacciones de oxidación avanzada; una de ellas es la disociación del peróxido de hidrógeno que, junto a un catalizador, produce radicales  $\text{OH}^\bullet$  (Mahtab *et al.*, 2021; Saldivar & Navarro, 2023).

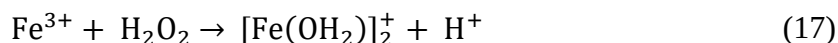
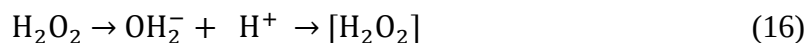
El radical  $\text{OH}^\bullet$  exhibe un alto poder oxidante, con un potencial de 2.8 V, situándose solo por debajo del flúor, lo que resalta su eficacia como agente oxidante en procesos de oxidación avanzada.

### 2.2.11. *Proceso Fenton*

Este proceso recibió su nombre de H. J. H. Fenton en 1894, es una técnica avanzada de oxidación de carácter homogéneo sin aporte de energía. Este método se fundamenta en la interacción entre el  $\text{H}_2\text{O}_2$  y el ion  $\text{Fe}^{2+}$ , generando radicales  $\text{OH}^\bullet$ , que son extremadamente reactivos y no selectivos (Hodaifa *et al.*, 2023). En este proceso, el hierro actúa como un catalizador al ciclar entre varios estados de oxidación (Stefan, 2018).

Las reacciones que se forman en el proceso Fenton, son las siguientes:





En la ecuación (6), el ion  $\text{Fe}^{2+}$  reacciona con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  en un medio ácido, generando el ion  $\text{Fe}^{3+}$ , un ion  $\text{OH}^-$  y un radical  $\text{OH}^\bullet$ , el cual es el agente oxidante clave en este proceso. Este radical es altamente reactivo y tiene la capacidad de degradar contaminantes presentes en el efluente (Miklos *et al.*, 2018).

En la ecuación (7), el ion  $\text{Fe}^{3+}$  es regenerado a ion  $\text{Fe}^{2+}$  al reaccionar con un ion  $\text{OH}^-$ . Este paso es crucial para mantener la continuidad del ciclo de Fenton, permitiendo que el hierro actúe como un catalizador (Miklos *et al.*, 2018).

Después de haberse formado el radical  $\text{OH}^\bullet$  en las primeras ecuaciones, el proceso sigue con una serie de reacciones adicionales que contribuyen a la regeneración del hierro y a la producción de más especies oxidantes. En la ecuación (9), el ion férrico  $\text{Fe}^{3+}$  reacciona nuevamente con  $\text{H}_2\text{O}_2$ , formando un radical perhidroxilo  $\text{OH}_2^\bullet$ , el cual también es capaz de oxidar contaminantes (García, 2007).

Las ecuaciones (11) y (12) representan la reducción de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  mediante especies reactivas como el superóxido  $\text{O}_2^{\bullet-}$ , mientras que el radical perhidroxilo puede descomponerse en agua y oxígeno. Estas reacciones complementarias aseguran que el sistema continúe produciendo radicales libres que contribuyen a la remoción de contaminantes.

Finalmente, la ecuación (17) muestra una reacción que implica la formación de un complejo de hidróxido de hierro,  $[Fe(OH_2)]_2^+$ , cuando el ion férrico reacciona con el  $H_2O_2$ , esto puede afectar la dinámica de la reacción en condiciones operativas, tales como la concentración de hierro y el pH (Miklos *et al.*, 2018).

**Consideraciones operacionales.** A pesar de su eficacia comprobada, el proceso Fenton presenta desafíos operacionales clave. Entre ellos se destaca el control riguroso del pH, que debe mantenerse en el rango óptimo de 2.5 a 3.5 para maximizar la eficiencia del tratamiento. La generación de lodos de hierro es otro reto, pudiendo incrementar los costos de tratamiento y disposición final. Además, los ajustes de pH previos y posteriores al tratamiento son cruciales para evitar efectos en la calidad del efluente final. Aun con estas limitaciones, la implementación de técnicas de mejora continua permite reducir estos inconvenientes (Fernandes, 2014, p. 133).

#### **2.2.12. Tipos de procesos Fenton**

**Proceso Fenton homogéneo.** Ocurre en un medio homogéneo donde tanto el  $Fe^{2+}$  como el  $H_2O_2$  están en solución. Es más eficiente en un intervalo de pH de 2.5 a 3.5, ya que a pH más altos, el hierro tiende a precipitarse como hidróxido férrico ( $Fe(OH)_3$ ), disminuyendo la eficacia del proceso (Hodaifa *et al.*, 2023).

**Proceso Fenton heterogéneo.** Implica la reacción entre  $H_2O_2$  y hierro en forma insoluble, como un mineral o un soporte sólido. Este tipo puede operar eficientemente en un rango más amplio de pH y facilita la reutilización del catalizador (Hodaifa *et al.*, 2023).

#### **Procesos extendidos de Fenton**

- Foto-Fenton: Utiliza luz UV para incrementar la producción de radicales  $OH^\bullet$ .  
Puede usar luz solar, lo que reduce los costos.

- Electro-Fenton: Emplea corriente eléctrica para regenerar  $\text{Fe}^{2+}$  a partir de  $\text{Fe}^{3+}$ , manteniendo el objetivo de la mineralización completa.
- Sono-Fenton: Utiliza ultrasonido para mejorar la formación de radicales hidroxilos mediante cavitación (Hodaifa *et al.*, 2023).

**Procesos tipo Fenton.** Utilizan catalizadores metálicos distintos al hierro o agentes oxidantes diferentes al  $\text{H}_2\text{O}_2$ , manteniendo la química básica del Fenton, pero ampliando las aplicaciones (Hodaifa *et al.*, 2023).

#### ***2.2.13. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales***

La oxidación avanzada es una técnica ampliamente utilizada en el tratamiento de aguas residuales ya que las investigaciones muestran su eficiencia en la remoción de contaminantes resistentes o recalcitrantes. Según Babuponnusami & Muthukumar (2013) se demostró que es efectivo con la remoción de diferentes tipos de contaminantes complejos, incluyendo colorantes, pesticidas y productos farmacéuticos, con tasas de degradación que pueden superar el 90% en condiciones optimizadas (p. 560).

El proceso Fenton es versátil y tiene la posibilidad de aplicarlo en diferentes configuraciones, como el Fenton homogéneo, heterogéneo y foto-Fenton. Además, este método puede integrarse fácilmente con otros procesos de tratamiento, mejorando la eficiencia general del sistema.

Mirzaei (2017) señala que:

La optimización de los parámetros operativos es crucial para maximizar y demostrar que el proceso Fenton puede minimizar los costos asociados con el consumo de reactivos (p. 1243).

Algunas de las ventajas y limitación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales se evidencia en la Tabla 2. 2.

**Tabla 2. 2**

*Ventajas y limitaciones del proceso Fenton*

| <b>Ventajas</b>                                                                                                                                     | <b>Desventajas</b>                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta eficiencia de oxidación: Los radicales hidroxilos son uno de los oxidantes más potentes, capaces de degradar una amplia gama de contaminantes. | Rango de pH limitado: La eficiencia es óptima en un pH de 2 a 4, lo que puede requerir ajustes de pH antes y después del tratamiento.                          |
| Costos relativamente bajos: Tanto el hierro como el $H_2O_2$ son sustancias económicas y accesibles.                                                | Generación de lodos de hierro: La precipitación de hidróxidos de hierro puede generar grandes volúmenes de lodo, representando un desafío para su disposición. |
| Simplicidad operativa: El proceso no requiere equipos extremadamente complejos y puede ser implementado con relativa facilidad.                     | Manejo de peróxido de $H_2O_2$ : Aunque es manejable, el $H_2O_2$ requiere cuidado en su almacenamiento y uso debido a su naturaleza reactiva.                 |
| El proceso opera a presión y temperatura ambiente                                                                                                   | La mineralización de los contaminantes orgánicos, no es completa, pero si un incremento de la biodegradabilidad.                                               |

*Nota.* Las ventajas y limitaciones del proceso Fenton dependen de factores como la naturaleza del efluente y las condiciones de operación. Adaptado de ((Stefan, 2018, ) (Cuesta, 2019)).

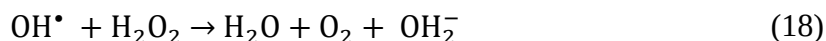
**2.2.14. Parámetros significativos del proceso Fenton**

Los parámetros clave que inciden en el proceso son:



**pH.** Parámetro crítico, con un rango óptimo entre 2.5 y 3.5 para la reacción Fenton homogénea. pH fuera de este rango puede disminuir significativamente la eficacia del proceso. El ajuste y control del pH es fundamental para mantener la eficiencia del proceso Fenton (Fernandes, 2014).

**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.** El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es crucial como agente oxidante. “La cantidad óptima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> obedece a la naturaleza y concentración del compuesto a degradar y de la concentración del sulfato ferroso” (Molina & Risalve, 2023, p. 40). De lo contrario, concentraciones altas pueden aumentar la eficiencia de OH•, favorecido por la mayor producción de radicales hidroxilos, pero también pueden llevar a un exceso que no mejora significativamente el proceso, causando una auto descomposición del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en oxígeno y agua, como se observa en la ecuación (18).



Concentraciones bajas pueden resultar en una oxidación insuficiente. Los experimentos demostraron que múltiples inyecciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en concentraciones más bajas pueden mantener una oxidación efectiva a lo largo del tiempo (Fernandes, 2014).

**Catalizador  $\text{Fe}^{2+}$ .** La concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  actúa como catalizador. Concentraciones altas pueden acelerar la reacción y mejorar la remoción de contaminantes, pero también aumentan la producción de lodos, disminuyendo la eficiencia de la reacción. Concentraciones bajas pueden limitar la generación de radicales  $\text{OH}^\bullet$  y reducir el rendimiento del proceso. Sin embargo, el estudio mostró que el uso de concentraciones más bajas de  $\text{Fe}^{2+}$  con múltiples inyecciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  puede lograr una mejor eficiencia de remoción de contaminantes mientras se reduce la formación de lodos (Fernandes, 2014).

**Agitación.** La agitación es fundamental, especialmente cuando el catalizador está en suspensión. Aunque en procesos homogéneos como el Fenton o foto-Fenton el impacto de la agitación no es tan evidente, su importancia no debe subestimarse. Una agitación adecuada facilita la liberación de  $\text{CO}_2$  generado durante la oxidación total y mejora la oxigenación del medio de reacción al aumentar el contacto con el aire (Salas, 2010).

#### ***2.2.15. Dosis de reactivos en la reacción Fenton***

La eficiencia del proceso Fenton depende de la proporción de los reactivos utilizados. La dosis óptima de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{Fe}^{2+}$  está relacionada con la concentración de los contaminantes presentes, lo que requiere ajustes específicos en función de cada tipo de agua contaminada.

El ajuste de las concentraciones de los reactivos sigue una relación molar entre el  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{Fe}^{2+}$ . Esta proporción puede variar entre 1:2 y 1:10, lo que significa que por cada parte de hierro en la solución puede haber de 2 a 10 partes de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Esto asegura una cantidad suficiente de radicales  $\text{OH}^\bullet$  para atacar los contaminantes sin producir un exceso de reactivos que puedan generar efectos secundarios no deseados, como la formación de subproductos tóxicos (Pignatello *et al.*, 2007). Cabe destacar que el reactivo limitante es el  $\text{H}_2\text{O}_2$  ya que el  $\text{Fe}^{2+}$  actúa como

catalizador y se regenera durante el ciclo de reacción redox, permitiendo su reutilización en la reacción.

En términos prácticos, la cantidad de  $\text{Fe}^{2+}$  comúnmente utilizada está en el rango de 10 a 70 mg/L de agua contaminada, mientras que la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  puede variar desde 10 hasta 1000 mg/L, dependiendo de la relación molar seleccionada. La determinación de estas concentraciones se basa en estudios experimentales para lograr un equilibrio entre la eficacia del proceso de oxidación y la minimización de costos operativos y residuos no reactivos. Un ajuste incorrecto en las dosis podría resultar en un tratamiento ineficiente o en la producción de subproductos peligrosos (Barliza & Torres, 2018).

#### **2.2.16. *Diseño experimental***

Es una metodología de investigación para planificar, realizar y analizar experimentos de manera estructurada, con el objetivo de obtener información válida y confiable del comportamiento de un sistema bajo estudio (Box et al., 2005). En ingeniería química, facilita la identificación y comprensión de las variables que afectan el rendimiento de un proceso, permitiendo optimizar sus condiciones operativas y minimizar la variabilidad (Mondgomery, 2017). Además, esta metodología permite evaluar el efecto combinado de múltiples factores y sus interacciones, utilizando modelos estadísticos para predecir resultados y tomar decisiones fundamentadas (Myers et al., 2009).

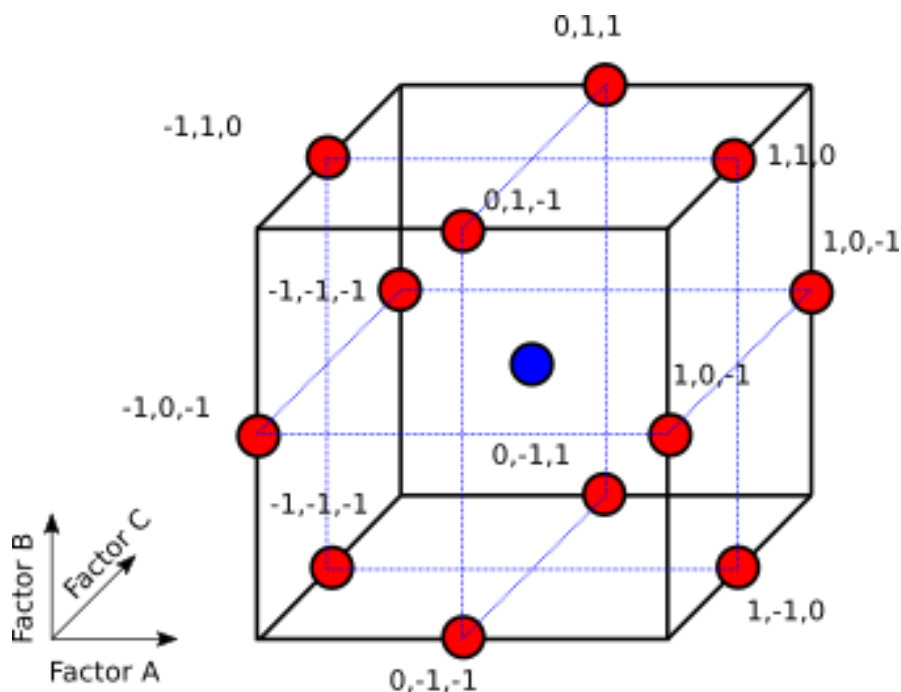
**Diseño Box-Behnken.** Este diseño facilita una estimación eficaz de los coeficientes de primer y segundo orden. La estructura de Box-Behnken representa una superficie de respuesta esférica y rotatoria, que contiene puntos centrales y puntos intermedios entre las esquinas, situados en una esfera. Este diseño puede utilizarse para mejorar diversos procesos físicos y químicos, en los que se establece el número de experimentos en función de las necesidades del proceso (Jaramillo *et al.*, 2013).

Consiste en tres diseños factoriales entrelazados que tienen puntos medios, todos ellos sobre la superficie de una esfera que rodea el centro del diseño. Se ha aplicado para la optimización de varios procesos químicos y físicos; y la cantidad de experimentos se decide en consecuencia. A comparación con otros diseños de superficie de respuesta se ha demostrado que el diseño de Box Behnken es mucho más eficiente que los diseños factoriales completos de 3 niveles (Ferreira *et al.*, 2007).

La Figura 2. 10 muestra la representación gráfica del diseño de Box-Behnken, este diseño se caracteriza por tener combinaciones de tratamientos ubicadas en los puntos medios de los bordes del espacio experimental, y requieren al menos tres factores continuos. En un diseño de tres factores, los puntos del diagrama representan las corridas experimentales a realizar.

**Figura 2. 10**

*Representación gráfica del diseño Box Behnken para tres factores*



*Nota.* Representación de un diseño de Box-Behnken de tres factores, donde cada punto rojo indica una combinación de niveles de los factores en los puntos medios de los bordes del cubo experimental, y el punto azul representa el centro del diseño. Recuperado de *Central Composite Design*, 2024, Develve (<https://develve.net/Central%20Composite%20design.html>).

Para saber el número de experimentos (N) necesarios para el desarrollo del diseño Box Behnken se utiliza la ecuación (19):

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (19)$$

Donde:

k = número de factores

$C_0$  = número de puntos centrales

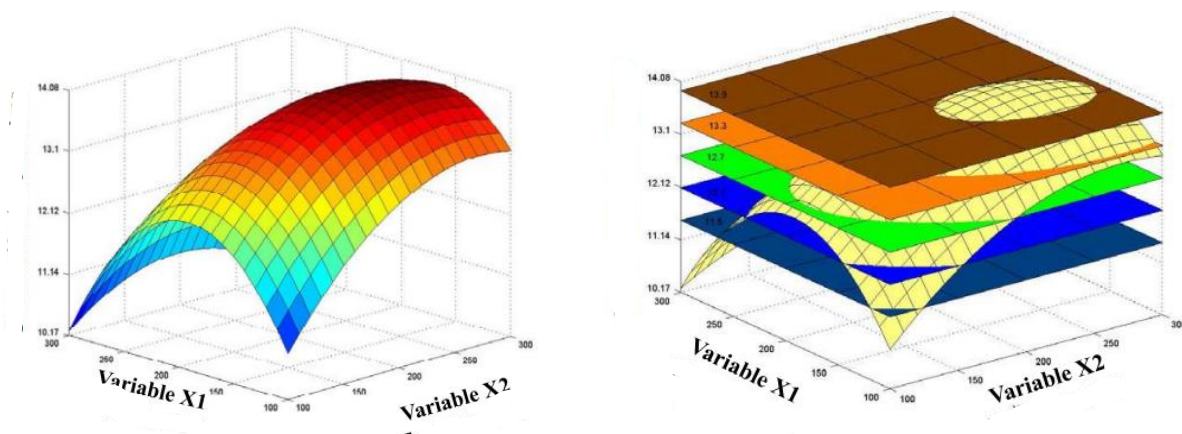
**Metodología de Superficies de Respuesta.** Es una técnica estadística y matemática utilizada para optimizar procesos en los que las respuestas están influenciadas por múltiples variables cuantitativas (Statgraphics, 2023). Esta metodología permite identificar la relación entre las variables independientes y la variable respuesta, con el objetivo de encontrar las condiciones óptimas que maximicen o minimicen el resultado del proceso (Mondgomery, 2017).

En el contexto del tratamiento de aguas residuales mediante el proceso Fenton, la metodología de superficies de respuesta facilita la exploración de las regiones experimentales de forma detallada, evaluando el efecto de los reactivos (Box et al., 2005). Además, proporciona un enfoque sistemático para modelar y analizar problemas complejos, permitiendo representar gráficamente la superficie de respuesta en un espacio tridimensional, visualizando la interacción entre los factores y su impacto en la remoción de contaminantes (Mondgomery, 2017).

La superficie de respuesta tridimensional es una representación gráfica que permite visualizar la relación entre dos variables independientes y una variable respuesta en un espacio tridimensional, facilitando la identificación de patrones de comportamiento y la ubicación de puntos óptimos en el proceso bajo estudio (Mondgomery, 2017). Por otro lado, el gráfico de contorno muestra las curvas de nivel de esta superficie en un plano bidimensional, permitiendo observar de manera más clara las combinaciones de variables que generan la misma respuesta y simplificando la identificación de regiones de interés para la optimización, como se puede visualizar en la Figura 2. 11. Ambos gráficos son herramientas esenciales en la metodología de superficie de respuesta, ya que complementan la comprensión visual de las interacciones entre factores y su influencia en la variable respuesta.

**Figura 2. 11**

*Interpretación grafica de superficies de respuesta*



*Nota.* Gráfico de superficies de respuesta, mostrando en el lado izquierdo una superficie tridimensional y en el lado derecho un gráfico de contorno, utilizados para representar la relación entre las variables del proceso. Tomado de Metodología de la Superficie de Respuesta (p. 6 y p. 7), por Goicoechea, 2016, [https://www.fbc.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/wp-content/uploads/2016/06/4-RSM\\_Mezclas\\_2018.pdf](https://www.fbc.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/wp-content/uploads/2016/06/4-RSM_Mezclas_2018.pdf).

### **2.2.17. Marco Conceptual**

**Agua residual.** Son aguas cuyas propiedades iniciales han sido alteradas por actividades humanas y que necesitan un tratamiento previo para ser usadas o vertidas al ambiente (OEFA, 2014).

**Concentración.** La relación de una sustancia disuelta o contenida en una cantidad dada de otra sustancia (MINAM, 2016).

**Efluente.** Es el agua que ha sido tratada y purificada en una PTAR antes de ser liberada al ambiente (Gutiérrez *et al.*, 2022).

**Fenton.** Proceso de oxidación avanzada que se usa principalmente para el tratamiento de aguas residuales (Fernandes, 2014).

**Radical hidroxilo.** Es una molécula diatómica con una molécula de oxígeno y una de hidrógeno con un electrón desapegado listo para reaccionar (Saldivar & Navarro, 2023).

**Catalizador.** Es una sustancia que aumenta o reduce la velocidad de una reacción química sin consumirse ni alterarse permanentemente en el proceso (Piraque & Parroquiano, 2021).

**Reacción redox.** Es un tipo de reacción química en la que hay una transferencia de electrones entre dos especies. En estas reacciones una sustancia se oxida y otra se reduce (Deng & Zhao, 2015).

## **2.3. Hipótesis de la investigación**

### **2.3.1. Hipótesis general**

El proceso de oxidación Fenton logra remover eficientemente la materia orgánica no biodegradable del efluente de la PTAR San Jerónimo.



### 2.3.2. *Hipótesis específica*

- Las características fisicoquímicas que presenta el efluente de la PTAR San Jerónimo a tratar, indican la presencia de materia orgánica residual no biodegradable.
- La remoción de materia orgánica depende significativamente de la dosis de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), catalizador sulfato de hierro ( $FeSO_4$ ) y pH.
- Es posible realizar un modelo matemático que relacionen las variables de estudio.
- Se podrá determinar los parámetros de  $H_2O_2$ ,  $FeSO_4$  y pH, que logran mayor remoción de DQO.

### CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el año 2024 en tres laboratorios seleccionados por su disponibilidad de equipos e instrumentos necesarios para alcanzar los objetivos propuestos para el tratamiento de la muestra, los cuales fueron:

- Laboratorio de Tecnologías de la Escuela Profesional de Ingeniería Química
- Laboratorio de Ciencias Naturales, Aguas, Suelos, Minerales y Medio Ambiente de MC QUIMICALAB.
- Laboratorio de Control de Calidad de la PTAR San Jerónimo.

La ubicación de la PTAR San Jerónimo se muestra en la Figura 3. 1.

**Figura 3. 1**

*Ubicación de la PTAR San Jerónimo*



*Nota.* Observación visual obtenida mediante navegación web que muestra la ubicación exacta de la PTAR de San Jerónimo en relación con las áreas circundantes. Adaptado de *Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Jerónimo, Cusco, Perú* [Fotografía], por Google, 2024, (<https://www.google.com/maps/place/PTAR+San+Jeronimo>).

### **3.1. Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación es experimental. Se realizó un conjunto de experimentos controlados con el objetivo de evaluar la efectividad del proceso Fenton. Estos experimentos permitieron manipular variables clave como concentración de  $FeSO_4$ , concentración de  $H_2O_2$  y pH, con el fin de determinar su influencia en la remoción de la materia orgánica residual de las muestras, asegurando un enfoque sistemático y riguroso para mejorar las condiciones de operación del proceso Fenton (Mousalli-Kayat, 2016).

### **3.2. Tipo de investigación**

El tipo de investigación es aplicada, este tiene como objetivo resolver un problema práctico relacionado con el tratamiento de efluentes mediante la implementación de soluciones basadas en el conocimiento científico, que contribuyen a mejorar los procesos de remoción de contaminantes (UNE, 2013).

### **3.3. Nivel de la investigación**

En cuanto al nivel es explicativo, ya que analizó las causas del fenómeno de remoción de materia orgánica de la muestra mediante el Proceso Fenton, buscando establecer relaciones causa-efecto entre las variables estudiadas para comprender su impacto en el tratamiento (Mejía et al., 2018).

### **3.4. Enfoque de la investigación**

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, puesto que se utilizó la recopilación de datos numéricos para alcanzar los objetivos planteados. Mediante la medición precisa y el estudio estadístico de variables como la DQO, se buscó determinar patrones de comportamiento y validar

teorías relacionadas con la efectividad del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales (Pandey & Pandey, 2015).

### **3.5. Muestra**

Para la investigación se utilizó como muestra el agua del efluente de la PTAR de San Jerónimo ubicado en la región del Cusco.

### **3.6. Materiales**

#### **3.6.1. *Materiales de vidrio y otros***

- **Para la obtención y traslado de muestras**
  - Baldes de plástico de 20 litros
  - Jarra plástica de 2.5 litros
  - Frascos de vidrio color ámbar de 250 mL
  - Gel pack refrigerante
  - Cooler de 15 litros
- **Para la experimentación Fenton en laboratorio**
  - Vasos de precipitado de 250 mL y 1000 mL
  - Fiola de 100 mL
  - Bagueta de vidrio
  - Luna de Reloj
  - Pipeta de 1 mL y 5 mL
  - Piseta
  - Espátula de laboratorio
  - Embudo de vidrio

- Papel filtro

- **Para el análisis de resultados**

- Tubo de ensayo
- Pipeta de 1 mL
- Vaso de precipitado de 50 mL

**3.6.2. Reactivos**

- Agua destilada
- Sulfato de Hierro Heptahidratado 99% HiMedia N° CAS: 7782-63-0
- Peróxido de Hidrógeno 30% Merck N° CAS 4852-96-1
- Ácido Sulfúrico 95-97% Merck N° CAS 7664-93-9
- Hidróxido de Sódio 99% Merck N° CAS 1310-73-2

**3.6.3. Equipos**

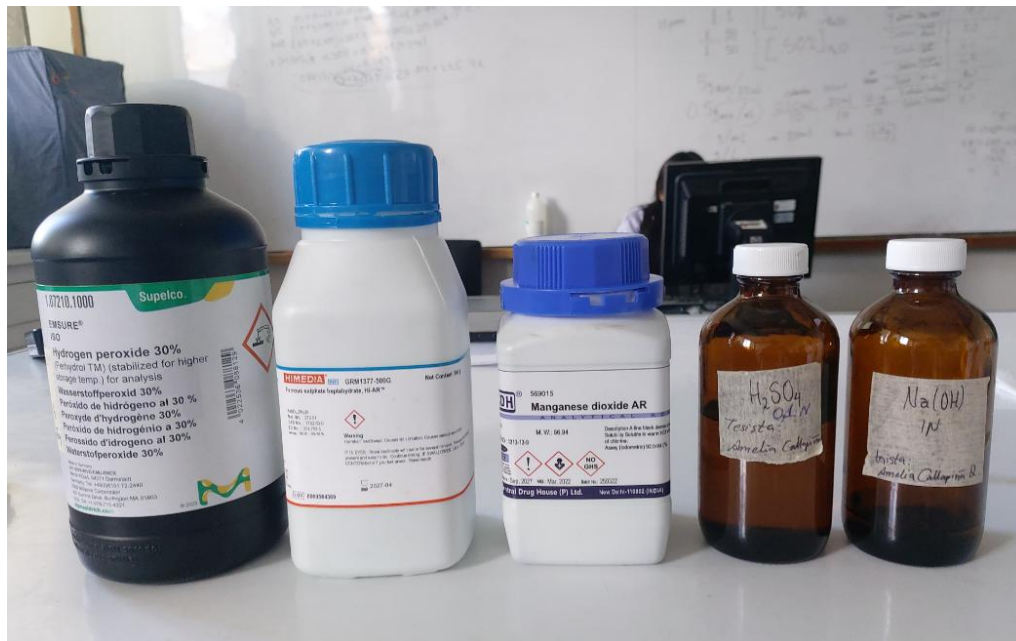
- Prueba de jarras, DAIHAN, 3T-MGC
- Digestor para viales de DQO, 115V, HI839800
- Espectrofotómetro UV-Vis, SP-UV1100

**3.6.4. Instrumentos**

- Termómetro digital con espiga 15 cm
- Cronometro digital
- pH metro, Hach, 50075
- Turbidímetro, Lutron, Luton TU2016
- Balanza analítica, Eurotech, FSH-H22043

**Figura 3. 2**

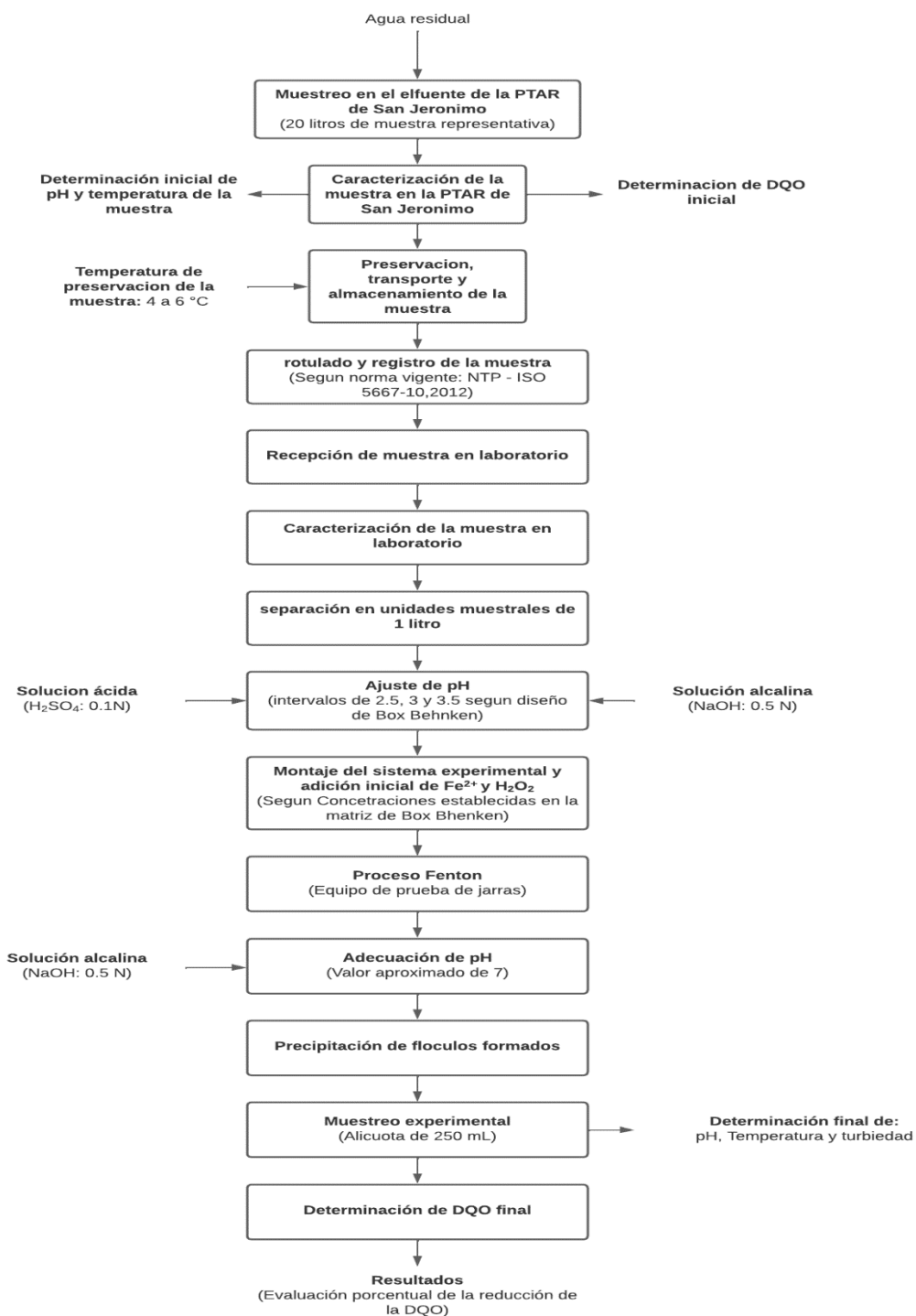
*Vista de los reactivos utilizados en la experimentación*



### 3.7. Procedimientos

La ilustra el esquema de los procedimientos de la investigación, destacando las etapas clave de la metodología empleada.

Los experimentos se realizaron con un sistema discontinuo o batch a presión y temperatura ambiente de la ciudad del Cusco (0.72 atm y 15 °C), a continuación, se detalla las etapas del procedimiento experimental:

**Figura 3. 3***Diagrama de flujo experimental*

### **3.7.1. Monitoreo de campo y obtención de muestra**

Se realizó el reconocimiento y evaluación del punto de descarga del efluente de la PTAR de San Jerónimo, donde se evidenció la dificultad y el riesgo asociados a la obtención de la muestra. Debido a estas condiciones, se decidió utilizar un recipiente sumergible con una cuerda de 5 metros para recolectar la muestra de manera segura. Todo el procedimiento se llevó a cabo utilizando el equipo de protección personal (guantes, casco, bata, lentes y barbijo) adecuado y bajo la cobertura del seguro complementario de trabajo de riesgoso (SCTR). Adicionalmente, se consideró conveniente realizar mediciones en campo de los parámetros como la temperatura, pH y turbidez (VIVIENDA, 2013, p. 8). Esta actividad se muestra en la Figura 3. 4.

El muestreo fue aleatorio simple, siguiendo el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA. La muestra se obtuvo en contraflujo, manteniendo un punto medio respecto a las paredes del canal de salida, el horario de obtención de la muestra fue entre las 08:00 y 09:00 horas para evitar la interferencia de la actividad fotosintética que ocurre en las horas de mayor radiación solar. Cada toma de muestra se inició enjuagando tres veces el recipiente sumergible. Luego, fue vertida en dos baldes de 15 litros cada uno, llenándolos hasta los 12 litros, sumando un total de 24 litros. Este volumen se incrementó en un 20% respecto a los 20 litros requeridos como volumen representativo, en cumplimiento con el “Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales”, el cual recomienda exceder el volumen de la muestra en un 20% (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2016). Posteriormente la muestra fue refrigerada a una temperatura de 4 °C y almacenada protegiéndola de la luz solar (Babuponnusami & Muthukumar, 2013; VIVIENDA, 2013, p. 6).

Las tomas de muestra se realizaron en 5 días diferentes para el cumplimiento de los objetivos; el primer muestreo se realizó para la caracterización fisicoquímica, la muestra fue



derivado al laboratorio de MC QUIMICALAB, posterior a ello se tomó la segunda muestra para la prueba exploratoria que se realizó en el laboratorio de Tecnologías de la Facultad de Ingeniería de Procesos. Y finalmente, se recolectó tres muestras en fechas diferentes para la aplicación del proceso Fenton, dos muestras fueron aplicados en el laboratorio de Tecnologías de la Facultad de Ingeniería de Procesos y la última fue realizada en el laboratorio de control de calidad de la PTAR San Jerónimo.

### **Figura 3. 4**

*Recolección de la muestra en el efluente de la PTAR y medición de parámetros iniciales*



#### **3.7.2. Caracterización fisicoquímica de la muestra**

La caracterización fisicoquímica de la muestra se realizó con el objetivo de obtener un perfil detallado de sus propiedades fisicoquímicas. Estos análisis proporcionaron una visión

integral de la composición y calidad del efluente de la PTAR de San Jerónimo. Los resultados obtenidos permitieron identificar la concentración de contaminantes presentes.

Para la caracterización de la muestra se preparó y trató siguiendo estrictamente las guías de laboratorio de MCQUIMICALAB, los procedimientos se detallan para cada parámetro a continuación:

**Aceites y grasas.** Este proceso comenzó con la recolección de una muestra de 250 mL, la cual se colocó en un dedal de extracción dentro del equipo Soxhlet. El aparato consta de un balón de destilación, un extractor y un condensador. Se utilizó benceno como solvente orgánico, el cual se calentó en el balón de destilación mediante una coccinilla eléctrica. El proceso de extracción se mantuvo durante 4 horas, permitiendo que el solvente circule continuamente a través de la muestra, disolviendo y arrastrando las grasas y aceites presentes.

Tras la extracción, se recuperó el solvente que contiene las grasas y aceites disueltos. Posteriormente, se procedió a evaporar el solvente, dejando únicamente el residuo de grasas y aceites extraídos. Este residuo se pesó utilizando una balanza digital de precisión. Finalmente, se realizó el cálculo de la cantidad de grasas y aceites en la muestra original, calculando en el peso del residuo obtenido y el volumen inicial de la muestra. Este método proporcionó una medida cuantitativa necesaria de la concentración de grasas y aceites en el efluente.

**Demanda Química de Oxígeno.** El proceso comenzó con la preparación de viales que contenían una mezcla de reactivos: el  $K_2Cr_2O_7$  que actúa como el agente oxidante; el  $Ag_2SO_4$ , que es el catalizador, y el  $HgSO_4$  que ayuda a eliminar interferencias de cloruros. A este vial se le agregó un volumen de 2 mL de la muestra de agua residual, que luego se agitó para homogenizar la mezcla. Por otro lado, el reactor Hach se precalentó hasta llegar a una temperatura de 150 °C, y los viales fueron colocados a esta temperatura durante 2 horas donde se produjo una oxidación completa de la materia orgánica presente en la muestra (HACH COMPANY, 2019).

Finalmente, los viales se dejaron enfriar durante 30 minutos para la lectura en el espectrofotómetro<sup>4</sup>, que midió la cantidad de dicromato no consumido en la reacción. Esta lectura se correlaciona directamente con la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación de la materia orgánica, proporcionando así el valor de la DQO de la muestra (HANNA Instruments S.A.S., 2023).

**Demanda Bioquímica de Oxígeno.** Para el análisis de DBO se utilizó la prueba estándar, que consiste en incubar la muestra de agua durante 5 días a una temperatura constante de 20 °C; la muestra se mantuvo en la oscuridad para prevenir la producción de oxígeno por fotosíntesis. Inicialmente, se realizó la medición del oxígeno disuelto y, después del periodo de 5 días, se volvió a medir la cantidad de oxígeno disuelto.

Para el cálculo de la  $DBO_5$  se realizó la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el final, considerando un factor de dilución. Este factor de dilución es necesario porque las muestras de agua residual a menudo se diluyen con agua de dilución especialmente preparada para asegurar

---

<sup>4</sup> Instrumento utilizado para medir la absorción de una muestra a una longitud de onda específica, permitiendo cuantificar la concentración de un análisis en solución basándose en la ley de Beer-Lambert.

que haya suficiente oxígeno disponible durante todo el periodo de incubación (Lambertz *et al.*, 2024).

**Potencial de hidrógeno.** Para la lectura de pH, se hizo uso de un pH metro portátil. Primero, se enjuagó el electrodo del pH metro con agua destilada para eliminar cualquier residuo o contaminante que pudiera alterar la precisión de la medición. Luego, se secó suavemente el electrodo para evitar la dilución de la muestra y asegurar una lectura precisa. A continuación, el electrodo limpio y seco se sumergió en la muestra, la cual se mantuvo en agitación constante para asegurar que la solución estuviera homogénea. Después de unos segundos, se obtuvo el valor de pH.

**Temperatura.** Se tomó una muestra de 500 mL en un vaso de precipitado limpio. El recipiente permitió la inmersión del termómetro sin riesgo de derrame. Antes de proceder con la lectura, se enjuagó el termómetro con agua destilada y se sumergió en la muestra del agua. Se esperó a que se estabilizara y se registró la temperatura.

**Sólidos totales en suspensión.** Este parámetro se determinó tomando una muestra de 250 mL, que pasó a un proceso de filtración utilizando el papel filtro Whatman, diseñado específicamente para retener partículas sólidas. Una vez que se completó la filtración, el papel filtro con los sólidos retenidos se trasladó a una estufa eléctrica. Allí, se sometió a un proceso de secado a una temperatura de 106 °C durante 60 minutos, esto con la finalidad de eliminar toda la humedad restante en los sólidos. Finalmente, después del secado, el papel filtro con los sólidos secos se pesó utilizando una balanza digital de precisión. La diferencia entre el peso inicial del papel filtro y el peso final después del secado proporcionó la cantidad de sólidos en suspensión presentes en la muestra original de 250 mL.

### 3.7.3. Remoción de materia orgánica total

Para la remoción de materia orgánica total se aplicó del proceso Fenton, primeramente, se analizó a la DQO inicial a la muestra obtenida del efluente, seguidamente se separó en vasos de precipitado en volúmenes iguales de 1 litro para posteriormente acondicionarlos a un pH ácido utilizando  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1N por cada litro de muestra se le añadieron 12 ml aproximadamente, dependiendo de los niveles de la experimentación, midiendo el pH continuamente con un pHmetro portátil. El procedimiento se muestra en la Figura 3. 5.

**Figura 3. 5**

*Medición de la DQO inicial y acidificando cada muestra con  $\text{H}_2\text{SO}_4$*



*Nota.* En la figura izquierda se visualiza las muestras después de reaccionar a los reactivos para la medición de la DQO inicial y en la derecha la acidificación de las muestras controlado minuciosamente por un pHmetro.

Las muestras de 1 litro de agua residual, ya acidificadas, se trasladaron al equipo de prueba de jarras. Se añadió la cantidad correspondiente de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , según los niveles de experimentación, a cada vaso de precipitado y se agitó la mezcla a 100 rpm durante 5 minutos para garantizar su disolución y homogenización completa. Este procedimiento se puede observar en la Figura 3. 6. Luego, se incorporó el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , igualmente en diferentes concentraciones según los niveles de experimentación, iniciando la reacción del proceso Fenton ya que es ahí cuando se generan los radicales  $\text{OH}^\bullet$ . La agitación continuó a 150 rpm durante 60 minutos. Durante este periodo, se verificó el pH cada 20 minutos y, en caso de desviaciones del valor establecido, se ajustó inmediatamente utilizando  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1 N o  $\text{NaOH}$  0.5 N, según fuera necesario.

**Figura 3. 6**

*Pesado del catalizador sulfato y disolución en cada muestra acidificada en la prueba de jarras*



*Nota.* En la figura izquierda se muestra el pesado del catalizador sulfato de hierro y en la derecha el equipo de prueba de jarras disolviendo el catalizador, previo a la experimentación Fenton.

Después de finalizar los 60 minutos de reacción del proceso Fenton en la prueba de jarras, se redujo la velocidad de agitación a 30 rpm. Se añadieron entre 12 y 15 mL de NaOH 0.5 N con el fin de aumentar el pH a 7, lo que promovió la generación de material insoluble. Tras este proceso, los vasos de precipitados fueron retirados inmediatamente del equipo de agitación a una mesa donde se dejó precipitar por una hora, aclarando significativamente la muestra y reduciendo la turbidez. Este procedimiento se puede observar en la Figura 3. 7.

**Figura 3. 7**

*Neutralización de la muestra post experimentación y precipitación de material en suspensión*



*Nota.* En la figura izquierda se visualiza las muestras después de ser acondicionados con  $H_2O_2$  y en la derecha las mismas muestras después de haber sido precipitado por 1 hora.

La precipitación se debe a la insolubilidad del catalizador hierro a pH neutro. Al aumentar el pH, los iones de hierro ( $Fe^{2+}$  o  $Fe^{3+}$ ) se transforman en hidróxidos de hierro, los cuales son insolubles en estas condiciones, lo que genera la precipitación. La transparencia de la muestra dependerá del tiempo de decantación y del proceso de filtrado posterior (Gulkaya *et al.*, 2006). El propósito de neutralizar las muestras a un pH igual a 7 es asegurar que el efluente tratado cumpla con las normas ambientales vigentes para su disposición final. Según el Decreto Supremo N° 003-



2010-MINAM, los efluentes deben tener un pH entre 6.5 y 8.5 para estar dentro de los límites permisibles y evitar efectos adversos en el medio ambiente (MINAM, 2010).

Al final de toda la experimentación, se recolectaron 250 mL de la muestra tratada para el análisis de la DQO residual; la prueba exploratoria, experimentación principal y la primera replica fueron trasladados al laboratorio de MCQUIMICALAB, donde se realizó el análisis. Por otro lado, la segunda replica fue procesada y analizada directamente en la PTAR de San Jerónimo. Este procedimiento se muestra en Figura 3. 8. Todas las muestras fueron evaluadas siguiendo el procedimiento descrito en el ítem 3.7.2.

### Figura 3. 8

#### *Análisis de la DQO residual*



*Nota.* En la figura izquierda se muestra el acondicionamiento de las muestras en el digestor para posteriormente ser analizado en el espectrofotómetro la DQO residual, según la figura derecha.



**Prueba exploratoria del proceso Fenton.** La prueba exploratoria se realizó como una pre - experimentación del proceso Fenton con el objetivo de determinar, de manera preliminar, las concentraciones de reactivos que logran una mayor remoción de la materia orgánica total. Para ello, se llevaron a cabo 5 experimentos, con rangos amplios de concentración, como se ilustra en la Tabla 3. 1. Todas las muestras se sometieron a un pH de 3, debido a que el número de experimentaciones fue limitado. Los procedimientos de la experimentación son los mismos que los que se describieron anteriormente.

**Tabla 3. 1**

*Concentración de reactivos para la prueba exploratoria*

| No. | Concentración           | Concentración                        | pH          | Tiempo |
|-----|-------------------------|--------------------------------------|-------------|--------|
|     | Fe <sup>2+</sup> (mg/L) | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L) | recomendado | (min)  |
| 1   | 10                      | 100                                  | 3           | 60     |
| 2   | 10                      | 200                                  | 3           | 60     |
| 3   | 30                      | 200                                  | 3           | 60     |
| 4   | 30                      | 300                                  | 3           | 60     |
| 5   | 60                      | 500                                  | 3           | 60     |

*Nota.* Concentraciones de Fe<sup>2+</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> usadas en la prueba exploratoria del proceso Fenton, con pH recomendado de 3 y un tiempo de reacción de 60 minutos.

Con base en los resultados de la prueba exploratoria, se seleccionaron dos de las cinco experimentaciones que obtuvieron la mayor remoción de la materia orgánica total. Con la finalidad de ser utilizados en el Diseño de Box Behnken.

**Experiencias del Proceso Fenton.** Para realizar la experimentación del proceso Fenton se utilizó el diseño de Box Behnken utilizando para ello los niveles máximos ( $X_3$ ,  $Y_3$  y  $Z_3$ ), mínimos ( $X_1$ ,  $Y_1$  y  $Z_1$ ) y un valor intermedio entre cada nivel de las variable independiente ( $X_2$ ,  $Y_2$  y  $Z_2$ ), seleccionados en la prueba exploratoria, como se muestra en la Tabla 3. 2, los experimentos se realizaron para obtener el efecto de estas variables sobre la remoción de la DQO.

**Tabla 3. 2**

*Código de niveles del Diseño Box Behnken para aplicación del proceso Fenton*

| Variable independiente | Unidades | Símbolos | Código de niveles |       |       |
|------------------------|----------|----------|-------------------|-------|-------|
|                        |          |          | -                 | 0     | +     |
| $\text{Fe}^{2+}$       | mg/L     | $X_i$    | $X_1$             | $X_2$ | $X_3$ |
| $\text{H}_2\text{O}_2$ | mg/L     | $Y_i$    | $Y_1$             | $Y_2$ | $Y_3$ |
| pH                     | 0 - 14   | $Z_i$    | $Z_1$             | $Z_2$ | $Z_3$ |

Variable de respuesta: %DQO<sub>r</sub>

*Nota.* Los niveles de las variables se definieron para analizar su efecto en la reducción de la DQO en el proceso Fenton.

En la presente investigación se consideran tres factores: concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , concentración de  $\text{FeSO}_4$  como catalizador, y pH. Según la fórmula del diseño de Box-Behnken, ecuación (19), esto requiere un total de 15 experimentos, de los cuales 12 corresponden a combinaciones de niveles de los factores ubicadas en los puntos medios de los bordes del espacio experimental y 3 experimentos adicionales son puntos centrales. Además, se realizaron 2 réplicas para mejorar la confiabilidad de los resultados. Previo a la experimentación se midió la DQO

inicial (DQO<sub>0</sub>) de cada grupo experimental. En la Tabla 3. 3 se verifica la matriz de experimentación para la aplicación del proceso Fenton y los resultados de la DQO final (DQO<sub>f</sub>).

**Tabla 3. 3**

*Tabla de contenido de dosis reactivos en la experimentación Fenton*

| <b>Orden<br/>corrida</b> | <b>Orden<br/>estadístico</b> | <b>Fe<sup>2+</sup><br/>(ppm)</b> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub><br/>(ppm)</b> | <b>pH</b>      | <b>DQO<sub>f</sub><br/>(1)</b> | <b>DQO<sub>f</sub><br/>(2)</b> | <b>DQO<sub>f</sub><br/>(3)</b> |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>1</b>                 | 2                            | X <sub>3</sub>                   | Y <sub>1</sub>                              | Z <sub>2</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>2</b>                 | 8                            | X <sub>3</sub>                   | Y <sub>2</sub>                              | Z <sub>3</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>3</b>                 | 12                           | X <sub>2</sub>                   | Y <sub>3</sub>                              | Z <sub>3</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>4</b>                 | 15                           | X <sub>2</sub>                   | Y <sub>2</sub>                              | Z <sub>2</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>5</b>                 | 5                            | X <sub>1</sub>                   | Y <sub>2</sub>                              | Z <sub>1</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>6</b>                 | 9                            | X <sub>2</sub>                   | Y <sub>1</sub>                              | Z <sub>1</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>7</b>                 | 14                           | X <sub>2</sub>                   | Y <sub>2</sub>                              | Z <sub>2</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>8</b>                 | 11                           | X <sub>2</sub>                   | Y <sub>1</sub>                              | Z <sub>3</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>9</b>                 | 13                           | X <sub>2</sub>                   | Y <sub>2</sub>                              | Z <sub>2</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>10</b>                | 10                           | X <sub>2</sub>                   | Y <sub>3</sub>                              | Z <sub>1</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>11</b>                | 6                            | X <sub>3</sub>                   | Y <sub>2</sub>                              | Z <sub>1</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>12</b>                | 4                            | X <sub>3</sub>                   | Y <sub>3</sub>                              | Z <sub>2</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>13</b>                | 3                            | X <sub>1</sub>                   | Y <sub>3</sub>                              | Z <sub>2</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>14</b>                | 7                            | X <sub>1</sub>                   | Y <sub>2</sub>                              | Z <sub>3</sub> | -                              | -                              | -                              |
| <b>15</b>                | 1                            | X <sub>1</sub>                   | Y <sub>1</sub>                              | Z <sub>2</sub> | -                              | -                              | -                              |

*Nota.* Esta tabla describe el número de experimentaciones y el orden estadístico a utilizarse para la experimentación.

Teniendo los resultados de la  $DQO_0$  y  $DQO_f$  se procedió a hallar el porcentaje de reducción de la DQO, aplicando para ello la ecuación (20):

$$\%DQO_r = \frac{DQO_0 - DQO_f}{DQO_0} * 100 \quad (20)$$

Donde:

$DQO_0$ : Es la demanda química de oxígeno antes del tratamiento.

$DQO_f$ : Es la demanda química de oxígeno después del tratamiento.

$\%DQO_r$ : Es el porcentaje de DQO removido.

Los resultados del  $\%DQO_r$  serán analizados estadísticamente.

Después de obtener los resultados del porcentaje de remoción de DQO ( $\%DQO_r$ ), que incluye la reducción de todos los contaminantes orgánicos, entre ellos los contaminantes emergentes, estos fueron analizados mediante herramientas estadísticas.

#### **3.7.4. Modelo matemático**

Para determinar el modelo matemático del Proceso Fenton en la experimentación, se determinó en función de las variables de estudio, aplicando el Software Minitab V 19.0. Primeramente, se analizó los efectos estimados del  $\%DQO_r$ , estos resultados se organizaron en gráficos (efectos principales, efectos de interacción y Pareto) y tabla de efectos, permitiendo una visualización clara de las tendencias y relaciones entre las variables estudiadas, como la concentración de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  y  $H_2O_2$ , así como el pH, conforme al diseño experimental de Box-Behnken.

A través de un análisis estadístico de varianza (ANOVA), se determinó la significancia de los parámetros evaluados en el proceso Fenton, permitiendo identificar los factores que influyen de manera decisiva en la eficiencia de remoción de la DQO en el efluente. Este análisis de regresión múltiple permitió desarrollar un modelo matemático que describa la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones experimentales. Adicionalmente se realizaron gráficas de superficie de respuesta tridimensional y de contorno donde se visualizó la influencia de cada uno de las variables en la remoción de la DQO, logrando así determinar una remoción significativa de la DQO, promoviendo un tratamiento eficiente y sostenible.

#### ***3.7.5. Parámetros del proceso***

Los parámetros del proceso se determinaron en función de las condiciones que permitieron una mayor remoción de DQO, basándose en los resultados obtenidos de los 45 experimentos realizados.

### **3.8. Consideraciones éticas**

Esta tesis denominada “Tratamiento de los efluentes de la PTAR de San Jerónimo mediante el proceso Fenton”, ha sido desarrollada por los autores bajo un estricto cumplimiento de los principios éticos y de integridad científica. Los autores se comprometen a garantizar la originalidad y la veracidad de los datos presentados; así como, a reconocer y citar adecuadamente los estudios previos que hayan servido de base para la investigación.

Este trabajo se ajusta al Código de Ética para la Investigación en la UNSAAC, según lo estipulado en la Resolución N° CU- 053-2016-UNSAAC. Asimismo, se declara que no se ha incurrido en plagio, falsificación o manipulación de datos. La contribución de terceros ha sido

debidamente acreditada, y las fuentes consultadas han sido referenciadas conforme a las normas APA 7ma edición.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización fisicoquímica de la muestra

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de la muestra sin tratamiento se visualizan en la Tabla 4. 1.

**Tabla 4. 1**

*Caracterización fisicoquímica del efluente de la PTAR de San Jerónimo*

| Parámetro                     | Unidad | Datos experimentales |
|-------------------------------|--------|----------------------|
| Aceites y grasas              | mg/L   | 5                    |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg/L   | 75                   |
| Demanda Química de Oxígeno    | mg/L   | 180                  |
| pH                            | 1 -14  | 7.8                  |
| Sólidos Totales en Suspensión | mg/L   | 150                  |
| Temperatura                   | °C     | 20                   |

En la investigación de Choque (2024) sobre la PTAR de Viacha en Bolivia, se reportaron valores en el efluente de temperatura de 16.27 °C, pH 7.92, sólidos totales en suspensión, DQO y DBO<sub>5</sub> ; 57.45 mg/L, 237.09 mg/L y 86.76 mg/L, respectivamente. A comparación con los resultados obtenidos en esta investigación, se observa que los valores de la DQO y DBO son ligeramente elevados de la PTAR de Viacha en comparación con la PTAR de San Jerónimo. Por lo contrario, los sólidos totales en suspensión son mayores en San Jerónimo.

Sin embargo, en la investigación de Menbrillo (2022) sobre la PTAR de Cumani en Puno-Perú, donde se analizaron los parámetros fisicoquímicos del efluente, obteniendo pH 7.8, temperatura 10.8 °C, aceites y grasas 7.8 mg/L,  $\text{DBO}_5 < 2$  mg/L, DQO igual a 19 mg/L, sólidos totales en suspensión 57 mg/L. Donde se refleja una eficiencia superior en comparación con los resultados de la prueba fisicoquímica realizada al efluente de la PTAR San Jerónimo, como es el caso de la  $\text{DBO}_5$ , DQO y sólidos totales en suspensión. Esto evidencia que la planta Cumani opera con mayor eficacia en la remoción de materia orgánica y sólidos, debido a diferencias en el diseño y operación de su sistema de tratamiento. Por tanto, en la PTAR de San Jerónimo aún se podría disminuir la concentración de los parámetros.

Por otro lado, los LMP de la DQO en el efluente de la PTAR de San Jerónimo cumple con las normativas peruanas establecidas al ser menor a 200 mg/L (MINAM, 2010). Sin embargo, al comparar con estándares internacionales, se observa que países más desarrollados implementan regulaciones más estrictas. Por ejemplo, Alemania establece un LMP para la DQO de 20 mg/L, China de 100 mg/L y la India de 125 mg/L (Liqtech, 2024; Ministerio del Ambiente del Gobierno de India, 2024; Ministerio Federal de Alemania, 2005). Estas diferencias normativas reflejan un enfoque más riguroso en la protección ambiental debido que la no reducción de este parámetro podría incrementar en un futuro materiales recalcitrantes, contaminantes emergentes y materia orgánica no biodegradable, acumulándose en ríos y cuerpos receptores.

Además, el índice de biodegradabilidad ( $\text{DBO}_5/\text{DQO}$ ) nos da un valor de 0.38, lo que indica que la relación entre la  $\text{DBO}_5$  y la DQO se encuentra por debajo del umbral de 0.4, Según lo descrito en el subtítulo 2.2.8. Estudios previos confirman esta tendencia, como la reportada por (Garcia *et al.*, 2020), quienes hallaron un índice de biodegradabilidad de 0.33 en aguas residuales urbanas, el cual concluye que la baja biodegradabilidad se relaciona con la presencia de



contaminantes orgánicos recalcitrantes, lo que requiere la combinación de tratamientos adicionales de oxidación avanzada para mejorar la degradación. Torres Andrade (2014) al aplicar el tratamiento Fenton en efluentes de la industria gráfica, consiguió aumentar el índice de biodegradabilidad del efluente de 0.17 a 0.4, logrando descomponer las complejas cadenas de carbono en estructuras más simples.

## 4.2. Remoción de la materia orgánica total

### 4.2.1. Prueba exploratoria

Según los experimentos planteados en la Tabla 3. 1, los resultados obtenidos de la prueba exploratoria se presentan en la Tabla 4. 2.

**Tabla 4. 2**

*Resultados de la prueba exploratoria*

| Nº | Concentración<br>Fe <sup>2+</sup> (mg/L) | Concentración<br>H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L) | pH<br>recomendado | Tiempo<br>(min) | DQO <sub>o</sub><br>(mg/L) | DQO <sub>f</sub><br>(mg/L) | %DQO <sub>r</sub> |
|----|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| 1  | 10                                       | 100                                                   | 3                 | 60              | 180                        | 80.01                      | 55%               |
| 2  | 10                                       | 200                                                   | 3                 | 60              | 180                        | 69.94                      | 61%               |
| 3  | 30                                       | 200                                                   | 3                 | 60              | 180                        | 59.47                      | 66%               |
| 4  | 30                                       | 300                                                   | 3                 | 60              | 180                        | 41.88                      | 76%               |
| 5  | 60                                       | 500                                                   | 3                 | 60              | 180                        | 29.55                      | 83%               |

En la Tabla 4. 2 se observa un comportamiento claro en la disminución de la DQO a medida que se incrementa las concentraciones de Fe<sup>2+</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Este patrón indica una mayor eficiencia del

proceso Fenton en la eliminación de la materia orgánica total conforme se aumentaba la dosis de reactivos. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Noé (2019) quien en su experimento para la reducción de la materia orgánica utilizando el proceso Fenton en la industria pesquera, alcanzó una disminución máxima de la DQO del 98.06% en la muestra que tenía mayor concentración de reactivos a comparación de los demás, aunque también sugirió la necesidad de evaluar el equilibrio entre eficiencia y consumo de los reactivos.

De los cinco experimentos realizados, se eligió el experimento 4, con una concentración de 30 mg/L de  $\text{Fe}^{2+}$  y 300 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  para ser utilizado en el diseño Box Behnken. Este experimento resultó en una reducción significativa de la DQO, llegando a 41.88 mg/L, mostrando un buen equilibrio entre el consumo de reactivos. No obstante, al observar el experimento 5, con 60 mg/L de  $\text{Fe}^{2+}$  y 500 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , la DQO final se redujo hasta 29.55 mg/L, se decidió prospectar una concentración aún más alta de reactivos. Se propuso utilizar 90 mg/L de  $\text{Fe}^{2+}$  y 900 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , con la expectativa de lograr una mayor disminución en la DQO y aproximarse a los límites de descarga establecidos.

#### **4.2.2. *Proceso Fenton***

En la Tabla 4. 3 se muestra las concentraciones de las variables, seleccionadas en la prueba exploratoria y un punto intermedio que es el promedio de ambos puntos seleccionados en la prueba exploratoria, que fueron necesarios para completar la matriz del diseño Box Behnken y realizar la experimentación.

**Tabla 4. 3***Códigos de niveles seleccionados en la prueba exploratoria*

| Variable independiente                   | Unidades | Símbolos | Código de niveles |     |     |
|------------------------------------------|----------|----------|-------------------|-----|-----|
|                                          |          |          | -                 | 0   | +   |
| $\text{Fe}^{2+}$                         | mg/L     | $X_i$    | 30                | 60  | 90  |
| $\text{H}_2\text{O}_2$                   | mg/L     | $Y_i$    | 300               | 600 | 900 |
| pH                                       | 0 - 14   | $Z_i$    | 2.5               | 3   | 3.5 |
| Variable de respuesta: %DQO <sub>r</sub> |          |          |                   |     |     |

Para cada grupo de experimentación DQO<sub>f</sub> (1), DQO<sub>f</sub> (2) y DQO<sub>f</sub> (3), se realizó la medición de la DQO inicial, obteniéndose valores de 180, 193 y 185 mg/L respectivamente. Con la finalidad de poder determinar el porcentaje de reducción después del tratamiento. Los resultados de la aplicación del proceso Fenton se encuentran detallados en la Tabla 4. 4.

**Tabla 4. 4***Tabla de resultados de la DQO<sub>f</sub>*

| <b>Orden<br/>corrida</b> | <b>Orden<br/>estadístico</b> | <b>Fe<sup>2+</sup><br/>(ppm)</b> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub><br/>(ppm)</b> | <b>pH</b> | <b>DQO<sub>f</sub><br/>(1)</b> | <b>DQO<sub>f</sub><br/>(2)</b> | <b>DQO<sub>f</sub><br/>(3)</b> |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>1</b>                 | 2                            | 90                               | 300                                         | 3.0       | 29.0                           | 34.0                           | 32.5                           |
| <b>2</b>                 | 8                            | 90                               | 600                                         | 3.5       | 33.5                           | 38.0                           | 39.0                           |
| <b>3</b>                 | 12                           | 60                               | 900                                         | 3.5       | 29.0                           | 31.0                           | 36.5                           |
| <b>4</b>                 | 15                           | 60                               | 600                                         | 3.0       | 32.0                           | 30.0                           | 23.5                           |
| <b>5</b>                 | 5                            | 30                               | 600                                         | 2.5       | 52.0                           | 49.0                           | 46.0                           |
| <b>6</b>                 | 9                            | 60                               | 300                                         | 2.5       | 32.0                           | 25.0                           | 23.5                           |
| <b>7</b>                 | 14                           | 60                               | 600                                         | 3.0       | 22.0                           | 25.0                           | 21.5                           |
| <b>8</b>                 | 11                           | 60                               | 300                                         | 3.5       | 82.0                           | 61.5                           | 63.54                          |
| <b>9</b>                 | 13                           | 60                               | 600                                         | 3.0       | 26.0                           | 21.0                           | 14.5                           |
| <b>10</b>                | 10                           | 60                               | 900                                         | 2.5       | 74.0                           | 66.0                           | 64.5                           |
| <b>11</b>                | 6                            | 90                               | 600                                         | 2.5       | 21.0                           | 36.0                           | 40.0                           |
| <b>12</b>                | 4                            | 90                               | 900                                         | 3.0       | 33.0                           | 34.0                           | 37.0                           |
| <b>13</b>                | 3                            | 30                               | 900                                         | 3.0       | 76.0                           | 77.0                           | 66.5                           |
| <b>14</b>                | 7                            | 30                               | 600                                         | 3.5       | 34.0                           | 32.0                           | 35.0                           |
| <b>15</b>                | 1                            | 30                               | 300                                         | 3.0       | 31.8                           | 28.4                           | 30.6                           |

En la Tabla 4. 5, se muestra como varían la  $DQO_f$  según los parámetros de concentración de  $Fe^{2+}$ ,  $H_2O_2$  y pH. Se pueden observar que la eficiencia del proceso Fenton depende de la combinación adecuada de la concentración de los reactivos.

Además, se observa que los valores iniciales de la DQO para los diferentes grupos de experimentación varían, esto se debe a que la concentración de la DQO en el efluente de la PTAR de San Jerónimo es cambiante. Por tanto, se ve afectado en la DQO final después de la experimentación. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Montes de Oca Fuentes (2006), quien observó que las variaciones en las características del efluente influían directamente en las actividades de los procesos en las diferentes etapas de tratamiento. Además, observó que la carga orgánica incrementaba durante el día y disminuía conforme llegaba la madrugada del día siguiente y recomendó ajustar los parámetros de operación para lograr remociones más uniformes de DQO.

Teniendo los valores de la  $DQO_f$  mostrados en la Tabla 4. 4, se procedió el cálculo del  $\%DQO_r$ , aplicando la ecuación (20) y posterior a ello se determinó el promedio aritmético de los 3 resultados de cada experimento para poder analizar estadístico en Minitab, los resultados del cálculo se visualizan en la Tabla 4. 5.

**Tabla 4. 5***Porcentaje de reducción de la DQO*

| <b>Orden<br/>corrida</b> | <b>Orden<br/>estadístico</b> | <b>Fe<sup>2+</sup><br/>(ppm)</b> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub><br/>(ppm)</b> | <b>pH</b> | <b>%DQO<sub>r</sub><br/>(1)</b> | <b>%DQO<sub>r</sub><br/>(2)</b> | <b>%DQO<sub>r</sub><br/>(3)</b> | <b>Promedio<br/>%DQO<sub>r</sub></b> |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| <b>1</b>                 | 2                            | 90                               | 300                                         | 3.0       | 83.9                            | 82.4                            | 82.4                            | 82.9                                 |
| <b>2</b>                 | 8                            | 90                               | 600                                         | 3.5       | 81.4                            | 80.3                            | 78.9                            | 80.2                                 |
| <b>3</b>                 | 12                           | 60                               | 900                                         | 3.5       | 83.9                            | 83.9                            | 80.3                            | 82.7                                 |
| <b>4</b>                 | 15                           | 60                               | 600                                         | 3.0       | 82.2                            | 84.5                            | 87.3                            | 84.7                                 |
| <b>5</b>                 | 5                            | 30                               | 600                                         | 2.5       | 71.1                            | 74.6                            | 75.1                            | 73.6                                 |
| <b>6</b>                 | 9                            | 60                               | 300                                         | 2.5       | 82.2                            | 87.0                            | 87.3                            | 85.5                                 |
| <b>7</b>                 | 14                           | 60                               | 600                                         | 3.0       | 87.8                            | 87.0                            | 88.4                            | 87.7                                 |
| <b>8</b>                 | 11                           | 60                               | 300                                         | 3.5       | 54.4                            | 68.1                            | 65.7                            | 62.7                                 |
| <b>9</b>                 | 13                           | 60                               | 600                                         | 3.0       | 85.6                            | 89.1                            | 92.2                            | 89.0                                 |
| <b>10</b>                | 10                           | 60                               | 900                                         | 2.5       | 58.9                            | 65.8                            | 65.1                            | 63.3                                 |
| <b>11</b>                | 6                            | 90                               | 600                                         | 2.5       | 88.3                            | 81.3                            | 78.4                            | 82.7                                 |
| <b>12</b>                | 4                            | 90                               | 900                                         | 3.0       | 81.7                            | 82.4                            | 80.0                            | 81.4                                 |
| <b>13</b>                | 3                            | 30                               | 900                                         | 3.0       | 57.8                            | 60.1                            | 64.1                            | 60.7                                 |
| <b>14</b>                | 7                            | 30                               | 600                                         | 3.5       | 81.1                            | 83.4                            | 81.1                            | 81.9                                 |
| <b>15</b>                | 1                            | 30                               | 300                                         | 3.0       | 82.3                            | 85.3                            | 83.5                            | 83.7                                 |

A partir de los resultados, se observa que los mayores %DQO<sub>r</sub> se observaron en las corridas experimentales 7 y 9, con valores de 87.7% y 89.0%, respectivamente. Ambas se realizaron con 60 ppm de Fe<sup>2+</sup>, 600 ppm de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y un pH de 3.0. Esta eficiencia se debe a la generación de

radicales  $OH^\bullet$  a partir de la reacción entre el ion  $Fe^{2+}$  y  $H_2O_2$  según la reacción de la ecuación (6), Un porcentaje más alto fue obtenido por León *et al.*, (2020) quienes presentaron resultados de %DQO<sub>r</sub> de 92.21%, con una concentración inicial de DQO 6925,00 mg/L y se redujo a 539,25 mg/L, del efluente de una industria láctea; esto con las concentraciones de  $Fe^{2+}$  igual a 331 mg/L,  $H_2O_2$  de 5537 mg/L y pH 3. También Rubio *et al.*, (2014) logró obtener un porcentaje de reducción del 97.5% con concentraciones de  $Fe^{2+}$  de 0.06 M con un tiempo de experimentación de 100 min. quienes señalan que el proceso es más eficiente alrededor de pH 2.8.

En contraste, los menores %DQO<sub>r</sub> se registraron en las corridas experimentales 8 y 13, con valores promedio de 67.2% y 60.7%, debido a concentraciones más bajas de  $Fe^{2+}$  y a un pH desbalanceado que limita la generación eficiente de  $OH^\bullet$ .

### **4.3. Modelo matemático**

#### **4.3.1. ANOVA para el diseño experimental Box Behnken**

En la Tabla 4. 6 se visualiza el análisis de varianza para determinar la significancia de las variables independientes.

**Tabla 4. 6***Análisis de varianza para el diseño experimental Box Behnken*

| <b>Fuente</b>                                                     | <b>GL</b> | <b>SC Ajust.</b> | <b>MC Ajust.</b> | <b>Valor F</b> | <b>Valor P</b> |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|------------------|----------------|----------------|
| <b>[Fe<sup>2+</sup>]</b>                                          | 1         | 93.16            | 93.161           | 4.57           | 0.086          |
| <b>[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]</b>                               | 1         | 89.11            | 89.111           | 4.37           | 0.091          |
| <b>pH</b>                                                         | 1         | 0.72             | 0.720            | 0.04           | 0.858          |
| <b>[Fe<sup>2+</sup>]*[Fe<sup>2+</sup>]</b>                        | 1         | 14.10            | 14.100           | 0.69           | 0.444          |
| <b>[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]* [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]</b> | <b>1</b>  | <b>236.55</b>    | <b>236.554</b>   | <b>11.60</b>   | <b>0.019</b>   |
| <b>pH*pH</b>                                                      | 1         | 114.93           | 114.931          | 5.63           | 0.064          |
| <b>[Fe<sup>2+</sup>]*[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]</b>             | 1         | 115.56           | 115.562          | 5.66           | 0.063          |
| <b>[Fe<sup>2+</sup>]*pH</b>                                       | 1         | 29.16            | 29.160           | 1.43           | 0.285          |
| <b>[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]*pH</b>                            | <b>1</b>  | <b>445.21</b>    | <b>445.210</b>   | <b>21.82</b>   | <b>0.005</b>   |
| <b>Falta de ajuste</b>                                            | 3         | 92.27            | 30.758           | 6.32           | 0.140          |
| <b>Error</b>                                                      | 5         | 102.00           | 20.400           |                |                |
| <b>Error puro</b>                                                 | 2         | 9.73             | 4.863            |                |                |
| <b>Total</b>                                                      | 14        | 1206.60          |                  |                |                |

Los resultados del análisis de varianza para el modelo de superficie de respuesta proporcionaron aspectos importantes sobre el comportamiento del sistema. Siendo las variables con mayor significancia la interacción cuadrática [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]\* [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] y la interacción de 2 factores [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]\*pH, ya que el valor P es menor a 0.05. Esto indica que estos términos ejercen un efecto



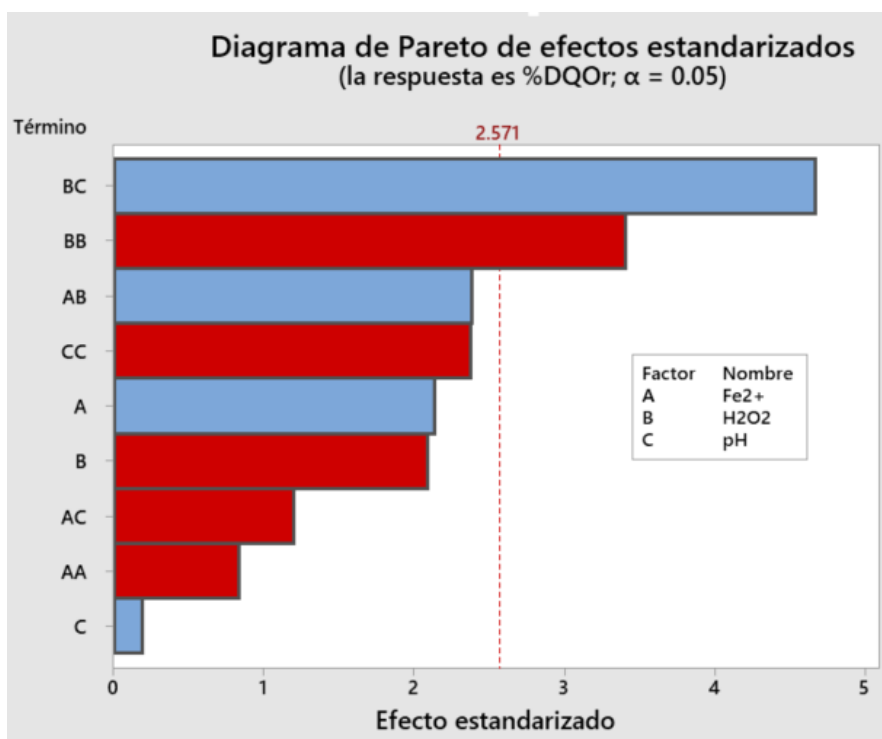
real y estadísticamente demostrable sobre la respuesta del sistema, con un nivel de confianza del 95%, descartando que si influencia sea producto de la variabilidad aleatoria experimental.

#### 4.3.2. Diagrama de Pareto y efectos estimados

En la Figura 4. 1 se observa una línea de referencia vertical de color rojo; los factores que superen dicha línea se consideran de importancia estadística. Los términos en azul indican efectos positivos, mientras que los representados en rojo reflejan efectos negativos sobre la respuesta experimental (Zuñiga, 2023).

**Figura 4. 1**

*Diagrama de Pareto de efectos estandarizados*



Los términos lineales correspondientes a las concentraciones de Fe<sup>2+</sup> (A), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (B) y pH (C) no presentan un efecto directo o proporcional sobre el %DQOr. Por tanto, el incremento o

disminución aislada de estas variables no generan cambios estadísticos relevantes en la respuesta, lo cual refuerza la importancia de considerar los efectos combinados y cuadráticos.

El termino cuadrático  $\text{H}_2\text{O}_2$  (BB) resulta ser influyente con una interacción negativa, lo que indica que el efecto del  $\text{H}_2\text{O}_2$  sobre la variable de respuesta no es lineal. Este comportamiento cuadrático sugiere la existencia de un punto óptimo, a partir del cual el incremento en la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  no mejora el  $\%\text{DQO}_r$ , e incluso puede reducirla.

Asimismo, la interacción  $\text{H}_2\text{O}_2$  pH (BC) resulta ser el más influyente, lo que demuestra que el efecto del  $\text{H}_2\text{O}_2$  sobre el  $\%\text{DQO}_r$  depende del nivel del pH, y viceversa. Por tanto, la eficiencia del proceso Fenton no se ve influenciada por estos factores de manera independiente, sino que la combinación específica de ambos es determinante. Esto se debe a que el pH controla la estabilidad del  $\text{Fe}^{2+}$  y la generación de radicales  $\text{OH}^\bullet$ , mientras que el  $\text{H}_2\text{O}_2$  influye directamente en la disponibilidad de estos radicales (Miklos *et al.*, 2018). Por ello, ciertas combinaciones de estos factores pueden favorecer o inhibir el proceso Fenton.

**Figura 4. 2**

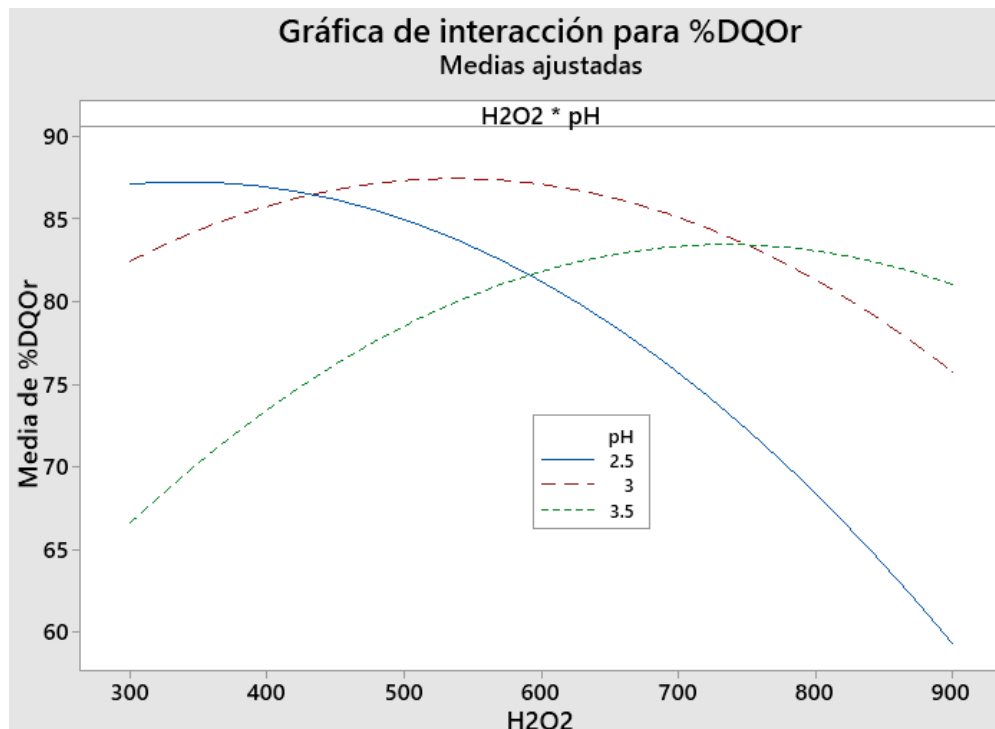
*Gráfica de efectos principales para %DQOr*



La Figura 4. 2 ilustra la relación entre cada factor y el %DQO<sub>r</sub>, en la gráfica de Fe<sup>2+</sup>, se observa una tendencia parabólica. Conforme se incrementa la concentración de hierro, el %DQO<sub>r</sub> también incrementa alcanzando un máximo alrededor de 80 – 90 mg/L de Fe<sup>2+</sup>, tras lo cual la eficiencia empieza a disminuir ligeramente. Por otro lado, el %DQO<sub>r</sub> aumenta con la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> hasta un valor cercano a 500 – 600 mg/L. Sin embargo, concentraciones mayores resultan una disminución de la eficiencia. En cuanto al pH, la gráfica muestra un comportamiento similar, con una remoción máxima en torno a un pH de 3.0.

**Figura 4. 3**

*Gráfica de interacción del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con el pH*



En la Figura 4. 3 se analiza la interacción entre la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el pH en el %DQOr. Se puede observar que, con un pH de 3 (línea roja), se obtiene el mayor %DQOr, alcanzando valores cercanos al 88% con concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en torno a 600 mg/L. En contraste, a pH 2.5 (línea azul), la remoción disminuye de manera significativa al incrementarse la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, observándose un descenso significativo después de 600 mg/L. A pH 3.5 (línea verde), la remoción es más baja, con una tendencia descendente después de 500 mg/L, alcanzando un máximo de aproximadamente 80%.

#### 4.3.3. Modelo Matemático

El modelo matemático del procedimiento para la remoción de la DQO se desarrolló basándose en las variables de estudio, ajustándose a los datos experimentales mediante la siguiente ecuación de regresión:

$$\begin{aligned} \%DQOr = & -39.8 + 0.556Fe^{2+} - 0.1512H_2O_2 + 103.1pH \\ & - 0.00217 Fe^{2+} * Fe^{2+} - 0.000089H_2O_2 * H_2O_2 \\ & - 22.32 pH * pH + 0.000597 Fe^{2+} * H_2O_2 \\ & - 0.180 Fe^{2+} * pH + 0.0703 H_2O_2 * pH \end{aligned} \quad (21)$$

El modelo global mostro un coeficiente de determinación  $R^2$  de 91.55%, para la Ecuación (21), indicando que explica una proporción considerable de la variabilidad en los datos experimentales sobre el  $\%DQOr$ . Sin embargo, el  $R^2$  ajustado presento un valor de 76.33%, significativamente menor que el  $R^2$ , lo cual sugiere que algunos términos del modelo podrían no estar contribuyendo efectivamente a la explicación del fenómeno.

El modelo matemático fue ajustado considerando los valores de significancia estadística obtenidos en la tabla de ANOVA, seleccionando únicamente aquellos términos con efecto significativo sobre la variable de respuesta. Para ello se utilizó la técnica de eliminación hacia atrás (backward elimination) en el software Minitab, la cual permite depurar el modelo descartando progresivamente los términos no significativos. Como resultado de este procedimiento, se obtuvo un modelo reducido.

$$\%DQOr = 210.3 + - 0.2221H_2O_2 - 41.6pH + 0.0703 H_2O_2 * pH \quad (22)$$

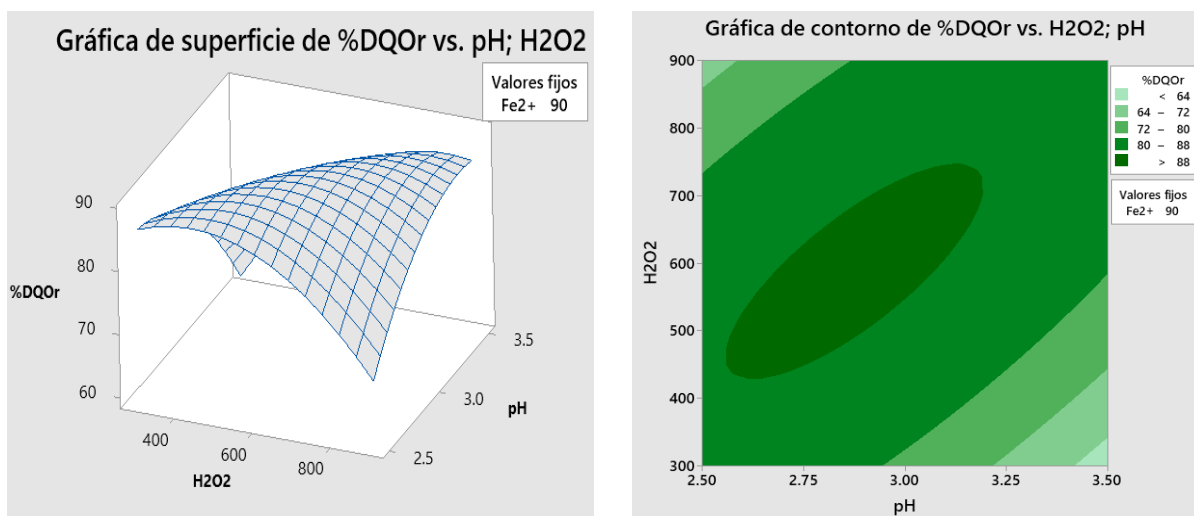
El modelo reducido, obtenido mediante eliminación hacia atrás, presentó un  $R^2$  de 44.34% y un  $R^2$  ajustado de 29.16%, lo que indica una menor capacidad de predicción. En comparación al modelo completo que incluye todos los términos.

#### 4.3.4. Gráficas de Superficies de Respuesta

Para la elaboración de las gráficas de superficies de respuesta se utilizaron la ecuación del modelo matemático. Manteniendo el  $Fe^{2+}$  constante debido a que no se vio significativo en el término cuadrático y el termino de interacciones como se visualizó en el diagrama de Pareto y en la gráfica de efectos principales, es por ello que se realizó el análisis de los gráficos manteniendo constante el  $Fe^{2+}$  en 90 ppm, dividido a que el  $Fe^{2+}$  tiene la función de catalizador por tanto su variación en la concentración no se ve tan afectado en la reacción Fenton (Lambertz *et al.*, 2024).

**Figura 4. 4**

*Gráficos de superficie de respuesta a  $Fe^{2+}$  fijo de 90*



*Nota.* Gráfico de superficies de respuesta, mostrando en el lado izquierdo una superficie tridimensional y en el lado derecho un gráfico de contorno.

En la Figura 4. 4, se observa el comportamiento de la remoción de la DQO en función de las concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y pH, manteniendo el  $\text{Fe}^{2+}$  constante en 90 ppm. La grafica de superficie (izquierda) indica una tendencia creciente en la remoción de la DQO conforme se incrementa las concentraciones de ambos reactivos. Los mejores resultados se logran con concentraciones intermedias de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (aproximadamente 400 – 700 mg/L) y pH (entre 2.75 y 3.15), alcanzando remociones superiores al 88%. La grafica de contorno (derecha) evidencia una mejor vista, mostrando que la mayor eficiencia de remoción de DQO se encuentra en la región intermedia derecha del gráfico, siendo la región donde se obtiene la mayor remoción de la DQO en el área de color verde oscuro.

#### **4.4. Parámetros del proceso**

Según los datos mostrados en la Tabla 4. 5, se determinó que la corrida experimental 9 registro el porcentaje más alto de remoción de DQO logrando un valor del 89.0%. Este experimento se llevó a cabo utilizando 60 ppm de  $\text{Fe}^{2+}$ , 600 ppm de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y un pH de 3.0. Por ser el experimento que logro la mayor remoción de la DQO se considera estos valores como los parámetros del proceso.

Un porcentaje similar obtuvo Rubio *et al.*, (2014) que según investigación bibliográfica se logra obtener un porcentaje de reducción del 97.5% con concentraciones de  $\text{Fe}^{2+}$  de 0.06 M en un tiempo de tratamiento de 100 min.

## CONCLUSIONES

- El proceso Fenton demostró ser eficaz para la remoción de la materia orgánica residual no biodegradable en el efluente de la PTAR de San Jerónimo.
- Se determinaron las características fisicoquímicas del efluente de la PTAR San Jerónimo, obteniéndose los siguientes valores: aceites y grasas (5 mg/L), DBO (75 mg/L), DQO (75 mg/L), pH (7.8), sólidos totales en suspensión (1.5 mg/L) y temperatura (20 °C). Estos parámetros permitieron establecer las condiciones iniciales del agua residual a tratar, sirviendo como línea base para evaluar la eficiencia del proceso de tratamiento aplicado, en función del %DQO<sub>r</sub>
- Se determinó el efecto de las dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Fe<sup>2+</sup> y del pH sobre la remoción de la materia orgánica total del efluente de la PTAR San Jerónimo, utilizando el diseño Box-Behnken. Los resultados mostraron que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tuvo un efecto cuadrático significativo, evidenciando que existe una concentración óptima que maximiza la remoción, mientras que valores excesivos disminuyen la eficiencia. Asimismo, se identificó una interacción significativa entre el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el pH, lo cual indica que el efecto del oxidante depende del nivel de acidez del medio. En contraste, los efectos lineales no fueron estadísticamente significativos dentro del rango evaluado.
- Se determinó un modelo matemático con Minitab V19.0 para predecir la remoción de DQO. El modelo completo, con todos los terminos, mostró un R<sup>2</sup> de 91.55% y un R<sup>2</sup> ajustado de 76.33%, indicando un buen ajuste. Posteriormente, se aplicó la técnica de eliminación hacia atrás según la significancia estadística, obteniendo un modelo reducido con menor capacidad predictiva (R<sup>2</sup> de 44.34% y R<sup>2</sup> ajustado de 29.16%), pero más



simple y basado solo en efectos significativos. Además, los gráficos de superficie permitieron identificar visualmente las condiciones óptimas para la remoción de DQO.

- Con base en los resultados presentados en la Tabla 4. 4, se establecieron los parámetros del proceso para lograr la mayor remoción de DQO. El mayor porcentaje de remoción, alcanzando un 89.0%, se obtuvo en la corrida experimental 9, utilizando 60 ppm de  $\text{Fe}^{2+}$ , 600 ppm de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y un pH de 3.0. Debido a que este experimento logró la mayor eficiencia en la remoción de la DQO, estos valores se consideraron como los mejores parámetros para el proceso de tratamiento.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios adicionales para optimizar los parámetros del proceso Fenton, tales como las proporciones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , el pH y el tiempo de reacción, con el objetivo de maximizar la eficiencia de remoción de DQO y minimizar el consumo de reactivos químicos. Esto contribuirá a reducir los costos operativos y a mejorar la sostenibilidad del proceso en aplicación a gran escala.
- Se recomienda utilizar una solución tampón para mantener constante el pH durante las experimentaciones de Fenton, dado que este varía a lo largo de los 60 min de experimentación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadpour, N., Sayadi, MH., & Nowrouzi, M. (2021). *Recent nano-based technologies in the removal of pharmaceutical compounds from aquatic environment*. Importance & Applications of Nanotechnology, Austin Publishing Group. Vol. 1, Chapter 4, pp. 49-70  
<https://austinpublishinggroup.com/ebooks/nanotechnology/chapters/recent-nano-based-technologies-in-the-removal-of-pharmaceutical-compounds-from-aquatic-environment.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. Ministerio de Agricultura y riego.  
<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/1475.pdf>
- Babuponnusami, A., & Muthukumar, K. (2013). *A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment*, J. Environ. Chem. Eng. (2013),  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>
- Ballarte, A. A. (2024). *Tratamiento de efluente líquidos del camal municipal para mitigar contaminación del rio Huallaga. Huánuco, 2023* [Tesis de doctorado de Ingeniería Ambiental , Universidad Nacional Hermilio Valdizán - Huánuco, Perú].  
<https://repositorio.unheval.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/c9a87ed8-344c-4f74-873c-f884db8fcd06/content>
- Barliza, V. D., & Torres, D. L. (2018). *Evaluacion de los procesos de oxidacion avanzada: Fenton, UV//H2O2 y foto-Fenton para la degradación del clorpirifós en aguas residuales a nivel laboratorio en la Universidad de Cartagena* [Tesis de pregrado de Ingeniería Química , Fundación Universidad de América]. Repositorio Universidad de América.

<https://repository.uamerica.edu.co/items/43d39181-9da0-4005-a0f7-63708ac6d1e0>

Box, G., Hunter, S., & Hunter, W. (2005). *Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery* (2.ª ed.) Wiley-Interscience. Recuperado de <https://www.wiley.com/en-us/Statistics+for+Experimenters%3A+Design%2C+Innovation%2C+and+Discovery%2C+2nd+Edition-p-9780471718130>

Bustillo, C. (2020). *Advanced Oxidation Processes*. IntechOpen.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.85681>

Cabrera, J., & Mucha, L. L. (2024). *Degradación de materia orgánica contenida en aguas residuales de la industria láctea artesanal mediante el proceso de oxidación foto-Fenton modificado circumneutro*. [Tesis de pregrado de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP.

<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10673>

Central Composite Design. (2024). *Develve*.

<https://www.develve.net/Central%20Composite%20design.html>

Chiva, S., Berlanga, G., Martínez, R., & Climent, J. (2017). *Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua* (Vol. 1). Universitat Jaume I.

Choque, L. D. (2024). *Evaluación de la calidad hídrica de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del municipio de Viacha del departamento de la Paz* [Tesis de licenciatura de Ingeniería Ambiental, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional UNSA. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/38759>

Cuenca, M. T. (2019). *Contaminantes emergentes: origen y destino* [Tesis de maestría en Ciencias Ambientales, Universidad de Alcalá]. Repositorio Institucional de la Universidad

de Alacalá

[https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/41744/TFM\\_Cuenca\\_Rompinelli\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/41744/TFM_Cuenca_Rompinelli_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Cuesta, H. (2019). *Procesos avanzados de oxidacion aplicados al tratamiento de las aguas residuales de la Industria Petroquimica: Fenton y foto-Fenton* [Tesis de pregrado de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/28100>

Deng, Y., & Zhao, R. (2015). *Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment*. Current Pollution Reports, 1(3), 167-176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>

Diaz, F. D. (2020). *Remoción de farmacos emergentes en agua residuales mediante un biorreactor con biomasa inmovilizada acoplado a un sistema de filtracion con membranas sumergidas* [Tesis de maestría en Ciencias y Tecnología del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua]

EPS SEDACUSCO S.A. (2022). *Memoria SEDACUSCO 2022.pdf*.

Espinoza, A. C., & Arriaga, J. A. (2021). *Contaminantes emergentes en el agua: causas y efectos*. Impluvium, 17, 90.

<http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art54/int54.htm%0Ahttp://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero17.pdf#page=62>

Fernandes, A. (2014). *Fenton's process applied to wastewaters treatment* [Tesis de doctorado de Ingeniería Química, University of Coimbra]. Repositorio Estudo Geral. <https://hdl.handle.net/10316/26811>

Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brand, G. C., Silva,

- E. G. P., Reis, P. S., Souza, A. S., & Santos, W. N. L. (2007). *Box-Behnken design : An alternative for the optimization of analytical methods*. *Analytica Chimica Acta*, 597, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>
- García, J. (2007). *Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for commercial reactive azo dyes removal* [Tesis doctoral en Ciencias Ambientales, Universitat Autònoma de Barcelona]. Repositori de Recerca UAB  
<https://portalrecerca.uab.cat/ca/studentTheses/combination-of-advanced-oxidation-processes-and-biological-treatm>
- García, M., Pérez, L., & Rodríguez, A. (2020). *Tratamiento avanzado para la mejora de la biodegradabilidad en aguas residuales urbanas*. *Journal of Environmental Studies*, 3(15), 120–132.
- Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., van der Ploeg, M., van de Zee, S. E. A. T. M., & Ritsema, C. J. (2015). *Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management*. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1), 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.002>
- Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). *Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos*. *Producción + Limpia*, 7(2), 52–73.  
<http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- Goicoechea, H. (2016). *Metodología de la superficie de respuesta (p. 139)* [Material de curso]. Universidad Nacional del Litoral. [https://www.fbc.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/wp-content/uploads/2016/06/4-RSM\\_Mezclas\\_2018.pdf](https://www.fbc.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/wp-content/uploads/2016/06/4-RSM_Mezclas_2018.pdf)
- Gonzales, C., & Medina, R. (2019). *Depuración de contaminantes presentes en efluentes de*

*centros de salud I-4 mediante procesos oxidativo avanzados foto-Fenton en la micro red Arequipa- Caylloma, en el Centro de Salud de Hunter* [Tesis de grado de Ingeniería Ambiental, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/7f37115c-5666-4585-a293-b0b31e5d3e27>

Google. (s.f.). *Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Jerónimo* [Google Maps]. [https://www.google.com/maps/place/Residual+water+treatment+plant/@-13.5531058,-71.8705187,856m/data=!3m2!1e3!4b1!4m6!3m5!1s0x916e7e85e5c5f531:0xbfa63955e9772dc3!8m2!3d-13.5531058!4d-71.8679438!16s%2Fg%2F11g7czn2gc?entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDYwNC4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Residual+water+treatment+plant/@-13.5531058,-71.8705187,856m/data=!3m2!1e3!4b1!4m6!3m5!1s0x916e7e85e5c5f531:0xbfa63955e9772dc3!8m2!3d-13.5531058!4d-71.8679438!16s%2Fg%2F11g7czn2gc?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDYwNC4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D)

Gulkaya, I., Surucu, G. A., & Dilek, F. B. (2006). *Importance of  $H_2O_2/Fe^{2+}$  ratio in Fenton's treatment of a carpet dyeing wastewater*. Journal of Hazardous Materials, 136(3), 763-769 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.006>

Gutiérrez, M., Córdova, P., García, A. J., Peña, E. P., Barrios, T. O., & Peña, E. L. (2022). *Alternativa de tratamiento terciario de aguas residuales mediante humedal de flujo subsuperficial para reúso agrícola*. Revista Alfa, 6(18), 503–515. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i18.186>

HACH COMPANY. (2019). *TNT 822 Demanda Química de Oxígeno*. World Headquarters, 1–3.

HANNA Instruments S.A.S. (2023). *Guía para el análisis de la demanda química de oxígeno (DQO)*. <https://www.hannacolombia.com/blog/post/115/guia-para-el-analisis-la-demanda-quimica-oxigeno-dqo?srsId=AfmBOoqfXA3BGNNVF->

Ig2A52tdb1tEypsMGZpEM25Cht78Ucygpbtrtas

- Hodaifa, G., Zuorro, A., Dominguez, J. R., Rodríguez, J. G., Peres, J. A., Frontistis, Z., & Albqmi, M. (2023). *Advanced Oxidation Process: Applications and Prospects*. Water (Switzerland), 15(19), 2–5. <https://doi.org/10.3390/w15193444>
- Huaroto, A. J. (2022). *Remoción de coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno de plantas de tratamiento de aguas residuales en distritos rurales. Huaytará – Huancavelica, 2021 – 2022*. [Tesis profesional en Biología, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5350>
- Huerta, P. (2021). *Análisis y diagnóstico del sistema de tratamiento de aguas residuales de Santa Cruz de Tenerife*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- Jaramillo, A. C., Echavarría, A. M., & Hormaza, A. (2013). *Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores*. Ingeniería y Ciencia, 9(18), 75–91. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.9.18.4>
- Khetan, S. K., & Collins, T. J. (2007). *Human pharmaceuticals in the aquatic environment: A challenge to green chemistry*. Chemical Reviews, 107(6), 2319–2364. <https://doi.org/10.1021/cr020441w>
- Lambertz, S., Franke, M., Stelter, M., & Braeutigam, P. (2024). *Determination of Chemical Oxygen Demand with electrochemical methods : A review*. Chemical Engineering Journal Advances, 18, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.100615>
- León, J., Medina, C., & Segovia, E. (2020). *Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea*. Dominio de las Ciencias, 6(3), 785–



801.

Liqtech. (2024). *Industrial wastewater discharge limits and requirements*. LiqTech.

<https://liqtech.com/systems/industrial-wastewater/industrial-wastewater-discharge-limits-and-requirements/>

Mahtab, M. S., Islam, D. T., & Farooqi, I. H. (2021). *Optimization of the process variables for landfill leachate treatment using Fenton based advanced oxidation technique*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 24(2), 428–435.

<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.013>

Marroquín, R. (2013). *Sesion 04: Metodologia de la investigacion* [Apunte de clase].

Universidad Nacional de Educacion Enrique Guzman y Valle (UNE).

<https://www.une.edu.pe/Titulacion/2013.pdf>

Medina, C., Uniarte, W., Cárdenas, E., & Orrego, S. (2020). *Tratamiento de aguas residuales de camales mediante tecnologías avanzadas de oxidación: proceso fenton*. Revista Ingeniería UC, 27(2), 11.

Mejía, K., Reyes, C., & Sánchez, H. (2018). *Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística*. Universidad Ricardo Palma Vicerrectorado de Investigación (Ed.), Bussiness Support Aneth S.R.L. (Primera Ed).

Menbrillo Paredes, J. A. (2022). *Determinación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas de la planta Cumani - Antauta septiembre 2019, Perú*. [ Tesis de pregrado de Ingenieria Ambiental, Universidad Privada San Carlos]

Miklos, D. B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K. G., Drewes, J. E., & Hübner, U. (2018).

*Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical*

- review. *Water Research*, 139, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.042>
- MINAM. (2016). *Glosario de términos*. Direccion General de Calidad Ambiental, 17.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2013). *Resolución Ministerial N°273-2013-VIVIENDA: Aprueba el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas o Municipales (PTAR)* [Resolución ministerial]. Diario Oficial El Peruano  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/23087/RM-273-2013-VIVIENDA.pdf?v=1530743049>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2010). *Decreto Supremo N°003-2010-MINAM*. El Peruano, 11. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>
- Ministerio del Ambiente del Gobierno de India. (2024). *Junta Central de Control de la Contaminación*.
- Mirzaei, A., Chen, Z., Haghighat, F., & Yerushalmi, L. (2017). *Removal of pharmaceuticals from water by homo / heterogonous Fenton-type processes - A review*. *Chemosphere*, 174, 665–688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.019>
- Molina, M., & Risalve, B. (2023). *Degradación de materia orgánica contenido en aguas residuales de la ciudad universitaria mediante el proceso Fenton modificado cercanas a la neutralidad*. [Tesis de pregrado de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Centro del Perú]
- Mondgomery, D. (2017). *Design an Analysis of Experiments*. Jhon Wiley & Sons, 9.
- Montes de Oca Fuentes, E. V. (2006). *Evaluación de la variabilidad diurna de las fracciones de la DQO del ASM1 en aguas residuales municipales de Toluca*. [Tesis de licenciatura en

Ingeniería Ambiental, Universidad autónoma del estado de México].

Mousalli-Kayat, G. (2016). *Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa*. Mérida, 38.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2633.9446>

Myers, R., Montgomery, D., & Anderson-Cook, C. (2009). *Response Surface Methodology*. Wiley.

Nieto, J. I., Torres, R. A., Botero, A. M., & Hernández, F. (2021). *Pharmaceuticals and environmental risk assessment in municipal wastewater treatment plants and rivers from Peru*. *Environment International*, 155(May). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106674>

Noé Maza, C. A. (2019). *Aplicación del proceso Fenton para la reducción de la materia orgánica presente en el agua de bombeo de la industria pesquera, Callao, 2019* [Tesis de licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Institucional UCV <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60020>

OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Organismo de Evaluacion y Fiscalizacion Ambiental, 36.

Organización Panamericana de la Salud. (2025). *Influenza, SARS-CoV-2, VSR y otros virus respiratorios*. <https://www.paho.org/es/temas/influenza-sars-cov-2-vsr-otros-virus-respiratorios>

Pachés, M. (2020). *Contaminantes emergentes*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/5b174df2-5571-4de4-9e0f-2877ec0695c6/content>

Pandey, P., & Pandey, M. M. (2015). *Research Methodology: Tools and Techniques*. Bridge center. <https://dspace.unitywomenscollege.ac.in/handle/123456789/157>

Pignatello, J. J., Oliveros, E., & Mackay, A. (2007). *Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry*. *Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 3389(36:1), 1–84.

<https://doi.org/10.1080/10643380500326564>

Piraquive, M. A., & Parroquiano, A. (2021). *Análisis bibliográfico sobre extractos de especies naturales utilizados como coagulantes y floculantes y sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales*. [Tesis de grado en Ingeniería Ambiental, Universidad distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional

<http://hdl.handle.net/11349/26107>

Poyatos, J. M., Muño, M. M., & Almecija, M. C. (2010). *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment : State of the Art*. *Water Air Soil Pollut*, 18.

<https://doi.org/10.1007/s11270-009-0065-1>

Promulgación de la Enmienda a la Ley de Tasas de Aguas Residuales, 15 (2005).

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.

Salas, G. (2010). *Tratamiento por oxidación avanzada (reacción Fenton) de aguas residuales de la industria textil*. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 13(1), 30–38.

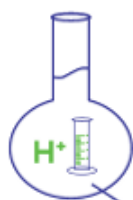
<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/4551>

Saldivar, P., & Navarro, G. (2023). *Tratamiento de un surfactante comercial presente en el agua por el proceso Fenton*. *Ideas en Ciencia de la Ingeniería*, 1, 4–17.

- Saravanathamizhan, R., & Perarasu, V. (2021). *Wastewater Treatment*. Cutting Edge Molecular Tools, Techniques and Applied Aspects (pp. 103–136). Departamento de Ingeniería Química, Campus AC Tech, Universidad Anna, Chennai, India.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128218815000064>
- Statgraphics. (2023). *Responce Surface Methodology*.
- Stefan, M. I. (2018). *Advanced oxidation processes for water treatment: Fundamentals and applications*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780407197>
- Tchobanoglous, G., Stensel, D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). *Wastewater Engineering*. Environmentally Conscious Materials and Chemicals Processing (5th ed., Vol. 5). <https://doi.org/10.1002/9780470168219.ch8>
- Torres Andrade, G. F. (2014). *Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros* [Tesis doctoral en Ingeniería Ambiental , Universidad de las Palmas de Gran Canaria]. Repositorio ULPGC  
<https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/11899>
- Yang, Y., Ok, Y. S., Kim, K. H., Kwon, E. E., & Tsang, Y. F. (2017). *Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants*. Science of the Total Environment, 18.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.102>
- Zuñiga, M. M. (2023). *Reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) aplicando el proceso Fenton en las aguas residuales del Camal Municipal de Calca - Cusco* [Tesis de grado en Ingeniería Ambiental, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional UAC. <https://repositorio.uan.dina.edu.pe/item/38f89a4d-e891-41e0-93bf-ffe63e172710>

## APÉNDICES

### Apéndice N°1, Informe del análisis fisicoquímico de agua residual de la PTAR San Jerónimo.



# MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez  
LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES  
AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE  
RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN Cel: 946887776 - 951562574

#### INFORME N° LQ 0348-24

#### ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE AGUA RESIDUAL

#### SOLICITA

- : - Amelia Callapiña Quico.  
- Franklin David Porroa Contoy.

#### PROYECTO

: "Tratamiento de los Efluentes de la PTAR San Jerónimo mediante el Proceso Fenton"

#### MUESTRAS

: M<sub>1</sub>- Agua Residual – PTAR.

#### DISTRITO

: San Jerónimo.

#### PROVINCIA

: Cusco.

#### DEPARTAMENTO

: Cusco

#### FECHA DE INFORME

: 13/05/2024

#### RESULTADOS

:

| DETERMINACIONES                                | UNIDAD | M <sub>1</sub> |
|------------------------------------------------|--------|----------------|
| Aceites y grasas                               | mg/L   | 5              |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO <sub>5</sub> | mg/L   | 75             |
| Demanda Química de Oxígeno DQO                 | mg/L   | 180            |
| pH                                             |        | 7.8            |
| Sólidos Totales en Suspensión                  | mg/L   | 150            |
| Temperatura                                    | °C     | 20             |

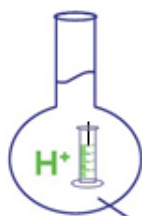
**MÉTODOS DE ANÁLISIS:** Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales publicado conjuntamente por AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF).

#### NOTA:

- Los resultados son válidos únicamente para la muestra analizada.
- La muestra fue tomada por el solicitante.

COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ  
CONSEJO DEPARTAMENTAL CUSCO  
Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez  
INGENIERO QUÍMICO  
CIP 234338

**Apéndice N°2, Informe del análisis de la demanda química del oxígeno, prueba exploratoria.**



# MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez  
**LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES**  
**AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE**  
 RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN Cel: 946887776 - 951562574

**INFORME N° LQ 0585-24**

**ANÁLISIS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO-PRUEBA EXPLORATORIA**

**SOLICITA** : - Amelia Callapiña Quico.  
 - Franklin David Porroa Contoy.

**PROYECTO** : "Tratamiento de los Efluentes de la PTAR San Jerónimo mediante el Proceso Fenton"

**MUESTRAS** : AGUAS.  
 M<sub>1</sub>- M1.  
 M<sub>2</sub>- M2.  
 M<sub>3</sub>- M3.  
 M<sub>4</sub>- M4.  
 M<sub>5</sub>- M5.

**DISTRITO** : San Jeronimo  
**PROVINCIA** : Cusco  
**DEPARTAMENTO** : Cusco  
**FECHA DE INFORME** : 16/09/2024

**RESULTADOS** :

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 80.01          | 69.94          | 59.47          | 41.88          | 29.55          |

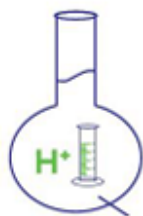
**METODO DE ANALISIS:** Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales publicado conjuntamente por AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF).

**NOTA:**

- Los resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas.
- Las muestras fueron tomadas por el solicitante.

COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ  
 CONSEJO DEPARTAMENTAL CUSCO  
  
 Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez  
 INGENIERO QUÍMICO  
 CIP 238338

Apéndice N°3, Informe del análisis de la demanda química del oxígeno, primera experimentación.



# MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez  
LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES  
AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE  
RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN Cel: 946887776 - 951562574

## INFORME N°LQ 0539-24

### ANÁLISIS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO

**SOLICITA** : - Amelia Callapiña Quico.  
- Franklin David Porroa Contoy.

**PROYECTO** : "Tratamiento de los Efluentes de la PTAR San Jerónimo mediante el Proceso Fenton"

**MUESTRAS** : AGUAS.

|                      |                        |                        |
|----------------------|------------------------|------------------------|
| M <sub>1</sub> - M1. | M <sub>6</sub> - M6.   | M <sub>11</sub> - M11. |
| M <sub>2</sub> - M2. | M <sub>7</sub> - M7.   | M <sub>12</sub> - M12. |
| M <sub>3</sub> - M3. | M <sub>8</sub> - M8.   | M <sub>13</sub> - M13. |
| M <sub>4</sub> - M4. | M <sub>9</sub> - M9.   | M <sub>14</sub> - M14. |
| M <sub>5</sub> - M5. | M <sub>10</sub> - M10. | M <sub>15</sub> - M15. |

**DISTRITO** : San Jeronimo

**PROVINCIA** : Cusco

**DEPARTAMENTO** : Cusco

**FECHA DE INFORME** : 15/10/2024

### RESULTADOS :

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 29             | 33.5           | 29             | 32             | 52             |

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>6</sub> | M <sub>7</sub> | M <sub>8</sub> | M <sub>9</sub> | M <sub>10</sub> |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 32             | 22             | 82             | 26             | 74              |

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>11</sub> | M <sub>12</sub> | M <sub>13</sub> | M <sub>14</sub> | M <sub>15</sub> |
|--------------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 21              | 33              | 76              | 34              | 31.8            |

**MÉTODO DE ANÁLISIS:** Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales publicado conjuntamente por AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF).

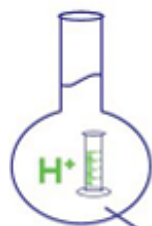
### NOTA:

- Los resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas.
- Las muestras fueron tomadas por el solicitante.

COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ  
CONSEJO DEPARTAMENTAL CUSCO  
*Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez*  
INGENIERO QUÍMICO  
CIP 234338



**Apéndice N°4, Informe del análisis de la demanda química del oxígeno, segunda experimentación.**



# MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez  
**LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES**  
**AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE**  
 RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN Cel: 946887776 - 951562574

## INFORME N°LQ 0585-24

### ANÁLISIS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO

**SOLICITA** : - Amelia Callapiña Quico.  
 - Franklin David Porroa Contoy.

**PROYECTO** : "Tratamiento de los Efluentes de la PTAR San Jerónimo mediante el Proceso Fenton"

**MUESTRAS** : AGUAS.

|                      |                        |                        |
|----------------------|------------------------|------------------------|
| M <sub>1</sub> - M1. | M <sub>6</sub> - M6.   | M <sub>11</sub> - M11. |
| M <sub>2</sub> - M2. | M <sub>7</sub> - M7.   | M <sub>12</sub> - M12. |
| M <sub>3</sub> - M3. | M <sub>8</sub> - M8.   | M <sub>13</sub> - M13. |
| M <sub>4</sub> - M4. | M <sub>9</sub> - M9.   | M <sub>14</sub> - M14. |
| M <sub>5</sub> - M5. | M <sub>10</sub> - M10. | M <sub>15</sub> - M15. |

**DISTRITO** : San Jeronimo

**PROVINCIA** : Cusco

**DEPARTAMENTO** : Cusco

**FECHA DE INFORME** : 17/10/2024

### RESULTADOS :

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 34             | 38             | 31             | 30             | 49             |

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>6</sub> | M <sub>7</sub> | M <sub>8</sub> | M <sub>9</sub> | M <sub>10</sub> |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 25             | 25             | 61.5           | 21             | 66              |

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>11</sub> | M <sub>12</sub> | M <sub>13</sub> | M <sub>14</sub> | M <sub>15</sub> |
|--------------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 36              | 34              | 77              | 32              | 28.4            |

**MÉTODO DE ANÁLISIS:** Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales publicado conjuntamente por AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF).

### NOTA:

- Los resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas.
- Las muestras fueron tomadas por el solicitante.

COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ  
 CONSEJO DEPARTAMENTAL CUSCO  
  
 Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez  
 INGENIERO QUÍMICO  
 CIP 238338

**Apéndice N°5, Informe del análisis de la demanda química del oxígeno, tercera experimentación.**



**INFORME EXPERIMENTACIÓN N°3**

**ANÁLISIS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO**

**TESISTAS** : — Amelia Callapiña Quico.  
— Franklin David Porroa Contoy.

**PROYECTO** : "Tratamiento de los Efluentes de la PTAR San Jerónimo mediante el Proceso Fenton"

**MUESTRAS** : AGUAS.

|                       |                         |                         |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| M <sub>1</sub> .- M1. | M <sub>6</sub> .- M6.   | M <sub>11</sub> .- M11. |
| M <sub>2</sub> .- M2. | M <sub>7</sub> .- M7.   | M <sub>12</sub> .- M12. |
| M <sub>3</sub> .- M3. | M <sub>8</sub> .- M8.   | M <sub>13</sub> .- M13. |
| M <sub>4</sub> .- M4. | M <sub>9</sub> .- M9.   | M <sub>14</sub> .- M14. |
| M <sub>5</sub> .- M5. | M <sub>10</sub> .- M10. | M <sub>15</sub> .- M15. |

**DISTRITO** : San Jeronimo

**PROVINCIA** : Cusco

**DEPARTAMENTO** : Cusco

**FECHA DE INFORME** : 19/10/2024

**RESULTADOS** :

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 32.5           | 39             | 36.5           | 23.5           | 46             |

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>6</sub> | M <sub>7</sub> | M <sub>8</sub> | M <sub>9</sub> | M <sub>10</sub> |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 23.5           | 21.5           | 63.54          | 14.5           | 64.5            |

| DETERMINACIONES                | UNIDAD | M <sub>11</sub> | M <sub>12</sub> | M <sub>13</sub> | M <sub>14</sub> | M <sub>15</sub> |
|--------------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Demanda Química de Oxígeno DQO | mg/L   | 40              | 37              | 66.5            | 35              | 30.6            |

**MÉTODO DE ANÁLISIS:** Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales publicado conjuntamente por AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF).

EPS  
SEDACUSCO  
S.A.

*Ing. César Paniagua Chacon*  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE  
AGUAS RESIDUALES

## ANEXOS

**Anexo A, Convenio de cooperación específico para la ejecución de la tesis con la empresa prestadora de servicios de saneamiento publico de accionario municipal SEDA CUSCO S.A.**



**CONVENIO N°002-2024-GG-EPS.SEDACUSCO**

**CONVENIO DE COOPERACIÓN ESPECÍFICO PARA LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACION PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUIMICO TITULADA "TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PTAR SAN JERONIMO MEDIANTE EL PROCESO FETON"**

Conste por el presente documento, el CONVENIO DE COOPERACIÓN ESPECÍFICO PARA LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACION PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUIMICO EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO TITULADA "TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PTAR SAN JERONIMO MEDIANTE EL PROCESO FETON", que celebran de una parte LA EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO PUBLICA DE ACCIONARIADO MUNICIPAL SEDACUSCO S.A., con RUC N° 20136353315, con domicilio en el inmueble N° 364 de la Av. Anselmo Álvarez, del distrito de Wanchaq, provincia y departamento del Cusco, representado por su Gerente General Ing. YABEL SILVA GUEVARA, identificado con DNI N°24002916, designado mediante Sesión Ordinaria de Directorio 03/SO-06-2023-DIR de fecha 09/febrero/2023, a quien en adelante se le denominará "LA EPS" y de otra parte la Bachiller AMELIA CALLAPIÑA QUICO, identificada con DNI N° 73863679 con domicilio en la APV Las Américas C-8 Huancaro, distrito de Santiago, provincia y departamento del Cusco y el Bachiller FRANKLIN DAVID PORROA CONTOY, identificado con DNI N° 74613148, con domicilio en el Jirón Ancash S/N del distrito de Acahuasi, provincia de Anta y departamento del Cusco, que en adelante se denominarán "LOS TESISISTAS".

**CLÁUSULA PRIMERA: DE LAS PARTES**

LA EPS, tiene por objeto realizar todas las actividades vinculadas a la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado en el ámbito de su administración y responsabilidad, aplicando políticas de desarrollo, control, operación, mantenimiento, planificación, financiación, normatividad, preparación de proyectos, ejecución de obras, supervisión, asesoría y asistencia técnica de conformidad al Decreto Legislativo N° 1280 Decreto Legislativo que aprueba la Ley del Servicio Universal de Agua Potable y Saneamiento, modificado por el Decreto Legislativo N° 1620 y su Estatuto Social

**LOS TESISISTAS:** Egresados de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, vienen formulando su tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Químico, con el tema titulado "TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PTAR SAN JERONIMO MEDIANTE EL PROCESO FETON"

**CLÁUSULA SEGUNDA: BASE LEGAL**

- ✓ Constitución Política del Perú.
- ✓ Decreto Legislativo N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley del Servicio Universal de Agua Potable y Saneamiento, modificado mediante el Decreto Legislativo N° 1620.
- ✓ D. S. N° 016-2021-VIVIENDA, que aprueba el Texto Único Ordenado del Reglamento del Decreto Legislativo N° 1280.
- ✓ Ley Marco de Modernización de la Gestión del Estado Ley N° 27658.
- ✓ Ley N° 30220, Ley Universitaria.
- ✓ Reglamento de Grados de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- ✓ Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General.





- ✓ Estatuto Social de la EPS.SEDACUSCO S.A.
- ✓ Reglamento de Prestación de los Servicios de Saneamiento, aprobado mediante Resolución de Consejo Directivo N° 011-2007-SUNASS-CD y sus modificatorias.

#### **CLÁUSULA TERCERA: OBJETIVO**

Es objeto del presente Convenio facilitar las condiciones y mecanismos para la realización de los estudios de investigación de la tesis titulada **"TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PTAR SAN JERONIMO MEDIANTE EL PROCESO FETON"**

#### **CLÁUSULA CUARTA:**

Constituyen obligaciones de las partes las que a continuación se detallan:

##### **OBLIGACIONES DE LA EPS.**



- 1) Permitir el acceso a La PTAR San Jerónimo de la EPS.SEDACUSCO S.A. para el desarrollo de la investigación siendo el horario de ingreso, en el horario de 08:00 a 16:30 hrs.
- 2) Asistir con personal profesional, para consultas en temas que tengan relación al proyecto de investigación, no teniendo carácter de exclusividad.
- 3) Facilitar información concerniente de los resultados de los análisis de los parámetros solicitados en el Exp. N° 1488 del laboratorio acreditado del efluente y afluente de la PTAR San Jerónimo desde el 2018 hasta la actualidad.
- 4) Emitir la conformidad del trabajo de investigación a la presentación del informe final por parte de los TESISISTAS, pudiendo la EPS solicitar la exposición del trabajo de investigación.

##### **OBLIGACIONES DE LOS TESISISTAS**

- 1) Cumplir estrictamente con lo establecido en el Plan de Trabajo, salvo variaciones propias del mismo y coordinadas con la EPS.SEDACUSCO S.A., así mismo alcanzarán el correspondiente Plan de Trabajo Actualizado si el caso lo amerita.
- 2) Realizar las actividades de investigación en los horarios que establece la EPS.SEDACUSCO S.A., dando cumplimiento a las disposiciones internas de la empresa.
- 3) Se comprometen a seguir en todo momento las prácticas concernientes al proyecto de investigación de forma segura, conforme a la legislación actual, incluida la adopción de las medidas necesarias en materia de salud, seguridad, accidentes y prevención de riesgos laborales; así como contar con sus respectivos seguros de trabajo contra todo riesgo - SCTR.
- 4) Los cambios en la ejecución de la tesis se solicitan por escrito y con la debida anticipación y tendrán que ser aprobados por la EPS.SEDACUSCO S.A.
- 5) Exponer el trabajo de investigación a la presentación del informe final, en caso que la EPS lo requiera.
- 6) Hacer entrega a la EPS.SEDACUSCO S.A. de toda la información que se genere, producto del referido trabajo de investigación, siendo propiedad de ésta, de allí que solo podrá ser utilizada en los volúmenes correspondientes a la tesis a ser presentada ante la Universidad.
- 7) Una vez sustentado y aprobado el trabajo de investigación los tesisistas, se comprometen a entregar a la EPS. SEDACUSCO S.A. un ejemplar en físico y en formato digital.
- 8) Cualquier copia o publicación del trabajo de tesis, deberá hacerse previa autorización de la EPS SEDACUSCO S.A. hasta antes de su sustentación.



#### **CLÁUSULA QUINTA: DERECHOS DE LAS PARTES**

##### **DERECHOS DE LA EPS**

La EPS., si lo estima conveniente, podrá difundir los resultados mencionados, siempre que respete los derechos de propiedad intelectual e industrial que puedan originarse.

##### **DERECHO DE LOS TESISISTAS**

**LOS TESISISTAS** tienen derecho a ser reconocidos como titular de los derechos de propiedad intelectual que le puedan corresponder.

#### **CLÁUSULA SEXTA: COORDINACIÓN ENTRE LAS PARTES**

Con el propósito de lograr una eficaz ejecución del presente convenio, las partes realizarán una permanente coordinación, verificación y supervisión a través de sus encargados, designando como Coordinadores:

- Por la **EPS**: Designará al personal del área competente, el cual se dará a conocer mediante Carta, por la Gerencia de Administración y Finanzas una vez suscrito el presente convenio.
- Por **LOS TESISISTAS**: Dra. Amanda Rosa Maldonado Farfán Docente Principal de dedicación exclusiva UNSAAC.

#### **CLÁUSULA SÉPTIMA. - LIBRE ADHESIÓN Y SEPARACIÓN**

De conformidad a lo establecido por el numeral 88.3 del artículo 88° del Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado con Decreto Supremo N° 004-2019-JUS, LAS PARTES suscriben el presente convenio de manera libre y de conformidad a sus competencias.

#### **CLÁUSULA OCTAVA. - DEL PLAZO.**

La vigencia del presente Convenio es de SEIS (06) meses, que serán contados a partir del día siguiente de la suscripción de presente convenio por las partes.

#### **CLÁUSULA NOVENA: DE LA RESOLUCIÓN.**

Sin perjuicio del plazo de la vigencia establecido en la cláusula anterior, el presente convenio podrá ser resuelto, bastando para ello comunicarlo por escrito:

1. Cualquiera de las Partes podrá resolver el presente Convenio, cursando a la otra parte una Carta, con la exposición de motivos que fundamenta su decisión, con no menos de 5 días naturales de anticipación para su resolución.
2. Por acuerdo de las partes, el cual debe constar por escrito
3. Por incumplimiento injustificado de las obligaciones asumidas por las partes en el presente convenio.
4. Por razones de fuerza mayor o caso fortuito que no permita que una de las partes continúe cualquiera de las obligaciones contraídas.
5. Cuando **LOS TESISISTAS** hubieran renunciado a proseguir su trabajo de investigación.
6. En caso de incumplimiento de alguna de las cláusulas previstas en el presente documento o en la Normativa reguladora de los procedimientos de admisión del proyecto de tesis, de elaboración.

#### **CLÁUSULA DÉCIMA. - DE LAS MODIFICACIONES.**

Las partes, de común acuerdo, podrán revisar los alcances del Convenio y efectuar los ajustes, modificaciones y/o ampliaciones de los términos que consideren convenientes,





los que constarán en las adendas correspondientes, las cuales formarán parte integrante del presente documento.

**CLÁUSULA ONCEAVA. - DE LAS COMUNICACIONES.**

Toda comunicación que deba ser cursada entre las Partes, se efectuará por escrito y se entenderá válidamente realizada desde el momento en que el documento correspondiente sea entregado al destinatario, en los domicilios consignados en la parte introductoria del presente Convenio; toda variación del domicilio deberá ser comunicada a la otra parte por escrito.

**CLÁUSULA DOCEAVA.- DEL FINANCIAMIENTO.**

Las Partes convienen en precisar que tanto la celebración como la ejecución del presente Convenio Específico de Cooperación, no generará transferencias de recursos, compromisos financieros, ni pagos como contraprestación alguna de las partes, sino la colaboración eficaz que coadyuve al cumplimiento de sus fines.

**CLÁUSULA TRECEAVA.- DE LA SOLUCIÓN DE CONTROVERSIAS.**

Las Partes declaran que celebran el presente Convenio, conforme a las reglas de buena fe y común intención, en virtud de lo cual acuerdan que, en caso de producirse alguna discrepancia o controversia en la interpretación, ejecución y/o eventual incumplimiento del Convenio, será resuelta en forma armoniosa.

Estando de acuerdo las partes con lo expresado en todas y cada una de las cláusulas del presente Convenio, se obligan a su fiel cumplimiento y lo suscriben en dos (02) ejemplares de igual valor, en lugar y fecha indicada por las Partes.

Cusco, 23 de abril de 2024.

  
 r/ Amelia Callapin Guico  
 N° DNI : 73863679

  
 ING. YAREL SILVA GUEVARA  
 Gerente General

**Anexo B: Hoja de seguridad del reactivo ácido sulfúrico 95-97%.****FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 8.11  
 Fecha de revisión 22.01.2025  
 Fecha de impresión 13.04.2025  
 GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

**SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa****1.1 Identificadores del producto**

Nombre del producto : Ácido sulfurico 95-97% p.a. EMSURE® ISO

Referencia : 1.00731  
 Artículo número : 100731  
 Marca : Millipore  
 No. Índice : 016-020-00-8  
 REACH No. : 01-2119458838-20-XXXX  
 No. CAS : 7664-93-9

**1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados**

Usos identificados : Análisis químico, Producción química

**1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.  
 3050 SPRUCE ST  
 ST. LOUIS MO 63103  
 UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765  
 Fax : +1 800 325-5052

**1.4 Teléfono de emergencia**

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-  
 527-3887 CHEMTREC (International) 24  
 Hours/day; 7 Days/week

**SECCIÓN 2. Identificación de los peligros****2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla**

|                                              |                                                                        |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Corrosivo para los metales,<br>(Categoría 1) | H290: Puede ser corrosivo para los metales.                            |
| Corrosión cutáneas, (Sub-<br>categoría 1A)   | H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves. |
| Lesiones oculares graves,<br>(Categoría 1)   | H318: Provoca lesiones oculares graves.                                |

---

**SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento**
**7.1 Precauciones para una manipulación segura**

Ver precauciones en la sección 2.2

**7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**
**Condiciones de almacenamiento**

No usar recipientes metálicos.

Bien cerrado.

Temperatura de almacenaje recomendada indicada en la etiqueta del producto.

**Clase de almacenamiento**

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 8B: Materiales corrosivos peligrosos, no combustibles

**7.3 Usos específicos finales**

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

---

**SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual**
**8.1 Parámetros de control**

**Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.**

**Nivel sin efecto derivado (DNEL)**

| Área de aplicación | Vía de exposición | Efecto en la salud              | Valor                  |
|--------------------|-------------------|---------------------------------|------------------------|
| Trabajadores       | Inhalación        | Aguda - efectos locales         | 0,1 mg/m <sup>3</sup>  |
| Trabajadores       | Inhalación        | A largo plazo - efectos locales | 0,05 mg/m <sup>3</sup> |

**Concentración prevista sin efecto (PNEC)**

| Compartimento                                     | Valor        |
|---------------------------------------------------|--------------|
| Agua de mar                                       | 0,00025 mg/l |
| Agua dulce                                        | 0,0025 mg/l  |
| Sedimento marino                                  | 0,002 mg/kg  |
| Sedimento de agua dulce                           | 0,002 mg/kg  |
| Planta de tratamiento de aguas residuales in situ | 8,8 mg/l     |



## Anexo C: Hoja de seguridad del reactivo peróxido de hidrógeno 30%.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                         |                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                         | <a href="http://www.sigmaaldrich.com">www.sigmaaldrich.com</a> |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p><b>FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD</b></p> <p>de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>Versión 9.4<br/> Fecha de revisión 27.03.2025<br/> Fecha de impresión 13.04.2025<br/> GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA</p> </div> </div> |                                                                                                         |                                                                |
| <b>SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |                                                                |
| <b>1.1 Identificadores del producto</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                         |                                                                |
| Nombre del producto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | : Hidrogeno peroxido 30 % estabilizado<br>EMPROVE® ESSENTIAL Ph Eur,BP,USP                              |                                                                |
| Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | : 1.08597                                                                                               |                                                                |
| Artículo número                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | : 108597                                                                                                |                                                                |
| Marca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | : Millipore                                                                                             |                                                                |
| REACH No.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | :                                                                                                       |                                                                |
| <b>1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados</b>                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                         |                                                                |
| Usos identificados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | : Producción y análisis farmacéuticos                                                                   |                                                                |
| <b>1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                         |                                                                |
| Compañía                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | : Sigma-Aldrich Inc.<br>3050 SPRUCE ST<br>ST. LOUIS MO 63103<br>UNITED STATES                           |                                                                |
| Teléfono                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | : +1 314 771-5765                                                                                       |                                                                |
| Fax                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | : +1 800 325-5052                                                                                       |                                                                |
| <b>1.4 Teléfono de emergencia</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                         |                                                                |
| Teléfono de Urgencia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-<br>527-3887 CHEMTREC (International) 24<br>Hours/day; 7 Days/week |                                                                |
| <b>SECCIÓN 2. Identificación de los peligros</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                         |                                                                |
| <b>2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                         |                                                                |
| Lesiones oculares graves,<br>(Categoría 1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | H318: Provoca lesiones oculares graves.                                                                 |                                                                |
| <b>2.2 Elementos de la etiqueta</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                         |                                                                |
| <b>Etiquetado de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                         |                                                                |
| Pictograma                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                      |                                                                |
| Palabra de advertencia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Peligro                                                                                                 |                                                                |

---

## SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

### 6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Indicaciones para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia: No respirar los vapores, aerosoles. Evitar el contacto con la sustancia. Asegúrese una ventilación apropiada. Evacúe el área de peligro, respete los procedimientos de emergencia, consulte con expertos.  
Equipo de protección individual, ver sección 8.

### 6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

No tirar los residuos por el desagüe.

### 6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

Cubra las alcantarillas. Recoja, una y aspire los derrames. Observe posibles restricciones de materiales (véanse indicaciones en las secciones 7 o 10). Recoger con material absorbente de líquidos y neutralizante, p. ej. con Chemisorb® H\* (art. Merck 101595). Proceder a la eliminación de los residuos. Aclarar.

### 6.4 Referencia a otras secciones

Para eliminación de desechos ver sección 13.

---

## SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

### 7.1 Precauciones para una manipulación segura

#### Consejos para una manipulación segura

Observar las indicaciones de la etiqueta.

#### Medidas de higiene

Sustituir inmediatamente la ropa contaminada. Protección preventiva de la piel. Lavar cara y manos al término del trabajo.

Ver precauciones en la sección 2.2

### 7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

#### Condiciones de almacenamiento

No usar recipientes metálicos. Cerrar los recipientes permitiendo el escape de la presión interior (p. ej. con válvula de seguridad).

Bien cerrado. Protejido de la luz. No almacenar cerca de materiales combustibles.

Temperatura de almacenaje recomendada indicada en la etiqueta del producto.

#### Clase de almacenamiento

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 5.1B: Materiales oxidantes peligrosos

### 7.3 Usos específicos finales

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

## Anexo C: Hoja de seguridad del reactivo hidróxido de sodio.


[www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com)

### FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 9.1  
 Fecha de revisión 11.02.2025  
 Fecha de impresión 13.04.2025  
 GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

---

#### SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

**1.1 Identificadores del producto**

Nombre del producto : Sodio hidroxido en lentejas, p.a. EMSURE®

Referencia : 1.06498  
 Artículo número : 106498  
 Marca : Millipore  
 No. Indice : 011-002-00-6  
 REACH No. : 01-2119457892-27-XXXX  
 No. CAS : 1310-73-2

**1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados**

Usos identificados : Análisis químico, Producción química

**1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.  
 3050 SPRUCE ST  
 ST. LOUIS MO 63103  
 UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765  
 Fax : +1 800 325-5052

**1.4 Teléfono de emergencia**

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-527-3887 CHEMTREC (International) 24 Hours/day; 7 Days/week

#### SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

##### 2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

|                                              |                                                                        |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Corrosivo para los metales,<br>(Categoría 1) | H290: Puede ser corrosivo para los metales.                            |
| Corrosión cutáneas, (Sub-categoría 1A)       | H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves. |
| Lesiones oculares graves,<br>(Categoría 1)   | H318: Provoca lesiones oculares graves.                                |

---

## **SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento**

### **7.1 Precauciones para una manipulación segura**

Ver precauciones en la sección 2.2

### **7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**

#### **Condiciones de almacenamiento**

No almacenar en recipientes de aluminio, estaño o cinc. No usar recipientes metálicos. Bien cerrado. Seco.

Temperatura de almacenaje recomendada indicada en la etiqueta del producto.

#### **Clase de almacenamiento**

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 8A: Materiales corrosivos peligrosos, combustibles

### **7.3 Usos específicos finales**

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

---

## **SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual**

### **8.1 Parámetros de control**

**Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.**

### **8.2 Controles de la exposición**

#### **Protección personal**

##### **Protección de los ojos/ la cara**

Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE). Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

##### **Protección de la piel**

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: [www.kcl.de](http://www.kcl.de))

Sumerción

Material: Caucho nitrilo

espesura mínima de capa: 0,11 mm

Tiempo de penetración: 480 min

Material probado: KCL 741 Dermatrill® L

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-

## Anexo C: Hoja de seguridad del reactivo sulfato de hierro (II) heptahidratado.


[www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com)

### FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 6.7  
 Fecha de revisión 16.02.2024  
 Fecha de impresión 13.04.2025  
 GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

#### SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

##### 1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto : Sulfato de hierro(II) heptahidrato

Referencia : 215422  
 Marca : SIGALD  
 No. Índice : 026-003-01-4  
 REACH No. : 01-2119513203-57-XXXX  
 No. CAS : 7782-63-0

##### 1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Reactivos para laboratorio, Fabricación de sustancias

##### 1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.  
 3050 SPRUCE ST  
 ST. LOUIS MO 63103  
 UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765  
 Fax : +1 800 325-5052

##### 1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-527-3887 CHEMTREC (International) 24 Hours/day; 7 Days/week

#### SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

##### 2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Toxicidad aguda, (Categoría 4) H302: Nocivo en caso de ingestión.

Irritación cutáneas, (Categoría 2) H315: Provoca irritación cutánea.

Irritación ocular, (Categoría 2) H319: Provoca irritación ocular grave.

---

**SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual****8.1 Parámetros de control**

**Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.**

**8.2 Controles de la exposición****Protección personal****Protección de los ojos/ la cara**

Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE).

Gafas de seguridad

**Protección de la piel**

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: [www.kcl.de](http://www.kcl.de))

Sumerción

Material: Caucho nitrilo

espesura minima de capa: 0,11 mm

Tiempo de penetración: 480 min

Material probado:KCL 741 Dermatrill® L

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: [www.kcl.de](http://www.kcl.de))

Salpicaduras

Material: Caucho nitrilo

espesura minima de capa: 0,11 mm

Tiempo de penetración: 480 min

Material probado:KCL 741 Dermatrill® L

**Protección Corporal**

prendas de protección

**Protección respiratoria**

Tipo de Filtro recomendado: Filtro B-(P2)