

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
ESCUELA DE POSGRADO**

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**



**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON EN EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA  
TEXTIL A NIVEL PILOTO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO  
SOSTENIBLE**

**AUTORES:**

**YORSEL SOLEDAD MAYHUA SOTO**

**JUAN JESÚS MALPICA MATEO**

**ASESOR:**

**ALEX WILLY PILCO NUÑEZ**

**LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL  
AMBIENTE**

**Callao, 2023**

**PERÚ**



## Document Information

Analyzed document	MAYHUA SOTO, Yorsel Soledad - MALPICA MATEO, Juan Jesús-MAESTRIA-2023.pdf (D173274938)
Submitted	2023-08-31 06:31:00
Submitted by	
Submitter email	fiarn.posgrado@unac.edu.pe
Similarity	12%
Analysis address	fiarn.posgrado.unac@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / SISTEMA FOTO-FENTON Y ADSORCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL LABORATORIO DE QUÍMICA ORGÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNAC.pdf</b> Document SISTEMA FOTO-FENTON Y ADSORCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL LABORATORIO DE QUÍMICA ORGÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNAC.pdf (D125007421) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com	 3
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / TESIS_INYECCIONES DE DIOXIDO DE CARBONO EN EL PROCESO DE COAGULACION FLOCULACION PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES A NIVEL PILOTO, 2023..pdf</b> Document TESIS_INYECCIONES DE DIOXIDO DE CARBONO EN EL PROCESO DE COAGULACION FLOCULACION PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES A NIVEL PILOTO, 2023..pdf (D172858906) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com	 8
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / 10. TESIS - TUPIA MONTES-VALERIO CLAUDIO.pdf</b> Document 10. TESIS - TUPIA MONTES-VALERIO CLAUDIO.pdf (D163882467) Submitted by: fiq.investigacion@unac.edu.pe Receiver: fiq.investigacion.unac@analysis.arkund.com	 6
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / TESIS 10.09.19.docx</b> Document TESIS 10.09.19.docx (D56101493) Submitted by: fiq.investigacion@unac.edu.pe Receiver: maria.toledo.palomino.unac@analysis.arkund.com	 8
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / INFORME FINAL DE TESIS-Garcia Campos - Zevallos Palacio.pdf</b> Document INFORME FINAL DE TESIS-Garcia Campos - Zevallos Palacio.pdf (D113720306) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com	 15
<b>SA</b>	<b>Desarrollo de Trabajo de Titulación (version final - revisión).pdf</b> Document Desarrollo de Trabajo de Titulación (version final - revisión).pdf (D22898779)	 1

## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD:** INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:** UNIDAD DE POSTGRADO – FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

**TÍTULO:** OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON ACTIVADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A NIVEL PILOTO

### **AUTORES:**

MAYHUA SOTO YORSEL SOLEDAD/ ORCID ID: 0000-0002-0722-6980 / DNI: 42780196

MALPICA MATEO JUAN JESÚS / ORCID ID: 0009-0006-3018-106X / DNI: 40661514

### **ASESOR:**

ALEX WILY PILCO NUÑEZ / ORCID ID: 0000-0002-3911-6428 / DNI: 10291118

### **LUGAR DE EJECUCIÓN:**

EN LOS LABORATORIOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS DE TECSUP N°1 - LIMA

### **UNIDAD DE ANÁLISIS:**

PROCESO FENTON APLICADO A LAS AGUAS RESIDUALES DE INDUSTRIA TEXTIL

### **TIPO/ ENFOQUE/ DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:**

APLICATIVA/ CUANTITATIVA/ EXPERIMENTAL

### **TEMA OCDE:**

1.05.08 CIENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE

## HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

### MIEMBROS DEL JURADO:

Dr. EDUARDO VALDEMAR TRUJILLO FLORES: PRESIDENTE

Mtro. CARLOS ODORICO TOME RAMOS : SECRETARIO

Dr. ENRIQUE GUSTAVO GARCÍA TALLEDO : VOCAL

Mg. LUIS ENRIQUE LOZANO VIEYTES : VOCAL

Mg. ALEX WILLY PILCO NUÑEZ : ASESOR DE TESIS

N° de libro 01

N° de folio 08

N° de acta : 005-2023-ICTT/UPG-FIARN-UNAC

Fecha de aprobación de Tesis : 23 de setiembre del 2023

Resolución de Comité Directivo : No 085-2023-D-UPG-FIARN-UNAC



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**  
*Unidad de Posgrado - Investigación*

**CONSTANCIA DE ANTIPLAGIO N° 009-2023-OUR/URK –**  
**UPG FIARN**

LA UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO, QUE SUSCRIBE:

**HACE CONSTAR**

QUE, LOS BACHILLERES:

**MAYHUA SOTO, Yorsel Soledad**  
**MALPICA MATEO, Juan Jesús**

DE LA MAESTRÍA EN “GESTIÓN AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE”, HA PRESENTADO SU TESIS TITULADA: “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A NIVEL PILOTO”, PARA LA EVALUACIÓN ANTIPLAGIO ORIGINAL, OBTENIENDO COMO RESULTADO 12% DE SIMILITUD, SEGÚN EL DOCUMENTO N° D173274938, ESTANDO DENTRO DEL PORCENTAJE PERMITIDO (MÁXIMO 20%, ESTABLECIDO EN LA DIRECTIVA N° 013-2019-R “DIRECTIVA QUE REGULA Y NORMA EL USO DEL SOFTWARE PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA AUTENTICIDAD DE DOCUMENTOS ACADÉMICOS EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO”, APROBADO CON RES. N° 704-2019-R DEL 05 DE JULIO DE 2019).

SE EXPIDE LA PRESENTE CONSTANCIA A SOLICITUD DE LOS INTERESADOS PARA REALIZAR TRÁMITES CORRESPONDIENTES A LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.

Bellavista, 30 de agosto del 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales



MTRO. AMÉRICO CARLOS MILLA FIGUEROA  
RESPONSABLE DE TESIS  
UPG- FIARN - UNAC

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales



DR. MÁXIMO FIDEL BACA NEGLIA  
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN  
FIARN - UNAC

## **DEDICATORIA**

A mis padres, hijos y esposo por el apoyo incondicional en todo momento y fortaleza necesaria para mejorar cada día.

*Yorsel Soledad Mayhua Soto*

A toda mi familia, por los consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

*Juan Jesús Malpica Mateo*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a Dios por la fortaleza que nos da seguir cumpliendo nuestras metas, por brindarnos salud y armonía en cada uno de nuestras familias.

A nuestra familia por el apoyo incondicional.

A nuestro asesor MSc. Alex Pilco Núñez, por orientarnos académicamente, por su paciencia y guía durante la ejecución del presente proyecto de investigación.

A los docentes de los diferentes módulos del Taller de tesis por sus enseñanzas y consejos durante el desarrollo de nuestro trabajo de investigación.

A la institución Tecsup N° 1, por el apoyo incondicional para el desarrollo de la parte experimental de presente proyecto en sus instalaciones de laboratorio, ya que contribuye a la parte educativa y de investigación.

A la empresa textil por proporcionar información de sus procesos, las facilidades para el ingreso a sus instalaciones, para poder obtener las muestras del efluente textil de su planta de tratamiento de aguas residuales, con fines de mejora.

Para terminar, agradecer a los colegas nuestros centros laborales por brindarnos su apoyo, experiencia y asesoría durante el desarrollo del presente proyecto.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO .....	1
ÍNDICE DE TABLAS .....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	6
RESUMEN .....	7
RESUMO .....	8
INTRODUCCIÓN .....	9
I.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	10
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	10
1.2. Formulación del problema .....	12
1.2.1. Problema General .....	12
1.2.2. Problemas Específicos.....	13
1.3. Objetivos .....	13
1.3.1. Objetivo general .....	13
1.3.2. Objetivos específicos .....	13
1.4. Justificación .....	13
1.5. Delimitantes de la investigación .....	14
1.5.1. Teórica .....	14
1.5.2. Temporal .....	15
1.5.3. Espacial.....	15
II.   MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Antecedentes del estudio .....	16
2.1.1. Internacionales.....	16
2.1.2. Nacionales .....	19
2.2. Bases Teóricas.....	22
2.2.1. Métodos de Oxidación Avanzada (AOX).....	22
2.2.2. Reacción Fenton .....	26
2.2.3. Procesos Fenton con metabisulfito de sodio.....	29
2.2.4. Parámetros que influyen en el proceso Fenton.....	30
2.2.5. Dosis óptimas de reactivos .....	32
2.3. Marco conceptual .....	33
2.3.1. Tratamiento de aguas residuales .....	33

2.3.2.	Aguas Residuales Textiles .....	34
2.3.3.	Parámetros fisicoquímicos de los contaminantes orgánicos persistentes .....	35
2.4.	Definición de términos básicos .....	36
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES .....	39
3.1.	Hipótesis general.....	39
3.2.	Hipótesis específicas.....	39
3.3.	Operacionalización de las variables .....	40
3.3.1.	Variable dependiente .....	40
3.3.2.	Variable independiente.....	40
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	42
4.1.	Diseño metodológico .....	42
4.2.	Método de investigación .....	43
4.3.	Población y muestra .....	44
4.3.1.	Población .....	44
4.3.2.	Muestra .....	45
4.3.3.	Muestreo .....	45
4.4.	Lugar del estudio .....	46
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	46
4.5.1.	Técnicas.....	46
4.5.2.	Instrumentos .....	48
4.6.	Análisis y procesamiento de datos .....	53
4.6.1.	Pruebas de ensayos y mediciones en laboratorio .....	53
4.6.2.	Procesamiento de recolección de datos.....	54
4.7.	Aspectos éticos en investigación.....	56
V.	RESULTADOS.....	57
5.1.	Resultados descriptivos.....	57
5.1.1.	Caracterización de la muestra.....	57
5.1.2.	Determinación del DQO en el proceso Fenton.....	58
5.1.3.	Procesamiento de los resultados obtenidos .....	61
5.2.	Resultados inferenciales .....	69
5.2.1.	Análisis de varianza (ANOVA).....	70
5.2.2.	Los residuos deben de ser independientes .....	73
5.2.3.	Los residuos deben de tener varianza constante .....	74

VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	76
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	76
6.1.1.	Contrastación de hipótesis para el DQO .....	76
6.2.	Contrastación de las hipótesis de investigación .....	85
6.2.1.	Hipótesis general .....	85
6.2.2.	Hipótesis específicas.....	86
6.3.	Contrastación de los resultados con otros estudios similares .....	88
6.4.	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes .....	89
VII.	CONCLUSIONES.....	91
VIII.	RECOMENDACIONES .....	92
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93
	ANEXOS.....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Potencial de oxidación</i> .....	23
Tabla 2 <i>Clasificación de procesos de oxidación avanzada</i> .....	25
Tabla 3 <i>Aplicación del proceso Fenton</i> .....	29
Tabla 4 <i>Carga contaminante de los efluentes procedentes del sector textil</i> .....	35
Tabla 5 <i>Parámetros VMA a evaluar</i> .....	38
Tabla 6 <i>Matriz de operacionalización de las variables</i> .....	41
Tabla 7 <i>Métodos para la caracterización fisicoquímica del agua residual de la industria textil</i> .....	46
Tabla 8 <i>Materiales usados en las pruebas experimentales</i> .....	49
Tabla 9 <i>Equipos usados en las pruebas experimentales</i> .....	49
Tabla 10 <i>Reactivos usados en las pruebas experimentales</i> .....	50
Tabla 11 <i>Lista de cotejo de datos – antes, durante y después</i> .....	51
Tabla 12 <i>Diseño factorial <math>2^4 = 16</math> pruebas experimentales con una réplica</i> .....	52
Tabla 13 <i>Caracterización de la muestra</i> .....	57
Tabla 14 <i>Determinación de condiciones óptimas del trabajo del proceso Fenton</i> .....	58
Tabla 15 <i>Promedio de los valores de DQO durante el proceso Fenton</i> .....	60
Tabla 16 <i>Resultados de DQO de acuerdo a la interacción de los 4 factores y sus niveles</i> .....	61
Tabla 17 <i>Codificación de las interacciones de los 4 factores y sus niveles</i> .....	61
Tabla 18 <i>Medias marginales estimadas para los 4 factores</i> .....	62
Tabla 19 <i>Medias marginales estimadas para la interacción de 2 factores</i> .....	63
Tabla 20 <i>Medias marginales estimadas para la interacción de 3 factores</i> .....	65
Tabla 21 <i>Medias marginales estimadas para interacción de los 4 factores</i> .....	67
Tabla 22 <i>Prueba de normalidad - variables</i> .....	69
Tabla 23 <i>Prueba de t-Student para el DQO</i> .....	70
Tabla 24 <i>Análisis de varianza (ANOVA)</i> .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Estructuras de los colorantes textiles</i> .....	23
Figura 2 <i>Procedimiento industrial del proceso Fenton</i> .....	28
Figura 3 <i>Esquema industrial del proceso Fenton</i> .....	28
Figura 4 <i>Diseño experimental del proyecto de investigación</i> .....	43
Figura 5 <i>Procedimiento de tratamiento proceso Fenton</i> .....	48
Figura 6 <i>Procedimiento de tratamiento proceso Fenton</i> .....	55
Figura 7 <i>Comparación de valores de los parámetros de la muestra y del VMA58</i>	
Figura 8 <i>Gráfica de efectos principales para el DQO</i> .....	63
Figura 9 <i>Grafica de interacción para el DQO</i> .....	65
Figura 10 <i>Grafica de cubos (medias ajustadas) para DQO</i> .....	68
Figura 11 <i>Grafica de probabilidad normal</i> .....	70
Figura 12 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados</i> .....	73
Figura 13 <i>Grafica de aleatoriedad</i> .....	74
Figura 14 <i>Grafica de las varianzas de los residuos</i> .....	75

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>VMA</b>	: Valores Máximos Admisibles
<b>FC</b>	: Fenton convencional
<b>FA</b>	: Fenton activado
<b>D.S.</b>	: Decreto Supremo
<b>DQO</b>	: Demanda química de oxígeno
<b>DBO<sub>5</sub></b>	: Demanda biológica de oxígeno
<b>SST</b>	: Sólidos suspendidos totales
<b>AOX</b>	: Proceso de oxidación avanzada
<b>ECA</b>	: Estándares de calidad ambiental
<b>POA</b>	: Proceso de oxidación avanzada

## RESUMEN

El **presente proyecto de investigación se ha realizado con el propósito** de evaluar la optimización del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, mediante el análisis de la remoción de carga orgánica a través del valor de DQO obtenido durante el tratamiento realizado.

La **metodología empleada** en la investigación fue de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, diseño experimental. La toma de muestras de las aguas residuales se realizó del proceso de teñido de la industria textil. Para la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de la industria textil, se midió los parámetros de pH, Temperatura, Conductividad, Turbidez, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda química de oxígeno (DQO) y Demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>). La determinación de las dimensiones que influyen en el proceso Fenton durante el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil, se realizó mediante la interacción de las 4 dimensiones con sus respectivos niveles las cuales son: pH (2.5 y 3,0), Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1.0 y 1.5 g/L), FeSO<sub>4</sub> (1.0 y 1.5) g/L y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1.0 y 2.0 mL/L). El **resultado** de DQO obtenido es de 374.00 mg/L siendo un 83% de remoción de carga orgánica; con las condiciones de trabajo pH=3.0, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=1.0 g/L, FeSO<sub>4</sub>=1.0 g/L y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=2.0 mL/L.

Se **concluye** que, con la aplicación del proceso Fenton como tratamiento de las aguas residuales de una industria textil y trabajando con los parámetros: pH=3.0, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=1.0 g/L, FeSO<sub>4</sub>=1.0 g/L y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=2.0 mL/L se obtiene un mayor porcentaje de remoción de carga orgánica, garantizando el cumplimiento de los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

**Palabras claves:** Demanda Química de Oxígeno, proceso Fenton, agua residual.

## RESUMO

Este projeto de pesquisa foi realizado com o objetivo de avaliar a otimização do processo Fenton no tratamento de efluentes de uma indústria têxtil, analisando a remoção de carga orgânica através do valor de DQO obtido durante o tratamento realizado.

A metodologia utilizada na pesquisa foi do tipo aplicada, abordagem quantitativa, delineamento experimental. A amostragem de efluentes foi realizada a partir do processo de tingimento da indústria têxtil. Para a caracterização físico-química de efluentes da indústria têxtil, foram medidos os parâmetros de pH, temperatura, condutividade, turbidez, sólidos totais em suspensão (SST), Carência Química de Oxigênio (DQO) e Carência Biológica de Oxigênio (DBO<sub>5</sub>). A determinação das dimensões que influenciam o processo Fenton durante o tratamento de efluentes da indústria têxtil, foi realizada através da interação das 4 dimensões com seus respectivos níveis, que são: pH (2,5 e 3,0), Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1,0 e 1,5 g/L), FeSO<sub>4</sub> (1,0 e 1,5) g/L e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1,0 e 2,0 mL/L). O resultado de DQO obtido é de 374,00 mg/L, com 83% de remoção de carga orgânica; com as condições de trabalho pH=3,0, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=1,0 g/L, FeSO<sub>4</sub>=1,0 g/L e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=2,0 mL/L.

Conclui-se que, com a aplicação do processo Fenton como tratamento de efluente de uma indústria têxtil e trabalhando com os parâmetros: pH=3,0, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=1,0 g/L, FeSO<sub>4</sub>=1,0 g/L e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=2,0 mL/L obtém-se uma maior porcentagem de remoção de carga orgânica, garantindo o cumprimento do VMA de acordo com D.S. Caixa N° 010-2019.

**Palavras-chave:** Demanda Química de Oxigênio, Processo Fenton, Efluentes.



## INTRODUCCIÓN

En nuestro país, la industria textil va incrementando su producción año tras año, ya que la moda cobra cada día más relevancia y eso se puede apreciar en el reconocimiento de los diferentes exponentes de la moda, centros comerciales, así como en la producción textil que se genera en el emporio Gamarra; si bien es cierto esto genera muchas oportunidades de trabajo y emprendimiento. Por otro lado, este tipo de industria se ve vinculada en situaciones perjudiciales a nuestro medio ambiente. El sector textil es considerado como la segunda industria más contaminante del mundo a través de los desechos de sus aguas residuales; por lo tanto, es necesario que estas industrias implementen un sistema adecuado de tratamientos a sus aguas residuales antes de desecharlas al alcantarillado o ver la manera de reutilizarlos dentro de sus procesos.

El objetivo de la investigación es evaluar la influencia del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil. La idea es demostrar que controlando las condiciones del proceso como el pH y la dosis óptima de los reactivos durante la aplicación del proceso Fenton permita tener una eficiencia en la reducción de los contaminantes orgánicos persistentes de aguas residuales de una industria textil, consiguiendo finalmente el mayor % de remoción de carga orgánica evaluado a través del parámetro fisicoquímico como el DQO y así cumplir de manera satisfactoria con la calidad del agua para su disposición final en el sistema de alcantarillado sanitario según la normatividad vigente de los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

La presente investigación es de tipo aplicada, porque nos va ayudar a resolver un problema ambiental, su enfoque es cuantitativo, porque nos basamos en principios teóricos y empleando métodos cuantitativos para la recolección de datos. Además, se centrará en el proceso Fenton que es un método de oxidación avanzada (AOX), que permite oxidar todo compuesto orgánico persistente en el agua residual de una industria textil.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción de la realidad problemática

La industria textil está catalogada como una de las más contaminantes del medio ambiente, en particular debido a los distintos procesos que realizan como encolado, lavado, blanqueamiento, mercerización, teñido y acabado. En estos procesos se utilizan grandes cantidades de agua y energía. (CORTAZAR, y otros, 2016) Por tal motivo, para la reutilización de las aguas residuales y evitar contaminar el medio ambiente es indispensable que estas empresas implementen un tratamiento efectivo a sus aguas residuales.

Dentro del sector textil a nivel mundial, se encuentran dos grupos bien diferenciados de industrias según el curso receptor de sus vertidos: existen industrias que vierten sus aguas residuales a una red cloacal e industrias que vierten a un curso de agua. Este segundo grupo de industrias que vierte directamente a un curso de agua deben cumplir con unos límites de vertido que de manera genérica son más estrictos que los límites de vertido a red cloacal. (LÓPEZ, y otros, 2015)

En los últimos tiempos las industrias textiles en América latina están creciendo rápidamente, por la gran demanda de los consumidores que compran productos de vestir, así como la exportación a otros países. (CORTAZAR, y otros, 2016) Los niveles de producción aumentan progresivamente y por lo tanto los niveles de efluentes de los procesos lo hacen también, por ello muchas fábricas se ven en la necesidad de disponer su propia depuradora de aguas residuales para cumplir con la legislación. (LÓPEZ, y otros, 2015)

El gobierno peruano y algunas industrias involucradas están tomando acciones responsables con la finalidad de cuidar el medio ambiente, pero en realidad son muy pocas las que están comprometidas y estas cuentan con sistemas modernos de tratamiento de efluentes donde realizan procesos químicos, físicos y biológicos para lograr retirar los elementos o sustancias

contaminantes, y tienen un conjunto de profesionales altamente calificados en esta área. (CORTAZAR, y otros, 2016)

Las industrias textiles no siempre tienen la misma producción, por lo que los efluentes van a variar en su color, temperatura, concentración de contaminantes que poseen, la cantidad de sustancias, metales pesados y tóxicos que tienen, entre otros. Por lo tanto, no se puede establecer una única caracterización y tratamiento de efluentes para resolver el problema de todo el conjunto de industrias que operan en el Perú.

Los efluentes textiles poseen elevadas concentraciones de colorantes, contaminantes orgánicos biodegradables y no biodegradables, iones calcio y magnesio que le proporciona dureza, compuestos clorados, sales, metales pesados, sólidos en suspensión, disueltos, entre otros que son provenientes de los diferentes procesos productivos de fibras. (SALAS, 2010)

Por la gran variedad de colorantes químicos utilizados, se generan efluentes de diferentes composiciones. Todas estas aguas residuales pueden ser vertidas a la alcantarilla, río, mar o laguna, entre otros sitios, lo cual al no tener una adecuada caracterización ni tratamiento puede llegar a contaminarlos y, por consiguiente, extinguir la vida acuática. Además, éstas ya no son útiles para los seres humanos ya que no va a ser apta en la utilización para sus necesidades básicas y consumo, lo cual representa un riesgo para la salud; tampoco no será útil para la agricultura y pone en peligro al medio ambiente y la vida de los seres vivos como animales y plantas. (CORTAZAR, y otros, 2016)

Los estándares de calidad ambiental (ECA) siendo el D.S. N° 004-2017-MINAM, los cuales muestran categorías, subcategorías y sub subcategorías y va a depender del uso adecuado que se le dará al agua. Si la industria descarga su efluente al sistema de alcantarillado sanitario tendrá que cumplir con el D. S. N° 010-2019 VIVIENDA, lo cual está encargado el Ministerio de vivienda, nos indica los valores máximos admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario y lo que pasa cuando los usuarios no domésticos descargan sus efluentes no domésticos al

alcantarillado cuyos parámetros y características no cumplen con los VMA establecidos en el decreto supremo. (SALAS, 2010)

Actualmente la industria textil tiene implementado un tratamiento biológico, utilizando fangos activados para el tratamiento de sus efluentes, sin embargo, la eficiencia de este sistema de tratamiento se ha visto afectado por el incremento de los efluentes debido a la elevada producción que ha tenido en estos últimos meses, dando como resultado el no cumplimiento de los VMA y el aumento en la generación de lodos como residuos peligrosos ocasionando un incremento en los costos de operación y mantenimiento del sistema tratamiento y de disposición final de los mismos.

Frente a este escenario se ha visto la necesidad de buscar alternativas de solución que permitan cumplir con la normativa nacional vigente, evitar el deterioro de las redes de alcantarillado, mitigar la contaminación con su desembocadura a cuerpos receptores de agua y disminuir los costos de disposición final de los lodos de aguas residuales que se encuentran catalogados como residuos peligrosos. El proceso Fenton que es un método de oxidación avanzada, va a permitir la degradación de los contaminantes orgánicos persistentes en las aguas residuales de la industria textil. A través de la aplicación de este proceso como tratamiento, se va evaluar la influencia del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil para cumplir los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

Por tal motivo, se desarrolla el siguiente proyecto de investigación “Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil a nivel piloto”.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cómo será la optimización del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

**P.1.** ¿Cuál será el pH del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?

**P.2.** ¿Cuál será la masa de metabisulfito de sodio proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?

**P.3.** ¿Cuál será la masa de sulfato ferroso del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?

**P.4.** ¿Cuál será el volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar la optimización del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

**O.1.** Determinar el pH del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**O.2.** Determinar la masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**O.3.** Determinar la masa de sulfato ferroso del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**O.4.** Determinar el volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

### **1.4. Justificación**

Debido a la contaminación que ocasionan las aguas residuales liberada por la industria textil, ha ocasionado que surjan iniciativas para la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento para estos efluentes planteando soluciones a esta problemática.

Para los contaminantes orgánicos persistentes, los procedimientos generalmente usados, resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos y cada vez más crecientemente, se está recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas tecnologías o procesos de oxidación avanzados (AOX), muy poco aplicados. (SALAS, 2010)

Por ende, surge la idea de aplicar, evaluar y determinar la eficiencia del proceso Fenton como tratamiento a un efluente textil para lograr reducir los contaminantes orgánicos persistentes y cumplir con los valores máximos admisibles (VMA) según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA. Además, al contribuir con la biodegradación y eliminación de los contaminantes orgánicos persistentes, se pretende disminuir los costos de disposición final de los mismos, lo que conlleva utilizar un método más viable para el tratamiento de estos efluentes y un beneficio económico para la empresa.

## **1.5. Delimitantes de la investigación**

Los delimitantes de la investigación que se presentó durante la realización de esta investigación son las siguientes:

### **1.5.1. Teórica**

Para la ejecución del presente proyecto se revisaron varias fuentes de información como, por ejemplo, revistas, artículos, papers, libros respecto a la aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de efluentes. Encontrando información tanto en el ámbito internacional y nacional sobre el uso del proceso Fenton en el tratamiento de efluentes textiles, por lo que se considera como referencia para este proyecto.

El proceso Fenton es un método de oxidación avanzada (AOX), que permite oxidar todo compuesto orgánico persistente en el agua residual con ayuda de los radicales hidroxilos hasta convertir toda la materia en dióxido de carbono y agua o al menos en compuestos menos peligrosos.

Los estándares de calidad ambiental (ECA) siendo el D.S. N° 004-2017-MINAM.

Los valores máximos admisibles (VMA) según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

### **1.5.2. Temporal**

La investigación se desarrolló en periodo de 2 años (julio del 2021 al junio del 2023); con la identificación y planteamiento del problema, toma de muestra y los análisis experimentales.

### **1.5.3. Espacial**

El análisis experimental del proyecto se realizó en los laboratorios de análisis químicos del instituto Tecsup N°1 en la sede de Lima.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del estudio

Los antecedentes que se han revisado en la presente investigación son:

#### 2.1.1. Internacionales

(CORREA, 2016), en su investigación “Evaluación del proceso Ozono-Fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil”, tuvo como **objetivo** la optimización de las condiciones de operación del sistema acoplado entre el proceso de ozonificación y el proceso Fenton para tratamiento de aguas residuales de una industria textil. La **metodología** fue experimental y estadística lo cual le permitió identificar los factores más significativos del proceso aplicado, para luego poder optimizar las variables de proceso. Los **resultados** obtenidos mediante la aplicación del proceso de O<sub>3</sub>/F permitieron una degradación de la DQO de hasta el 65% del efluente textil. En **conclusión**, el proceso O<sub>3</sub>/F puede ser implementado como una alternativa de tratamiento para efluentes de industria textil, no requiere consumos de energía eléctrica para el funcionamiento de las lámparas UV, ni reactivos para el ajuste de los pH, por lo que esta técnica es la más viables y económicamente rentable.

(GILPAVAS, 2017), en su investigación “Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia”, tuvo como **objetivo** realizar un tratamiento a las aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia. La **metodología** fue experimental, al inicio se caracterizó la muestra, luego se aplicó el método de oxidación avanzada Fenton intensificado con radiación de ondas de ultrasonido, seguido de un pretratamiento de coagulación y floculación. Los **resultados** obtenidos demostraron que en estas condiciones de operación aplicadas durante el proceso de tratamiento de efluentes se logró remover hasta el 82% de la DQO del efluente textil y acoplando el proceso de US/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>+2</sup> se alcanzó a remover hasta un 95% de eliminación en 90



minutos de reacción. En **conclusión**, los procesos Fenton y Foto-Fenton acoplados a ultrasonido y coagulación química para el tratamiento de aguas en la industria textil son eficientes para la remoción y degradación de los contaminantes presentes.

(FAVERO, y otros, 2018), en su investigación "Evaluation of the efficiency of coagulation/ flocculation and Fenton process in reduction of colour, turbidity and COD of a textile effluent", tuvo como **objetivo** presentar la eficiencia de los procesos fisicoquímicos de coagulación, floculación y proceso oxidativo avanzado de Fenton en la reducción de los parámetros de color, turbidez y demanda química de oxígeno (DQO) de un efluente real de una industria textil. La **metodología** fue experimental porque evaluó el efecto del proceso oxidativo avanzado Fenton aplicación en la eliminación de color, DQO y turbiedad del efluente previamente tratado mediante el proceso fisicoquímico. Las eliminaciones de estos parámetros se analizaron en dos pH diferentes rangos (pH 6.0 y 7.0). Tanto en pH 6.0 como en pH 7.0 se observaron reducciones en todos los parámetros, obteniendo 170.78 mg O<sub>2</sub>/L de DQO, 22.19 mg/L de color y 0.80 NTU de turbidez (a pH 6,0) y 151.80 mg O<sub>2</sub>/L de DQO, 26.73 mg/L de color, 0.94 NTU de turbidez (a pH 7,0). Teniendo como **resultado** después de las pruebas 72.60% de DQO, 36.25% de color y 98.59% de turbidez fueron removidos, utilizando coagulante de policloruro de aluminio y floculante AN 905. En **conclusión**, de acuerdo a los resultados obtenidos se demuestra la eficacia de este proceso en la reducción de los parámetros analizados.

(ILHAN, y otros, 2019), en su investigación "Treatability of raw textile wastewater using Fenton process and its comparison with chemical coagulation", tuvo como **objetivo** realizar el tratamiento de aguas textiles utilizando el proceso Fenton, optimizan el rendimiento del proceso Fenton para minimizar el daño de las aguas residuales que la industria textil causaba al medio ambiente. La **metodología** fue experimental porque en este caso regularon la dosificación de los reactivos Fe<sup>+2</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, el pH y el tiempo de reacción, utilizando como métodos la demanda química de oxígeno (DQO), color y carbono orgánico total (COT). Los **resultados** se compararon con los resultados de la coagulación química. El

parámetro más eficaz del proceso Fenton se determinó como dosificación de  $\text{Fe}^{+2}$  para este tipo de muestra de aguas residuales. Como resultado de la optimización, se obtuvieron eficiencias del 82,8%, 96,2% y 75,6% para DQO, color y remoción COT, respectivamente, mediante el proceso de Fenton. En **conclusión**, las eficiencias de eliminación se pueden lograr a través de Fenton controlando los parámetros de la concentración de  $\text{Fe}^{+2}$  y la mejor la mejor remoción se logró con 1,093 mg/L  $\text{Fe}^{+2}$  concentración, 1,600 mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentración, pH 3,2 y 150 min de tratamiento.

(RAMOS, y otros, 2021), en sus investigaciones “A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes”, debido a las limitaciones y baja eficiencia de los procesos convencionales, tuvo como **objetivo** evaluar alternativas para el tratamiento de efluentes textiles. La **metodología** fue experimental, entre ellos destacan los procesos de oxidación de Fenton, que se basan en el uso de hierro como catalizador en la conversión de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en radicales libres altamente reactivos. En sus investigaciones obtuvo como **resultado** al proceso Fenton como alternativa al tratamiento de efluentes textiles, así como un estudio de la reducción de importantes parámetros de caracterización como concentración de materia orgánica, color, turbidez para efluentes textiles, reduciendo en promedio 82% de DQO y 95% de color. En **conclusión**, utilizando el proceso Fenton se logró mayor porcentaje de remoción de la materia orgánica, teniendo como resultados efluentes tratados que presentan menor toxicidad, los cuales han sido reutilizados en la etapa de teñido, aunque esto aún se está evaluando.

(ZHANG, y otros, 2021), su estudio de investigación “Treatment of textile wastewater using advanced oxidation processes a critical review”, tuvo como **objetivo** realizar una revisión exhaustiva de los procesos de oxidación avanzada (AOP) en el tratamiento de aguas residuales textiles, incluidos sus rendimientos, mecanismos, ventajas, desventajas, factores influyentes y energía eléctrica. La **metodología** fue descriptiva porque tuvo como referencias trabajos de oxidación avanzada las cuales tuvo que analizar los procesos realizados. Como **resultado** menciona, que el proceso Fenton puede tratar efluentes textiles al costo más

bajo posible debido a la entrada mínima de energía y el bajo costo de los reactivos, mientras que los AOP basados en ultrasonido muestran la eficiencia eléctrica más baja debido al alto consumo de energía. En **conclusión**, analizando los resultados de una implementación a gran escala de la tecnología Fenton mejorada en una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria textil, la tecnología mejorada de Fenton es eficiente y rentable en el tratamiento industrial para efluentes textiles.

### 2.1.2. Nacionales

(AMES, y otros, 2015), en su investigación “Determinación de la tecnología más adecuada para remover los contaminantes de los efluentes industriales de colorantes de bixina y carmín”, tiene como **objetivo** determinar la tecnología fisicoquímica más adecuada para la remoción de contaminantes de los efluentes industriales de colorantes de bixina y carmín. La **metodología** es experimental utilizando como tratamiento tecnologías de oxidación avanzada como procesos de Fenton simple, foto Fenton y Fenton térmico activado utilizando metabisulfito de sodio. Los **resultados** con mayor remoción de carga orgánica se obtuvieron con el proceso Fenton térmico activado obteniéndose un DQO promedio de 876.00 mg/L y un DBO<sub>5</sub> de 387.00 mg/L cumpliendo con los VMA según el D.S. N° 021-2009. En **conclusión**, el proceso de tratamiento de remoción de carga orgánica más eficiente desde el punto de vista fisicoquímico es el proceso Fenton térmico activado, por lo que se propone su aplicación a efluentes que provienen de la producción de colorantes de alimentos a base de bixina y carmín.

(SANTANDER, y otros, 2017) , en su investigación “Remoción de coloración de tintes de teñido en aguas residuales de industria textil”, utilizando procesos de oxidación avanzada tiene como **objetivo** remover los contaminantes recalcitrantes y refractarios para lograr una mayor y mejor calidad del agua residual. La **metodología** es experimental, utilizando Procesos de oxidación avanzada Fenton de (TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), (TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV), (TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/O<sub>3</sub>), (TiO<sub>2</sub>/Fe<sup>3+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), (TiO<sub>2</sub>/Fe<sup>3+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV), (TiO<sub>2</sub>/Fe<sup>3+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/O<sub>3</sub>) con control de pH y temperatura. Los **resultados** obtenidos con el mejor rendimiento para la remoción de DQO fue aplicando procesos de oxidación avanzada con

(TiO<sub>2</sub>/Fe<sup>3+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV) fue de 75.68% a un pH 6.8 y a una temperatura de 12°C y una remoción de la decoloración de tinte Azul Blue (R-19) del 95.44% en soluciones estándar y del 89.06% de rendimiento la muestra de agua residual de la industria textil de tintes teñidos, ambos tratado por el proceso de oxidación avanzada (TiO<sub>2</sub>/Fe<sup>3+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/O<sub>3</sub>) a pH 7.8 y a una temperatura de 12°C. En **conclusión**, el proceso de oxidación avanzada en la que se obtienen la mayor degradación de materia orgánica genérica recalcitrante y la remoción por decoloración de tintes de teñido en agua residuales de la industria textil, se obtuvo con el proceso de oxidación del TiO<sub>2</sub>/Fe<sup>3+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/O<sub>3</sub> para experimentos en soluciones estándar en tinte azul blue (R-19) y para la muestra del agua residual de la industria textil.

(MEDINA, y otros, 2017), en su investigación “Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios”, tuvo como **objetivo** optimizar el proceso Fenton en el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario Aguas de las vírgenes ubicado en el departamento de Huancayo. La **metodología** fue de superficie de respuesta y se evaluó los parámetros de DBO<sub>5</sub>, DQO, alcalinidad, dureza, pH, conductividad, sólidos totales, turbidez, metales como plomo (Pb) y cadmio (Cd); además el proceso Fenton utilizó el diseño Box – Behnken. En los **resultados** obtuvo valores óptimos en dos temporadas: en época de lluvia con un pH = 3.19, Sulfato ferroso = 1645.55 mg/L y Peróxido de hidrógeno = 1096.55 mg/L y en época de estiaje con un pH = 3.26, Sulfato ferroso = 1788.61 mg/L y Peróxido de hidrógeno = 1180.83 mg/L, teniendo un indicador de biodegradabilidad de 0.568 y 0.329 para cada época respectivamente y con una eliminación cercana de 42% de DQO en ambas épocas. En **conclusión**, el proceso Fenton es un tratamiento eficaz para sustancias persistentes en lixiviados y recomienda su aplicación como un post – tratamiento.

(ROSALES, 2017), en su investigación “Reducción del contenido de colorantes en efluentes de la industria textil usando el proceso Fenton, Zarate, 2017”, tuvo como **objetivo** determinar el contenido de colorantes a partir del uso del proceso Fenton en efluentes de la industria textil. La **metodología** fue

experimental en el control continuo de pH, conductividad eléctrica, turbidez y DQO de la muestra correspondiente a efluentes textiles, así como la aplicación del proceso Fenton y análisis estadístico de datos. En los **resultados** obtenidos se logró la remoción de parámetros importantes como turbidez, color y DQO por encima 96 %, con una dosis óptima de 12.17 mL/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% y 0.2 g/L de Fe<sup>+2</sup> a un pH ácido de 2.6 en 24 horas de reposo del sistema a una temperatura ambiente con un tiempo de mezcla de 60 minutos y una velocidad de la mezcla de 300 rpm; además de una reducción en la turbidez de 118.3 NTU a 6.3 NTU y el DQO de 1390 mg/L a 470 mg/L. En **conclusión**, el proceso Fenton es un método adecuado para la remoción de altos contenidos de colorantes en los efluentes de industrias textiles.

(CALDERÓN, y otros, 2019), en su investigación “Proceso Foto-Fenton para la degradación de color del efluente de la industria textil”, tuvo como **objetivo** evaluar el proceso Foto-Fenton para la degradación de color del efluente de la industria textil, variando los parámetros de tiempo y agitación. La **metodología** es experimental con el fin de desarrollar pruebas en donde preparó un efluente textil sintético que sea representativo al efluente del proceso de tintura con colorante rojo moderdirect supra 4B y le aplicó el proceso Foto-Fenton. Los **resultados** obtenidos con mayores porcentajes de remoción de color se dieron hasta un 99.74%, además determinó la relación del peróxido de hidrógeno con el sulfato de hierro que redujo la concentración del colorante desde 100 ppm hasta 0.26 ppm, obteniendo un porcentaje de reducción máxima, así mismo concluyó que el nivel del pH tiene un efecto significativo en el potencial de oxidación del radical OH<sup>-</sup>. En **conclusión**, el proceso Foto-Fenton es muy efectivo en el tratamiento de agua residuales de tintura de colorantes reactivos.

(URIBE, y otros, 2020), en su proyecto de investigación “Reúso en proceso de blanqueo textil de los efluentes provenientes de tinturas con colorantes reactivos negros decolorados mediante el método Fenton”, tuvo como **objetivo** reusar efluentes textiles que provenían de usar tintes negros, que se decoloró utilizando el método de oxidación avanzada Fenton en procesos de blanqueo. La **metodología** es experimental debido al enfoque multidisciplinario que tuvo

dos etapas: la decoloración del efluente aplicando el método de oxidación avanzada Fenton y el reusó del efluente tratado. Los **resultados** obtenidos están en el rango 0.0156 g/mL y 0.0251 g/mL siendo relaciones óptimas del proceso Fenton en un tiempo de reacción de 90 min, con pH óptimos de tratamiento de 3.70 a 3.88 para los efluentes textiles provenientes de teñido con colorantes corafix black SD (Black SD) y corazol black B 133% (Black 5), respectivamente. En **conclusión**, el tratamiento Fenton es viable para este tipo de efluentes negros reactivos, pues obtuvieron sustratos blanqueados con propiedades similares al blanqueo con agua blanda y así poder reutilizarlo en el proceso.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Métodos de Oxidación Avanzada (AOX)**

Los Proceso de Oxidación Avanzada (POAs) se caracteriza por aprovechar la alta reactividad del radical hidroxilo ( $^{\circ}\text{OH}$ ) que actúa como agente oxidante para oxidar los contaminantes orgánicos disueltos en el agua hasta su mineralización; es decir los procesos de oxidación avanzada, son procesos en el cual se oxidan la materia orgánica con ayuda de los radicales hidroxilos hasta convertir toda la materia en dióxido de carbono y agua o al menos en compuestos menos peligrosos. (PINOS, 2020)

“La AOX son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de postratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores”. (Salas, 2010, p. 33)

Los procesos que están involucrados en este método poseen una mayor factibilidad termodinámica y una rápida velocidad de oxidación debido a la presencia de radical hidroxilo  $^{\circ}\text{OH}$ ; este radical posee propiedades adecuadas para atacar a todos los componentes orgánicos y tener una velocidad de reacción de  $10^6$ - $10^{12}$  veces más rápido que otros oxidantes como el  $\text{O}_3$ . (SALAS, 2010)

En la siguiente tabla podemos observar la velocidad de reacción de algunos agentes oxidantes:

**Tabla 1**

*Potencial de oxidación*

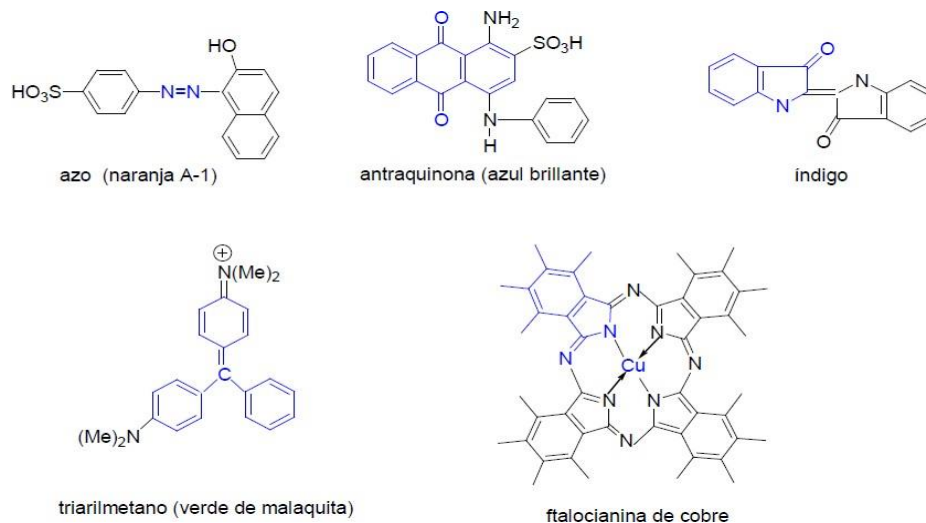
Agente oxidante	Potencial de oxidación (E°) (V)
Flúor (F)	3.06
Radical Hidroxilo (°OH)	2.80
Oxígeno atómico (O)	2.42
Ozono (O <sub>3</sub> )	2.08
Peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1.78
Cloro (Cl <sub>2</sub> )	1.36
Oxígeno Molecular (O <sub>2</sub> )	1.23

Nota: Información tomada y adaptada de Salas G., 2010.

Las moléculas presentes en los colorantes que se emplean en la industria textil son muy complejas, son de origen sintético, algunos son solubles en agua, muy resistentes al ataque de los agentes químicos y no se biodegradan fácilmente. Casi el 60% de los colorantes que se emplean en la industria textil son muy reactivos; ya que forman una unión éter con la fibra, garantizando que el color del tejido permanezca por mayor tiempo. En sus estructuras contienen grupo azo, antraquinona o ftalocianina. (SALAS, 2010)

**Figura 1**

*Estructuras de los colorantes textiles*



Nota: En la figura 1, se muestran las estructuras de los colorantes textiles más comunes que se emplean en la industria textil. Información tomada y adaptada de Cerrón D. & Unterlass M., 2018.

Debido a las características que tienen los colorantes de solubilidad y estabilidad, lo método que comúnmente se emplean que son floculación, sedimentación y flotación no son los adecuados en la remoción de estos colorantes que se encuentran dispersos en las aguas residuales, pero no de los colorantes reactivos; es por ello que una alternativa más óptima sería el método de oxidación avanzada. (SALAS, 2010)

Los colorantes reactivos a diferencia de los dispersos, contienen menos grupos para formar enlaces covalentes entre un átomo del colorante y uno de oxígeno, azufre o nitrógeno de la tela que se va a teñir. Por ellos, el colorante reactivo no fijado estará en solución o disuelto en el agua residual de la empresa textil como un compuesto orgánico refractario. Se puede decir que la separación de un tinte disperso se puede dar por coagulación – floculación y flotación, para el tinte reactivo se emplea la oxidación avanzada. (SALAS, 2010)

En la siguiente tabla, podemos ver los diferentes procesos de oxidación avanzada, las cuales se clasifican en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos, en función de la utilización o no de los radicales luminosos en el proceso:



**Tabla 2***Clasificación de procesos de oxidación avanzada*

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino ( $O_3/OH^-$ )	Oxidación en agua sub y supercrítica
Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $O_3/H_2O_2$ )	Fotólisis de agua en ultravioleta de vacío (UVV)
Procesos Fenton ( $Fe^{2+}/H_2O_2$ )	UV/ $H_2O_2$
Oxidación electroquímica	UV/ $O_3$
Radiólisis y tratamiento con electrones	Foto – Fenton y relacionados
Plasma no térmico	Fotocatálisis heterogénea
Descarga electrohidráulica y ultrasonidos	Fotocatálisis homogénea

Nota: UV: ultravioleta. Información tomada y adaptada de Terán M., 2016.

Entre las ventajas de las tecnologías de oxidación avanzada sobre los métodos convencionales, tenemos:

- No sólo se produce un cambio de fase en el producto contaminante, sino que también ocurre una transformación química, como sucede en el tratamiento con aire o con carbón activado. (BES, y otros, 2018)
- En la mayoría de casos se consigue la destrucción o mineralización de los contaminantes. En cambio en las tecnologías convencionales como no se emplean productos muy oxidantes, no permite que toda la materia orgánica se oxide completamente. (BES, y otros, 2018)
- Durante el tratamiento no se producen subproductos que requieran posteriormente eliminarlos; por ejemplo, no se forman fangos. (BES, y otros, 2018)
- Estos métodos son muy aplicables para contaminantes refractarios que se resisten a otros métodos como el biológico. (BES, y otros, 2018)
- Se emplean para tratar contaminantes de muy baja concentración en ppb. (BES, y otros, 2018)
- Estos métodos mejoran las propiedades organolépticas como el color, olor, sabor del agua residual tratada. (BES, y otros, 2018)
- Consumen menos energía que otros métodos. (BES, y otros, 2018)

- Transforman contaminantes refractarios en productos que puedan ser tratables por otros métodos más económicos. (BES, y otros, 2018)
- Disminuyen y/o eliminan los efectos en la salud de los desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro. (BES, y otros, 2018)

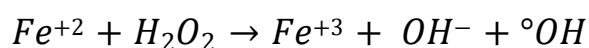
Entre los inconvenientes que presentan los métodos de oxidación avanzada, tenemos:

- Costo elevado en los procesos donde se emplea el ozono y la radiación ultravioleta. (BES, y otros, 2018)
- En algunos casos se pueden presentar la formación de subproductos indeseables. (BES, y otros, 2018)
- Algunos procesos requieren tiempos elevados para que se produzcan las reacciones. (BES, y otros, 2018)
- Costos elevados de inversión y operación. (BES, y otros, 2018)
- Para la ejecución de los procesos de oxidación avanzada se requiere mano de obra especializada. (BES, y otros, 2018)

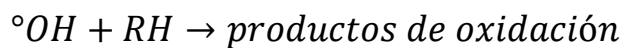
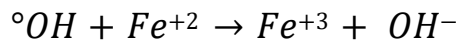
### 2.2.2. Reacción Fenton

El proceso Fenton, es un método que consiste en la adición de sales de hierro ( $Fe^{+2}$ ) como un catalizador en presencia de  $H_2O_2$  para la producción de radicales  $HO^\circ$ . Durante este proceso se forman los radicales  $HO^\circ$  debido a la interacción entre el  $Fe^{+2}$  y  $H_2O_2$  en medio ácido entre los rangos pH 2.5 – 4. (BES, y otros, 2018)

“El método se basa en la generación de radical hidroxilo ( $^\circ OH$ ) por la adición de  $H_2O_2$  a sales metálicas de hierro ( $Fe^{+2}$ ) en disolución, obteniendo mejores resultados a valores de pH=3.0.” (Salas, 2010, p. 34)



En la ecuación se puede observar la formación de radicales hidroxilos, debido a la descomposición del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por efectos del hierro, oxidándose de Fe<sup>+2</sup> a Fe<sup>+3</sup>. En el proceso Fenton, luego de que el Fe<sup>+2</sup> descompone el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, los radicales °OH continúan reaccionando con el Fe<sup>+2</sup> remanente en disolución hasta convertirse a Fe<sup>+3</sup>, además de oxidar toda materia orgánica presente (RH), ocurriendo la siguiente reacción: (SALAS, 2010)

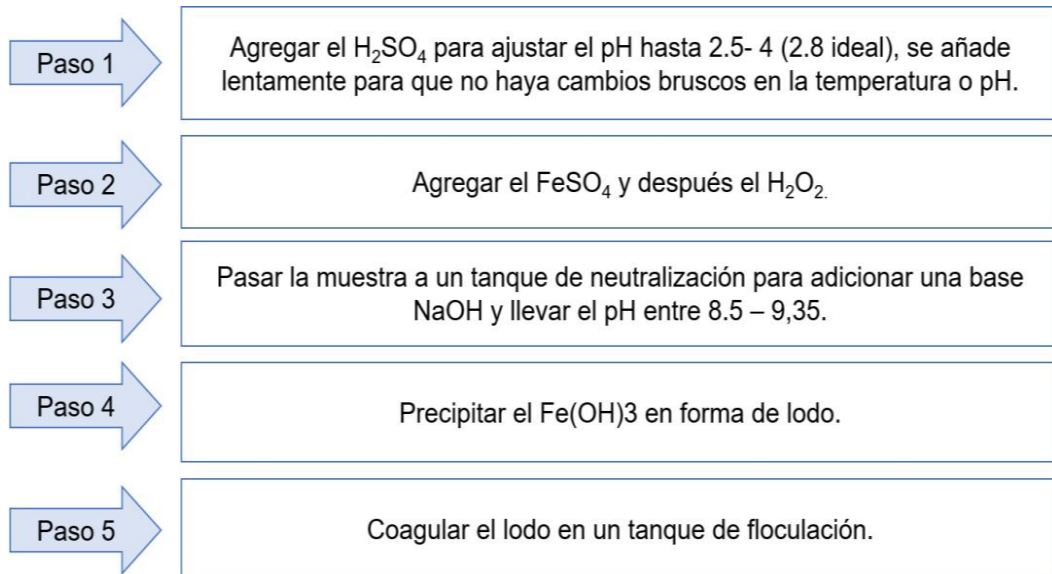


Para la ejecución del proceso Fenton de manera discontinua, se realiza en un tanque no presurizado en condiciones atmosféricas, donde se utiliza una serie de inyectores externos para poder adicionar el reactivo que regule el pH ya sea ácido o base, dosificar el FeSO<sub>4</sub> y el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en una concentración de 35-50% en disolución. (BES, y otros, 2018)

Luego de llenar el tanque con el agua residual, se adicionan los reactivos de acuerdo a la figura 2, en la cual se detallan los procedimientos a seguir para el proceso Fenton:

## Figura 2

### Procedimiento industrial del proceso Fenton

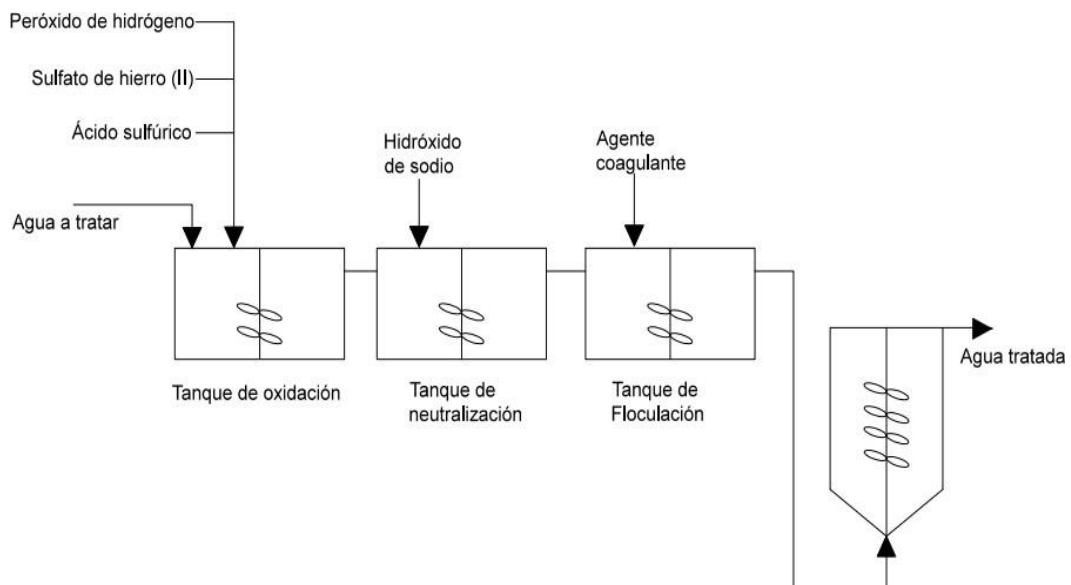


Nota: Información tomada y adaptada de Bes S., Silva A., Bengoa C., 2018.

En la siguiente figura se muestra a detalle el esquema de manera industrial del proceso Fenton:

## Figura 3

### Esquema industrial del proceso Fenton



Nota: Información tomada y adaptada de Bes S., Silva A., Bengoa C., 2018.

Dentro de las aplicaciones del proceso Fenton, este proceso ha resultado ser efectivo en el tratamiento de aguas residuales que contiene diversos compuestos orgánicos que son muy difíciles en su degradación por otros tratamientos como los biológicos convencionales. (BES, y otros, 2018)

A continuación, se muestra en la siguiente tabla ejemplos de aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales industriales:

**Tabla 3**

*Aplicación del proceso Fenton*

Industria	Tipo de agua residual
Textil	Proveniente del proceso textil, contiene colorantes y agentes de lixiviación.
Química	Proveniente de diferentes procesos en la elaboración de productos químicos, contienen compuestos fenólicos.
Petroquímica	Proveniente de la refinería del petróleo, contiene compuestos fenólicos.
Maderera	Proveniente de los tratamientos de madera, contienen fenoles, naftoles y cresoles.
Aeronáutica	Proveniente de las actividades de pintado, trazado de líneas y mantenimiento de aeronaves, contienen cloruro de metileno, pentaclorofenol y nitrofenoles.
Producción de detergentes	Proveniente del proceso de elaboración de los detergentes, contienen gran cantidad de suspendidos totales y surfactantes.
Producción de aceite de oliva	Proveniente del proceso de almazaras, contienen compuestos fenólicos y con pH elevado por el uso de NaOH en la limpieza de las maquinarias.

Nota: Información tomada y adaptada de Bes S., Silva A., Bengoa C., 2018.

### **2.2.3. Procesos Fenton con metabisulfito de sodio**

En el proceso Fenton activado se utiliza previo a la reacción de oxidación el reactivo  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ . La reducción con metabisulfito de sodio previa a la oxidación avanzada, genera  $\text{SO}_2$  como un agente reductor que ayuda a romper los enlaces de las cadenas orgánicas complejas. (AMES, y otros, 2015)

Al respecto en su investigación “El poder reductor de este reactivo puede ser sustituido por otros químicos que contienen  $\text{SO}_2$  como predecesor en su proceso de fabricación y que, sin embargo, puede sustituir al bióxido de azufre en las reacciones de destrucción de cianuros, eliminando los riesgos tanto físicos como ambientales que implica el uso directo del  $\text{SO}_2$ ” (Padilla, 2000, citado por Ames, et al., 2015, p. 73)

#### **2.2.4. Parámetros que influyen en el proceso Fenton**

- a) **pH.** Es uno de los parámetros más significativos en el proceso Fenton, estudios han demostrado que sólo es efectivo para un rango de pH que oscila entre 2.5 – 4; algunos autores fijan el valor a 2.8 siendo un pH óptimo para formar los radicales  $^{\circ}\text{OH}$  a partir de la descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en presencia de  $\text{Fe}^{+2}$ . (RUBIO, y otros, 2014)

Sin embargo, el pH más adecuado para la reacción de oxidación del ion férrico es entre 2 y 3, a un pH menor frena la reacción porque el ion férrico es más estable y se puede descomponer el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , si se trabaja a un pH superior puede precipitar el  $\text{Fe}(\text{OH})^3$  además de descomponer el  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Además, el ajuste de pH es preferible hacerlo con  $\text{NaOH}$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Al realizar el ajuste del pH se debe tener en cuenta que tanto el  $\text{FeSO}_4$  como el  $\text{H}_2\text{O}_2$  reducen el pH, el reactivo catalizador  $\text{FeSO}_4$  contiene  $\text{H}_2\text{SO}_4$  residual y la adición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  es responsable de la fragmentación de los compuestos orgánicos en los ácidos orgánicos. (TERÁN, 2016)

- b) **Temperatura.** El proceso Fenton se puede ocurrir a temperatura ambiente, pero un aumento de ésta favorece la cinética de las reacciones de oxidación. Sin embargo, el incremento de temperatura puede disminuir la estabilidad del  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; debido a que los altos valores de temperatura aumentan la velocidad de degradación del  $\text{H}_2\text{O}_2$  a  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . (RUBIO, y otros, 2014)

La reacción del proceso Fenton es exotérmica, por ello la velocidad de oxidación se incrementa a medida que lo hace la temperatura. Por lo tanto,

el incremento en la temperatura es favorable para la oxidación de sustancias refractarias. A una presión atmosférica, lo recomendable es trabajar entre los rangos 40–50°C, y si se llega a sobrepasar los 50°C ocurriría una reacción de descomposición muy rápida del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en agua y oxígeno. (TERÁN, 2016)

- c) **Tiempo de reacción.** Se ha demostrado que trabajar con altos tiempos de residencia no es viable por un tema económico; al contrario, con bajos periodos de reacción se obtienen buenos niveles de degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación. (RUBIO, y otros, 2014)
  
- d) **Influencia del tipo de contaminante.** A pesar de que el proceso Fenton es considerado como un proceso muy oxidante, este proceso puede no ser completamente efectivo para ciertas especies químicas contaminantes como los ácidos carboxílicos: ácido málico, acético, etc.; esta situación resulta interesante, porque frecuentemente dichas sustancias forman parte de los subproductos obtenidos durante el proceso de oxidación y estos a su vez, pueden ser considerados como nutrientes para los microorganismos presentes. Por lo tanto, los subproductos que se derivan del proceso Fenton se pueden biodegradar, mejorando así la biodegradabilidad de agua residual que se va a tratar. A la vez puede suceder que los subproductos formados pueden ser tóxicos para los microorganismos, por ello se debe tener especial cuidado cuando se emplea un proceso Fenton como pretratamiento ante un sistema biológico. (RUBIO, y otros, 2014)
  
- e) **Influencia de la presencia de aniones.** Algunos aniones ya sea orgánicos como inorgánicos permiten la formación de complejos de hierro, lo cual impide que este reactivo reaccione. La formación de estos compuestos depende muchas veces del pH, restringiendo el proceso Fenton. Este problema se puede superar usando radiación solar o UV dando paso a la

degradación de los tales complejos como por ejemplo los ferrioxalatos. (RUBIO, y otros, 2014)

También se ha observado que la presencia de carbonatos, bicarbonatos, fosfatos, cloruros y sulfatos en el agua residual, disminuyen la reactividad del proceso Fenton. Por ejemplo, la presencia de cloruro inhibe la reacción del radical  $^{\circ}\text{OH}$  porque éstos actúan como secuestradores del radical. (RUBIO, y otros, 2014)

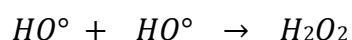
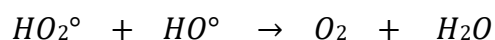
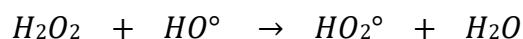
### 2.2.5. Dosis óptimas de reactivos

La cantidad de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y de sales de hierro a utilizar depende del tipo de contaminante que se pretenda remover. Cabe destacar que el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , requiere de grandes cantidades de  $\text{Fe}^{2+}$  para su descomposición en  $^{\circ}\text{OH}$ . (RUBIO, y otros, 2014)

La velocidad de la reacción de degradación de los compuestos orgánicos es mayor a medida que aumenta la concentración del oxidante y del catalizador, sin embargo, se ha investigado que grandes cantidades de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y de  $\text{Fe}^{2+}$  limitan el % de degradación del contaminante debido a que se presentan reacciones secundarias, para ello existen evidencias en las que reportan valores óptimos de agente oxidante y catalizador. Sin embargo, para establecer las concentraciones óptimas de estas variables es necesario conocer el tipo de contaminante presente en el agua residual de análisis, al igual que su concentración. Por tal motivo, es indispensable llevar a cabo una caracterización previa del agua residual a tratar. (RUBIO, y otros, 2014)

**a) Efecto de la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .** Si durante el proceso Fenton se da un exceso de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , esto conduce a una mayor generación de radicales hidroxilos  $\text{OH}^{\cdot}$  o una mayor regeneración de  $\text{Fe}^{+2}$ . Por lo tanto, una mayor concentración de peróxido y  $\text{OH}^{\cdot}$  incrementa la velocidad de reacción que conduce a la desaparición de los mismo, de acuerdo a la siguiente ecuación: (SALAS, 2010)





Además, la concentración residual de peróxido que se mantiene en el medio luego del tratamiento aporta toxicidad, lo que conlleva a ajustar la dosis de peróxido empleado en el proceso Fenton. (SALAS, 2010)

- b) Efecto de la concentración de  $Fe^{+2}$ .** Una concentración empleada de  $Fe^{+2}$  en el proceso Fenton, ayuda positivamente a la extensión de la reacción, debido a una mayor producción de radicales  $OH^\cdot$ . (SALAS, 2010)

Para el proceso Fenton activado, se va se utiliza previo a la reacción de oxidación el reactivo  $Na_2S_2O_5$ :

- c) Efecto de la concentración de  $Na_2S_2O_5$ .** Una cantidad empleada de  $Na_2S_2O_5$  anterior a la oxidación, permite la generación de  $SO_2$  como agente reductor y ayuda a romper los enlaces de las moléculas orgánicas complejas. (AMES, y otros, 2015)

## 2.3. Marco conceptual

### 2.3.1. Tratamiento de aguas residuales

Los tratamientos de las agua residuales, son los procedimientos y/o procesos a los que se deben someter las aguas residuales para poder garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno. (RODRÍGUEZ, y otros, 2020)

El tratamiento de las aguas residuales es un tema que se está poniendo en énfasis en muchos países, debido a que la disponibilidad del agua en los

siguientes años será cada vez más reducida. Debido a ellos se hace énfasis en el uso de los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa de solución eficiente para el tratamiento de las aguas residuales. (RODRÍGUEZ, y otros, 2020)

### **2.3.2. Aguas Residuales Textiles**

Los efluentes de la industria textil contienen una gran variedad de contaminantes provenientes de los diferentes procesos involucrados durante la producción de fibras, hilos, etc. Algunos contaminantes que causan toxicidad acuática del agua son la presencia excesiva de sales como NaCl y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> provenientes del teñido, también hay presencia de agentes surfactantes como fenoles, metales pesados y aniones tóxicos como el sulfuro que están presentes en los diferentes colorantes que se emplea, compuestos orgánicos como por ejemplo solventes clorados que provienen de la etapa del lavado y limpieza de la maquinaria. (BES, y otros, 2018)

Las aguas residuales de las industrias textiles se caracterizan por presentar variaciones extremas en parámetros, entre ellas tenemos: la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), pH, color y salinidad. Los parámetros más característicos de estos efluentes son: Color visible (1100-4500 unidades), DQO (800–1600 mg/L), pH alcalino (9-11), sólidos totales (6000–7000 mg/L). (CORTAZAR, y otros, 2016)

Es por ello que, para los contaminantes orgánicos persistentes, los procedimientos como los tratamientos biológicos usados resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por la ley o por uso ulterior del efluente tratado. Para estos casos y cada vez más creciente, las industrias en los países industrializados están recurriendo al uso de las llamadas tecnologías o procesos de oxidación avanzada, que son muy poco aplicados y menos difundidos en países emergentes como América latina. (SALAS, 2010)

Las aguas residuales generadas durante el proceso de tintura y acabados textiles tienen las siguientes características: gran variabilidad de caudal y carga

contaminante, los contaminantes son solubles y moderadamente biodegradables, su carga orgánica media (DQO) es aproximadamente el doble que la de un efluente urbano, toxicidad baja comparada con otros sectores industriales, exenta a microorganismo patógeno, tiene elevada coloración y salinidad, tiene rango de pH entre 6 a 13. (LÓPEZ, y otros, 2015)

En la siguiente tabla se detalla los contaminantes de las aguas residuales del sector textil:

**Tabla 4**

*Carga contaminante de los efluentes procedentes del sector textil*

Parámetro	Unidad	Floca	Hilo	Tejido algodón	Tejido lana	Genero punto	Estampado	Lavado lana
pH	-	7-12	7-11	8-13	5.5-8	5.5-9	7-10	8-11
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	3000-7000	500 - 1000	1500 – 3000	300-1500	800 – 1800	2000 – 4000	20000 – 60000
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	1000 – 2200	200-350	400 – 1000	100 – 600	250 – 500	500 – 1500	6000 – 20000
Materias en suspensión	mg/L	100 – 300	50 – 150	100 – 300	100 – 200	100 – 200	200 – 600	6000 – 20000
Volumen/peso	L/Kg	10 -20	40 – 80	100 – 200	70 – 300	80 – 150	-	5-20
Color	Pt-Co/L	400 - 4000	400 - 1000	400 - 3000	200 - 1500	200 - 2000	1000 - 6000	100 - 200

Nota: Floca, es un tipo de relleno que se emplea para acolchar y está compuesta por fibra de poliéster. Información tomada y adaptada de López V. y Crespi R., 2015.

### **2.3.3. Parámetros fisicoquímicos de los contaminantes orgánicos persistentes**

Los contaminantes orgánicos persistentes son sustancias químicas que son una amenaza para el ambiente y son resistentes a la degradación, son bioacumulables porque se incorporan en los tejidos de los seres vivos aumentando su concentración a niveles más altos de la cadena trófica. Además, tienen la propiedad de poder transportarse a largas distancias, pudiendo llegar a lugares en los que nunca se han producido o utilizado. (BES, y otros, 2018)

Los parámetros fisicoquímicos que permite identificar la cantidad de contaminantes orgánicos persistentes en un efluente son los siguientes:

- a) **Demanda química de oxígeno (DQO/COD).** Mide la cantidad necesaria de oxígeno para poder oxidar la materia orgánica y algunos compuestos minerales que son susceptibles a la oxidación por medios químicos, esta materia se convierte en CO<sub>2</sub> y agua. La DQO se mide en mg/L. (AMES, y otros, 2015)

Se emplean oxidantes químicos con el K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, durante el ensayo se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para poder determinar el equivalente de oxígeno de la materia orgánica que se puede oxidar. (TERÁN, 2016)

- b) **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>/BOD).** Mide la cantidad de oxígeno en mg/L consumido en la oxidación de la materia orgánica presente en el agua, en procesos biológicos aeróbicos, generalmente el análisis dura 5 días a 20°C. (LÓPEZ, y otros, 2015)

“El valor de la DQO siempre será superior al de la DBO<sub>5</sub> debido que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente”. (Ames, et al., 2015, p. 72)

La DBO<sub>5</sub>, es un parámetro indispensable para determinar el estado o la calidad del agua de los ríos, lagos, lagunas o efluentes. A mayor cantidad de materia orgánica presente en la muestra, los microorganismos van a necesitar más oxígeno para oxidar. Por tanto, el valor de la DBO<sub>5</sub> es elevado. (TERÁN, 2016)

#### 2.4. Definición de términos básicos

- a) **Sólidos suspendidos totales (SST/TSS).** Parámetro utilizado en la evaluación de la calidad del agua y en su tratamiento. Indica la cantidad de sólidos no disueltos, es decir en suspensión (sedimentables o coloides) presentes en la muestra y que puede ser separados por coagulación –

floculación y medios mecánicos como la sedimentación, filtración al vacío o centrifugación. Además, está asociado con la turbidez del agua. (AMES, y otros, 2015)

Las aguas residuales contienen SST, los cuales se pueden ver a simple vista porque flotan entre la superficie y el fondo. A través de las técnicas de filtración o sedimentación estos SST pueden ser removidos en su gran totalidad. (NIETO, y otros, 2019)

- b) Turbidez.** Es una medida cuantitativa relacionada con los sólidos suspendidos, se suele medir en la salida de las plantas de tratamiento de agua para indicar la calidad de los procesos. La medición se expresa en NTU (unidades nefelométricas de turbidez) en la estimación de la calidad del agua residual. (AMES, y otros, 2015)

La turbidez, viene a ser el grado de medición de transparencia que pierde el agua debido a la presencia de partículas que se encuentran suspendidas. Es un parámetro que indica la calidad del agua, además de ser un indicativo de la presencia de contaminantes microbiológicos y compuestos tóxicos. Mientras hay mayor cantidad de partículas suspendidas en el agua, mayor será la turbidez, lo que indica el aumento en la presencia de microorganismo como bacteria, virus, protozoos patógenos, etc. (NIETO, y otros, 2019)

- c) Coloides.** Son sólidos de tamaño fino los cuales no se sedimentan por la acción de la gravedad, han sido definidos como partículas cuyo diámetro varía entre 1 a 100 nm. Pueden removerse del agua mediante procesos de coagulación, filtración o acción biológica. (DÍAZ, y otros, 2018)

- d) Coagulación y floculación.** Los procesos de coagulación y floculación se emplean para extraer del agua los sólidos que se encuentran suspendidos siempre que su rapidez natural del asentamiento sea demasiado baja para proporcionar una muestra clarificada. Estos procesos son efectivos para eliminar la materia orgánica suspendida y coloidal. (LÓPEZ, y otros, 2015)

- e) **Valores máximos admisibles (VMA).** Son valores de concentración de elementos, sustancias compuestas, parámetros químicos y físicos que se encuentran contenidos en un efluente procedente de una industria; las cuales van a ser descargadas a la red de alcantarillado y si en caso éstas exceden en el contenido de las sustancias mencionadas causan daño inmediato o de manera progresiva a la parte sanitaria. (Ministerio de Vivienda, 2019)
- f) **Las EPS.** (Empresas prestadoras de servicio de saneamiento), son encargadas de hacer cumplir a las empresas industriales los VMA a nivel nacional para Lima y Callao. (Ministerio de Vivienda, 2019)

En la siguiente tabla se detallan los parámetros de VMA del D.S. N° 010-2019 VIVIENDA que se va a evaluar en el proyecto de investigación:

**Tabla 5**

*Parámetros VMA a evaluar*

Parámetro	Unidad	*VMA para descarga al sistema de alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	500
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L	1000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	500
Temperatura (T)	°C	<35
pH		6-9

Nota: Se muestran todos los parámetros con sus Valores Máximos Admisibles que se van a evaluar al efluente textil antes y después de aplicar el proceso Fenton.

\*Información tomada y adaptada del D.S. N° 010- 2019 VIVIENDA.

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis general

**H<sub>1</sub>:** La optimización del proceso Fenton si influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales en la industria textil.

**H<sub>0</sub>:** La optimización del proceso Fenton no influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales en la industria textil.

#### 3.2. Hipótesis específicas

**H<sub>1</sub>:** El pH del proceso Fenton si influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>01</sub>:** El pH del proceso Fenton no influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>2</sub>:** La masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton si influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>02</sub>:** La masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton no influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>3</sub>:** La masa de sulfato ferroso del proceso Fenton si influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>03</sub>:** La masa de sulfato ferroso del proceso Fenton no influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>4</sub>:** El volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton si influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>04</sub>:** El volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton no influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

### **3.3. Operacionalización de las variables**

#### **3.3.1. Variable dependiente**

Y= Tratamiento de aguas residuales

#### **3.3.2. Variable independiente**

X= Proceso Fenton



**Tabla 6**

*Matriz de operacionalización de las variables*

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIAL TEXTIL A NIVEL PILOTO								
VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES (Objetivas)	INDICADORES	VALOR FINAL	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTOS
Proceso Fenton	El proceso Fenton, es un método que consiste en la adición de sales de hierro (Fe <sup>+2</sup> ) como un catalizador en presencia de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> para la producción de radicales HO°. Durante este proceso se forman los radicales HO° debido a la interacción entre el Fe <sup>+2</sup> y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en medio ácido entre los rangos pH 2.5 - 4. (Rodríguez y Barrera, 2020).	El proceso Fenton (VI) se evalúa tomando en cuenta la dimensión sus condiciones (D); de acuerdo con sus indicadores: pH, masa de sulfato ferroso, volumen peróxido de hidrógeno y masa de metabisulfito de sodio (I), a través de un pH metro, balanza analítica, micropipeta y balanza analítica (I).	D.1. Condición del proceso	pH	2.5, 3.0	Método inductivo.	Observación	pH metro
				Masa metabisulfito de sodio	1.0, 1.5 g		Observación	Balanza analítica
				Masa sulfato ferroso	1.0, 1.5 g		Observación	Balanza analítica
				Volumen peróxido de hidrógeno	1.0, 2.0 mL		Observación	Micropipeta
VARIABLES DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES (Objetivas)	INDICADORES	VALOR FINAL	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTOS
Tratamiento de aguas residuales	Los tratamientos, son los procedimientos y/o procesos a los que se deben someter las aguas residuales para garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno. (Rodríguez y Barrera, 2020).	El tratamiento de agua residual (VD) se evalúa tomando en cuenta el parámetro fisicoquímico (D); de acuerdo con sus indicadores: demanda química de oxígeno (I), a través de un equipo digestor, turbidímetro y micropipeta (I).	D.1. Parámetro fisicoquímico	Demanda química de oxígeno (DQO)	< 1000 mg/L	Método inductivo.	Observación	Micropipeta Equipo digestor de DQO Colorímetro

## IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

### 4.1. Diseño metodológico

La presente investigación es de tipo aplicada, porque los conocimientos desarrollados van ayudar a resolver un problema social, de una comunidad, región o país, así como los problemas de contaminación ambiental, entre otros. (ÑAUPAS, y otros, 2018)

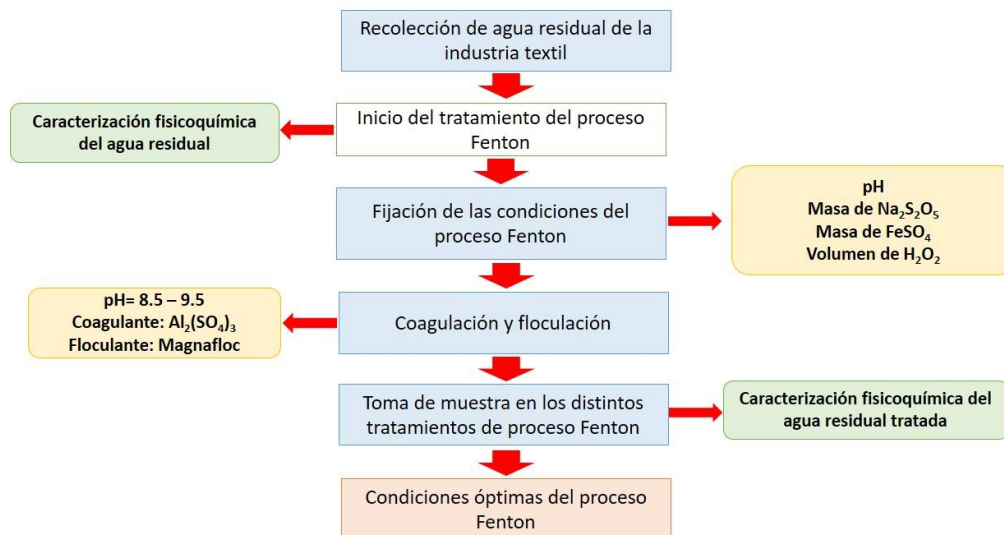
Por su enfoque es cuantitativo, porque se toma en cuenta los principios teóricos y emplea métodos cuantitativos para la recolección de datos. Por su nivel es explicativo, debido a que se tiene una relación causal, recogiendo la información sobre las variables en estudios para describir las características y rasgos importantes de las mismas y encontrar las causas del mismo. (HERNÁNDEZ, y otros, 2014)

Según la intervención del investigador, el método de investigación del proyecto es de tipo experimental, el método experimental es una técnica de investigación que consiste en recabar datos y verificar las hipótesis planteadas. Además, es refinada porque utiliza sofisticadas técnicas como el control de las variables y la medición de las diferencias estadísticas de los resultados. (ÑAUPAS, y otros, 2018)

De acuerdo a la planificación de las mediciones del investigador, la investigación es de tipo prospectivo con mediciones planeadas. (ÑAUPAS, y otros, 2018) Debido a ello se planteó el siguiente diseño experimental del proyecto de investigación, donde se detallan las mediciones que se realizó:

**Figura 4**

*Diseño experimental del proyecto de investigación*



Nota: Se especifican los procedimientos ejecutados durante el desarrollo del proyecto, desde la recolección del agua residual de la industria textil hasta definir el tratamiento óptimo que nos permita cumplir con los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

#### 4.2. Método de investigación

El método del proyecto es inductivo-deductivo porque es de carácter experimental, va a partir del conocimiento hacia la observación de fenómenos particulares con el fin de llegar a conclusiones que nos permitan la verificación de una verdad establecida. El método deductivo, es el análisis de lo general como leyes, axiomas, postulados, teoremas a casos particulares; el método inductivo, es el análisis de los hechos particulares para buscar proposiciones generales. (ÑAUPAS, y otros, 2018)

El método de investigación del proyecto es de tipo experimental, que consiste en recabar datos y verificar las hipótesis planteadas. Además, es refinada porque utiliza sofisticadas técnicas como el control de las variables y la medición de las diferencias estadísticas de los resultados. (ÑAUPAS, y otros, 2018)

El diseño de la investigación se desarrollará en diferentes etapas, las cuales se detalla a continuación:

**a. Etapa 1:** Recolección de la muestra

- I. Se realizó la recolección de la muestra en la planta de operaciones de la industria textil, al finalizar el proceso.
- II. Se realizó el acondicionamiento de las aguas residuales de la industria textil para realizar los análisis en laboratorio.

**b. Etapa 2:** Procedimiento experimental en el laboratorio

- I. Se realizó la caracterización fisicoquímica en laboratorio de las aguas residuales de la industria textil: pH, turbidez, ORP, conductividad, DQO, DBO<sub>5</sub> y SST.
- II. Se realizó el proceso Fenton a las aguas residuales de procedencia textil, para fijar las condiciones del proceso: pH, masa de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, masa de FeSO<sub>4</sub> y volumen de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- III. Se realizó la caracterización fisicoquímica de las aguas procedentes luego de aplicar el tratamiento del proceso Fenton para determinar las condiciones óptimas del proceso.

**c. Etapa 3:** Procesamiento de los resultados obtenidos.

**d. Etapa 4:** Selección del tratamiento adecuado.

Debido al diseño de la investigación propuesta, según el número de mediciones de la variable de estudio es de tipo longitudinal, ya que se llegó a realizar más de una medición, al inicio, durante y al finalizar el proceso Fenton.

### **4.3. Población y muestra**

#### **4.3.1. Población**

La población viene a ser el total de las unidades de estudio las cuales contienen las características requeridas, para ser consideradas como tales.

Estas unidades pueden ser personas, objetos, hechos o fenómenos, conglomerados que tienen las características requeridas para la investigación. (ÑAUPAS, y otros, 2018)

De acuerdo a la definición, la población es una proporción de las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de la industria textil.

#### **4.3.2. Muestra**

La muestra es una parte de la población que tiene las características necesarias para la investigación. Además, la muestra es una fracción representativa de una población o universo que ha sido obtenido con la finalidad de investigar ciertas características del mismo. (ÑAUPAS, y otros, 2018)

La muestra son las proporciones de las aguas residuales del proceso de teñido de la industria textil, tomando un 1 L. por prueba experimental, se utilizó un diseño factorial completo  $2^k$  que permita identificar el valor óptimo del parámetro a analizar. Donde 2 indica el nivel y  $K = 4$  indica los factores (indicadores). (PEREZ, y otros, 2017)

De acuerdo a ello, se utilizó un diseño factorial de  $2^4$ , que equivale a realizar 16 pruebas experimentales analizando las cuatro condiciones de proceso: pH (2.5, 3.0), masa del sulfato ferroso (1.0, 1.5 g), volumen de peróxido de hidrógeno (1.0, 2.0 mL) y masa de metabisulfito de sodio (1.0, 1.5 g). Además, se realizó una réplica para cada prueba experimental, en total se realizará 32 pruebas experimentales.

#### **4.3.3. Muestreo**

El muestreo no probabilístico, se da de acuerdo a los intereses del investigador, se puede dar por conveniencia, elección razonada y por cuotas. (ÑAUPAS, y otros, 2018)

El muestreo es no probabilístico intencional, para ello se tomó 40 L de las aguas residuales del proceso de teñido de la industria textil y se realizó la toma de muestra en un día sábado por la tarde.

#### 4.4. Lugar del estudio

La industria textil en la cual sus efluentes son objeto de estudio para aplicar el proceso Fenton como tratamiento, está ubicado en el departamento de Lima, distrito San Juan de Miraflores. Los estudios experimentales se ejecutaron en los laboratorios de química del Instituto Tecsup N° 1, ubicado en el distrito de Santa Anita en la provincia de Lima.

#### 4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

##### 4.5.1. Técnicas

###### a. Recolección de las muestras de agua residual

La muestra de agua residual se tomó en una sola fecha, a la salida de la tubería que conduce al almacenamiento de los efluentes de dicha industria. En un solo día se llegó a muestrear 40 L de agua residual que se almacenó en un frasco oscuro preservándolo a un pH<2 haciendo uso de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a una temperatura<4°C para realizar mediciones de DQO por 28 horas como máximo, para medir DBO<sub>5</sub> la muestra sólo permaneció a una temperatura<4°C por 24 horas como máximo. (DIGESA, 2007)

###### b. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales

La caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de la industria textil se realizó antes y después del tratamiento con el proceso Fenton y fueron los siguientes:

**Tabla 7**

*Métodos para la caracterización fisicoquímica del agua residual de la industria textil*

Análisis fisicoquímico	Método
Determinación de la demanda química de oxígeno	Método normalizado de oxidación al dicromato (reflujo cerrado colorímetro) (APHA, 1995)

Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno	Método de Winkler (APHA, 1992)
Determinación de sólidos suspendidos totales	Sólidos suspendidos totales en aguas secado a 103-105°C NMX-AA-034-SCFI-2015
Determinación de la turbidez	Turbidez por nefelometría (APHA, 1998)

Nota: En la tabla 7, se detalla los análisis fisicoquímicos que se realizó como parte de la caracterización del efluente textil, además se indica el método normalizado según en APHA.

Además de los parámetros mencionados en la tabla N° 7, se midió los parámetros de: pH, turbidez, ORP y conductividad antes y después de aplicar el proceso Fenton como tratamiento a las aguas residuales de la industria textil.

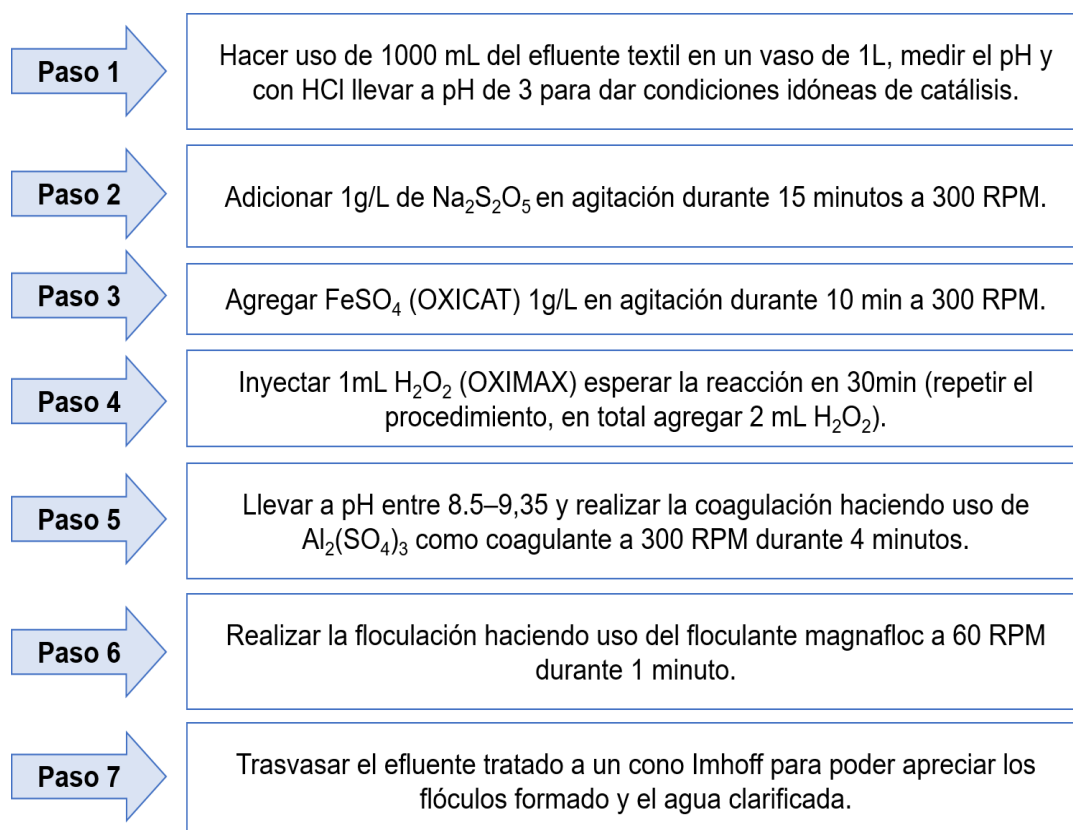
### **c. Tratamiento del proceso Fenton en las aguas residuales**

Una vez realizada la caracterización inicial del agua residual proveniente de la industria textil, se procedió a ejecutar los procedimientos del proceso Fenton para determinar las condiciones del proceso.

En las siguientes figuras se indican los procedimientos para cada proceso:

**Figura 5**

*Procedimiento de tratamiento proceso Fenton*



Nota: OXIMAX, OXICAT son las marcas de los reactivos químicos.

#### 4.5.2. Instrumentos

Para la recolección de datos que se obtuvieron durante las pruebas experimentales se utilizó un registro de datos en una lista de cotejo. Entre los instrumentos tenemos a los materiales, equipos y reactivos químicos utilizados para los análisis fisicoquímicos y tratamiento del proceso Fenton de las aguas residuales de industria textil, se tiene:

- a) Materiales para las pruebas experimentales en laboratorio, lo cual se detalla en la siguiente tabla:



**Tabla 8***Materiales usados en las pruebas experimentales*

Instrumentos	
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Vaso de precipitado de 1000 mL, 500 mL y 250 mL</li> <li>● Probeta de 100 mL</li> <li>● Fiola de 100 mL</li> <li>● Pipeta graduada de 10 mL y 5 mL</li> <li>● Propipeta</li> <li>● Micropipeta automática de rango 01- 5 mL</li> <li>● Pastilla magnética</li> <li>● Cono Imhoff</li> <li>● Soporte universal</li> <li>● Aro con nuez</li> <li>● Papel de filtro para análisis gravimétrico 934AH Whatman</li> <li>● Desecador con sílica gel</li> <li>● Cápsula de porcelana</li> <li>● Gradilla para tubos</li> </ul>

b) Equipos para las pruebas experimentales en laboratorio, lo cual se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 9***Equipos usados en las pruebas experimentales*

Instrumentos	
Equipos	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Equipo reactor de DBO<sub>5</sub> marca Sheldon Manufacturing</li> <li>● Equipo digestor de DQO marca Hach</li> <li>● Colorímetro marca Hach</li> <li>● Turbidímetro 2100Q Hach</li> <li>● Test de jarras marca Didacta Italia</li> <li>● Equipo de filtración al vacío: embudo Buchner, matraz kitasato y bomba de vacío.</li> <li>● Estufa marca Memmert UN-60</li> <li>● Balanza analítica de 0.0001 g</li> <li>● Medidor digital de pH y ORP</li> <li>● Medido digital de conductividad</li> <li>● Plancha de agitación marca Stuart</li> </ul>

c) Reactivos químicos e insumos para las pruebas experimentales en laboratorio, lo cual se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 10**

*Reactivos usados en las pruebas experimentales*

Instrumentos	
Reactivos	<ul style="list-style-type: none"><li>● Solución de HCl al 10% v/v</li><li>● Solución de NaOH al 10% w/v</li><li>● Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub></li><li>● FeSO<sub>4</sub></li><li>● H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50 %</li><li>● Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub></li><li>● Magnafloc</li><li>● H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado</li><li>● Vial para DQO 200-15000 mg/L marca Hach</li><li>● KOH</li><li>● Nutriente para análisis de DBO<sub>5</sub> marca Hach</li></ul>

d) Lista de cotejo para la recolección de datos obtenidas durante las pruebas experimentales, lo cual se detalla en las siguientes tablas:

**Tabla 11***Lista de cotejo de datos – antes, durante y después*

Antes del tratamiento	Unidades	Valor Promedio
pH	Und. pH	
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	
Turbidez	NTU	
DQO	mg/L	
DBO <sub>5</sub>	mg/L	
SST	mg/L	
<b>Durante el tratamiento</b>		
Volumen de muestra	mL	
Volumen de HCl al 10%	v/v	
pH después de agregar HCl al 10%	v/v	
Cantidad de Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	g	
Tiempo de reacción	min	
Cantidad de FeSO <sub>4</sub> agregado	g	
Tiempo de reacción	min	
pH después de la reacción	Und. pH	
Volumen de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% agregado 1ra dosis	mL	
Tiempo de reacción	min	
Volumen de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% agregado 2da dosis	mL	
Tiempo de reacción	min	
pH después de la reacción	Und. pH	
<b>Proceso de coagulación y floculación</b>		
Volumen de NaOH al 10% w/v	mL	
pH después de la adición	Und. pH	
Volumen de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> al 10% w/v	mL	
Volumen de Magnafloc al 0.1% w/v	mL	
<b>Después del tratamiento</b>		
Tiempo de sedimentación	min	
SST	mg/L	
pH	Und. pH	
ORP	mV	
Turbidez	NTU	
DQO	mg/L	
DBO <sub>5</sub>	mg/L	
Volumen de agua clarificada	mL	

- e) Tabla experimental del diseño factorial  $2^4 = 16$  pruebas experimentales que se va realizar aplicando el proceso Fenton

**Tabla 12***Diseño factorial  $2^4 = 16$  pruebas experimentales con una réplica*

Nº	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g)	FeSO <sub>4</sub> (g)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> mL	DQO inicial	DQO final	% Remoción
1	2.5	1.0	1.0	1.0			
2	2.5	1.0	1.5	1.0			
3	2.5	1.0	1.0	2.0			
4	2.5	1.0	1.5	2.0			
5	2.5	1.5	1.0	1.0			
6	2.5	1.5	1.5	1.0			
7	2.5	1.5	1.0	2.0			
8	2.5	1.5	1.5	2.0			
9	3.0	1.0	1.0	1.0			
10	3.0	1.0	1.5	1.0			
11	3.0	1.0	1.0	2.0			
12	3.0	1.0	1.5	2.0			
13	3.0	1.5	1.0	1.0			
14	3.0	1.5	1.5	1.0			
15	3.0	1.5	1.0	2.0			
16	3.0	1.5	1.5	2.0			
17	2.5	1.0	1.0	1.0			
18	2.5	1.0	1.5	1.0			
19	2.5	1.0	1.0	2.0			
20	2.5	1.0	1.5	2.0			
21	2.5	1.5	1.0	1.0			
22	2.5	1.5	1.5	1.0			
23	2.5	1.5	1.0	2.0			
24	2.5	1.5	1.5	2.0			
25	3.0	1.0	1.0	1.0			
26	3.0	1.0	1.5	1.0			
27	3.0	1.0	1.0	2.0			
28	3.0	1.0	1.5	2.0			
29	3.0	1.5	1.0	1.0			
30	3.0	1.5	1.5	1.0			
31	3.0	1.5	1.0	2.0			
32	3.0	1.5	1.5	2.0			

Nota: En la tabla 12, se especifica las combinaciones de los 4 factores con sus respectivos niveles, además se toma en cuenta la réplica para cada uno. En total se va realizar 32 experimentos.

#### **4.6. Análisis y procesamiento de datos**

Después de realizar el diseño experimental y los análisis correspondientes al agua residual de la industria textil, los datos obtenidos han sido procesados para generar gráficos y cuadros comparativos, los cuales nos permitió identificar si los parámetros en los cuales se ha trabajado influyen significativamente en los procesos Fenton que se ha aplicado como tratamiento en las aguas residuales, disminuyendo la presencia de contaminantes orgánicos persistentes de tal manera que se maximice el porcentaje de remoción de los mismos y así poder cumplir con los VMA establecidos en la D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

Además, nos permitió identificar los parámetros óptimos que deben de aplicarse para obtener una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes orgánicos persistentes en las aguas residuales de la industria textil.

##### **4.6.1. Pruebas de ensayos y mediciones en laboratorio**

La toma de muestra del efluente textil se realizó de acuerdo a lo establecido en los protocolos de toma de muestra y también para la preservación de las muestras, descrito en el protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales. Resolución directoral del Ministerio de salud, N° 2254 emitido por DIGESA. (DIGESA, 2007) (PEREA, 2012) (CALDERÓN, y otros, 2019) (BUSTAMANTE, 2016) (CERRÓN, y otros, 2018) (CORREA, 2016)

Los parámetros de temperatura, pH, conductividad, ORP y turbidez, SST, DQO y DBO<sub>5</sub> fueron medidos en el laboratorio de la institución Tecsup N°1, para ello se utilizó equipos como turbidímetro 2100Q-Hach, equipo reactor de DBO<sub>5</sub> marca Sheldon manufacturing, equipo digestor de DQO marca Hach y colorímetro marca Hach.

Los procedimientos que conllevan la aplicación del proceso Fenton a las aguas residuales de la industria textil, también se realizó en los laboratorios de la Institución Tecsup N° 1, sede Lima.

#### **4.6.2. Procesamiento de recolección de datos**

##### **a. Caracterización inicial del efluente**

La muestra colectada de aguas residuales del proceso de teñido de la industria textil, se almacenó de acuerdo los estándares establecidos en los protocolos de toma de muestra y también para la preservación de las muestras, descrito en el protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales en la Resolución Directoral del Ministerio de Salud N° 2254 emitido por DIGESA.

Las muestras se fueron trasladadas al laboratorio para realizar las siguientes pruebas de caracterización inicial: pH, temperatura, ORP conductividad, turbidez, SST, DQO y DBO<sub>5</sub>, determinando que los parámetros medidos sobrepasan los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

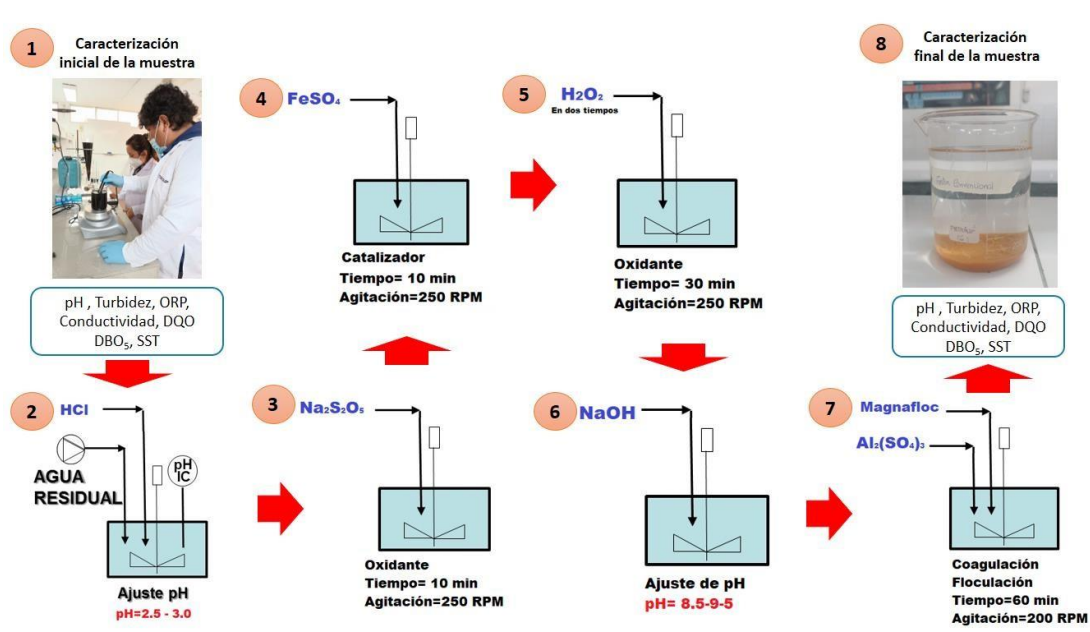
##### **b. Determinación de pH de trabajo y la dosis óptima de reactivos en proceso Fenton**

Durante las pruebas experimentales aplicando el proceso Fenton a las aguas residuales de la industria textil, se trabajó en los diferentes rangos de pH (2.5 y 3.0), adicionando las diferentes dosis de los reactivos químicos: masa del Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1.0 y 1.5 g), masa de FeSO<sub>4</sub> (1.0 y 1.5 g) y volumen de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1.0 y 2.0 mL), de acuerdo a las interacciones establecidas en la tabla 12. Con el propósito de determinar cuál de las interacciones es la más óptima brindando un mayor % de remoción de carga orgánica, es decir un menor valor de DQO (mg/L).

Para determinar el pH y las dosis óptimas de los reactivos utilizados durante el proceso Fenton, se desarrolló el siguiente procedimiento mostrado en la siguiente figura:

**Figura 6**

*Procedimiento de tratamiento proceso Fenton*



Como se observa en la figura 6, los reactivos serán adicionados durante las pruebas según el orden indicado. Además, durante la aplicación del proceso Fenton a las muestras de aguas residuales de la industria textil. Antes de iniciar cada proceso se tendrá que reajustar el pH a un medio ácido, utilizando HCl al 10%. Después de las reacciones antes de la coagulación y floculación se tendrá que ajustar nuevamente el pH a medio básico aproximadamente 9, utilizando NaOH al 10 %.

**c. Caracterización del efluente tratado**

Después de haber aplicado el proceso Fenton a la muestra de aguas residuales de la industria textil, se procedió con la coagulación y floculación. Teniendo ya una muestra clarificada se midió nuevamente los parámetros de: pH, ORP, turbidez, SST, DQO y DBO<sub>5</sub>; para poder contrastarlos con los parámetros de caracterización medidos al inicio y poder determinar el % de remoción de carga orgánica DQO (mg/L).

**d. Determinación de la eficiencia de remoción de la carga orgánica del efluente**

Para determinar la eficiencia de remoción de la carga orgánica del efluente textil, se realizó mediante la comparación de los parámetros medidos antes y después del tratamiento de proceso Fenton. Luego se verificó si los parámetros medidos al finalizar el proceso, están dentro de los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

**e. Optimización de la eficiencia entre el proceso Fenton**

Luego de corroborar que los resultados de la caracterización final se encuentren dentro de los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA, se determinó las condiciones óptimas del proceso Fenton: pH, masa de  $\text{FeSO}_4$ , volumen de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y masa de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ .

**f. Procesamiento estadístico y análisis de datos**

El procesamiento estadístico de los datos se realizó mediante el uso de los programas Excel, SPSS y Minitab, para diseñar gráficos, cuadros comparativos y determinar la eficiencia de cada proceso. Para el análisis de los datos obtenidos en la parte experimental se tuvo como referencia los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

**4.7. Aspectos éticos en investigación**

La presente tesis titulada "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A NIVEL PILOTO" los tesisistas señalan que su responsabilidad, autenticidad y confiabilidad con respecto a la autoría de otros estudios, con el código de ética de investigación aprobado por consejo universitario N° 260-2019-CU, así como con la directiva N° 004-2022-R, ambas establecidas por la Universidad Nacional del Callao.



## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados descriptivos

En las siguientes tabla y figuras se muestran los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas.

#### 5.1.1. Caracterización de la muestra

Se tomó una muestra de 40 L de agua residual de proceso de teñido de la industria textil, para realizar las pruebas experimentales. Se homogenizó la muestra para la caracterización y se tomó 2 L, del cual se realizaron dos replicas para determinar los parámetros que se indican en la tabla 13.

**Tabla 13**

*Caracterización de la muestra*

Parámetros	Unid.	Resultados		Promedio	*VMA D.S. N° 010-2019
		M01	M02		
Turbidez	NTU	155.4	160.2	157.8	---
pH	---	10.61	10.52	10.57	6.0 - 9.0
Temperatura	°C	32.5	33.4	32.95	<35
SST	mg/L	546.5	575.9	561.20	500
DQO	mg/L	2180.0	2220.0	2200.00	1000
DBO <sub>5</sub>	mg/L	1010.0	1100.0	1055.00	500

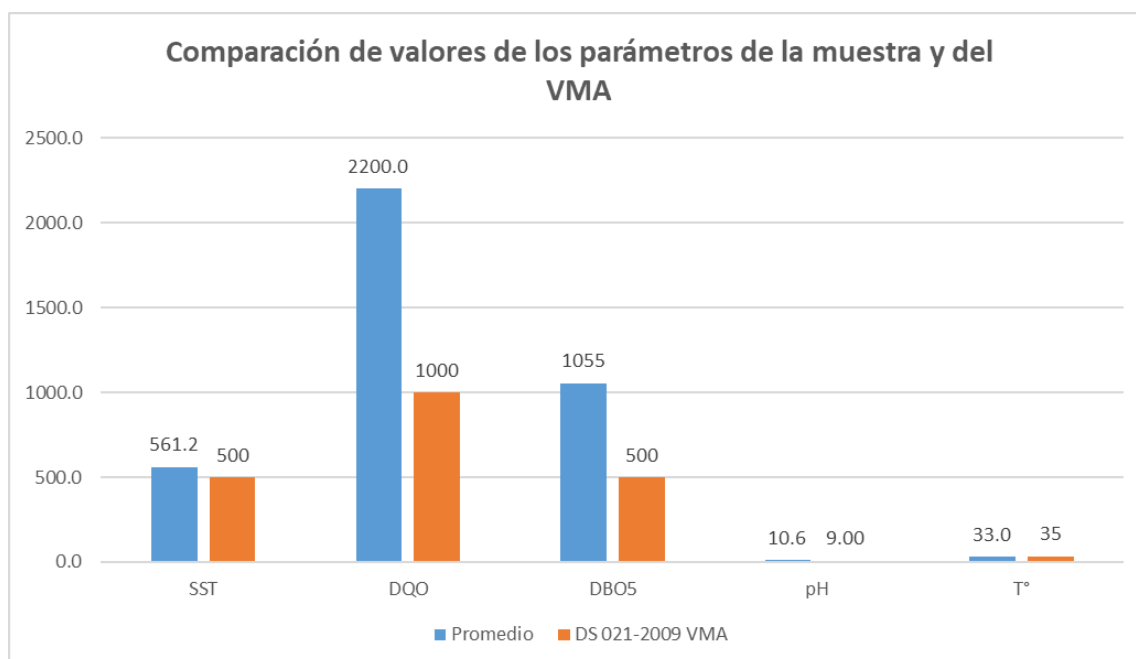
Nota: \*Información tomada y adaptada del D.S. N° 010-2019 VIVIENDA

En la **Tabla 13**, se observa los resultados de los parámetros correspondientes a la caracterización de la muestra, encontrándose que los valores de pH, SST, DQO y DBO<sub>5</sub>, son mayores a los valores establecidos en los VMA del D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

En la **Figura 7**, se muestra la comparación de los valores promedios de los parámetros de la caracterización de muestra con los valores del VMA del D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

**Figura 7**

*Comparación de valores de los parámetros de la muestra y del VMA*



### 5.1.2. Determinación del DQO en el proceso Fenton

Para el proceso Fenton se trabajó con niveles de pH 2.5 y 3.0, y en las dosis de los reactivos  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ,  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  se trabajó con niveles 1.0 y 1.5 g, 1.0 y 1.5 g, y 1.0 y 2.0 mL, respectivamente.

En la Tabla 14, se presenta 4 factores con dos niveles cada uno, una réplica de todo el diseño que resultó 16 pruebas experimentales ( $2^4$ ), resultando un total de 32 pruebas experimentales.

**Tabla 14**

*Determinación de condiciones óptimas del trabajo del proceso Fenton*

Muestra	pH	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ (g)	$\text{FeSO}_4$ (g)	$\text{H}_2\text{O}_2$ (mL)	DQO final (mg/L)
M-01	2.50	1.00	1.00	1.00	890.00
M-02	2.49	1.00	1.50	1.00	815.00
M-03	2.50	1.00	1.00	2.00	540.00
M-04	2.51	1.00	1.50	2.00	549.00

Muestra	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g)	FeSO <sub>4</sub> (g)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL)	DQO final (mg/L)
M-05	2.51	1.50	1.00	1.00	915.00
M-06	2.50	1.50	1.50	1.00	750.00
M-07	2.50	1.50	1.00	2.00	590.00
M-08	2.49	1.50	1.50	2.00	635.00
M-09	3.01	1.00	1.00	1.00	670.00
M-10	3.00	1.00	1.50	1.00	710.00
M-11	3.01	1.00	1.00	2.00	353.00
M-12	3.02	1.00	1.50	2.00	463.00
M-13	3.01	1.50	1.00	1.00	624.00
M-14	3.01	1.50	1.50	1.00	695.00
M-15	3.02	1.50	1.00	2.00	495.00
M-16	3.02	1.50	1.50	2.00	540.00
R M-01	2.50	1.00	1.00	1.00	720.00
R M-02	2.50	1.00	1.50	1.00	835.00
R M-03	2.52	1.00	1.00	2.00	525.00
R M-04	2.50	1.00	1.50	2.00	555.00
R M-05	2.51	1.50	1.00	1.00	890.00
R M-06	2.50	1.50	1.50	1.00	820.00
R M-07	2.49	1.50	1.00	2.00	593.00
R M-08	2.50	1.50	1.50	2.00	629.00
R M-09	3.02	1.00	1.00	1.00	620.00
R M-10	3.00	1.00	1.50	1.00	690.00
R M-11	3.00	1.00	1.00	2.00	395.00
R M-12	3.02	1.00	1.50	2.00	510.00
R M-13	3.00	1.50	1.00	1.00	655.00
R M-14	3.00	1.50	1.50	1.00	705.00
R M-15	3.00	1.50	1.00	2.00	515.00
R M-16	3.02	1.50	1.50	2.00	551.00

Nota: Los resultados de DQO (mg/L) obtenidos durante el proceso Fenton son menores al rango establecido en el VMA del D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

En la **Tabla 15** se muestra el promedio de DQO (mg/L) de las 16 pruebas y sus réplicas entre los rangos de pH 2.5 y 3.0 con las dosis de reactivos 1.0–1.5 g/L de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1.0-1.5 g/L de FeSO<sub>4</sub> y 1.0–2.0 mL/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, además del cálculo del % de remoción del DQO, contrastando el DQO inicial y el DQO final:

**Tabla 15**

*Promedio de los valores de DQO durante el proceso Fenton*

Muestra	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g)	FeSO <sub>4</sub> (g)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL)	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	% Remoción de DQO
M-01 R M-01	2.50	1.00	1.00	1.00	2200.00	805.00	63.41
M-02 R M-02	2.49	1.00	1.50	1.00	2200.00	825.00	62.50
M-03 R M-03	2.50	1.00	1.00	2.00	2200.00	532.50	75.80
M-04 R M-04	2.51	1.00	1.50	2.00	2200.00	552.00	74.91
M-05 R M-05	2.51	1.50	1.00	1.00	2200.00	902.50	58.98
M-06 R M-06	2.50	1.50	1.50	1.00	2200.00	785.00	64.32
M-07 R M-07	2.50	1.50	1.00	2.00	2200.00	591.50	73.11
M-08 R M-08	2.49	1.50	1.50	2.00	2200.00	632.00	71.27
M-09 R M-09	3.01	1.00	1.00	1.00	2200.00	645.00	70.68
M-10 R M-10	3.00	1.00	1.50	1.00	2200.00	700.00	68.18
<b>M-11 R M-11</b>	<b>3.01</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>2.00</b>	<b>2200.00</b>	<b>374.00</b>	<b>83.00</b>
M-12 R M-12	3.02	1.00	1.50	2.00	2200.00	486.50	77.89
M-13 R M-13	3.01	1.50	1.00	1.00	2200.00	639.50	70.93
M-14 R M-14	3.01	1.50	1.50	1.00	2200.00	700.00	68.18
M-15 R M-15	3.02	1.50	1.00	2.00	2200.00	505.00	77.05
M-16 R M-16	3.02	1.50	1.50	2.00	2200.00	545.50	75.20

Nota: Se puede observar que durante los rangos de pH de 3.0 y con dosis de reactivo 1.0 g/L Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1.0 g/L para el FeSO<sub>4</sub> y 2.0 ml/L para el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se logró un 83.00 % de remoción de DQO siendo el mayor % de remoción de carga orgánica.

### 5.1.3. Procesamiento de los resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la parte experimental han sido procesados utilizando los programas Minitab y SPSS. En la **Tabla 16**, se muestra los resultados de DQO obtenidos de acuerdo a la interacción de los 4 factores y sus 2 niveles cada uno:

**Tabla 16**

*Resultados de DQO de acuerdo a la interacción de los 4 factores y sus niveles*

pH	PERÓXIDO							
	1.0				2.0			
	SULFATO							
	1.0		1.5		1.0		1.5	
	META							
	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5
2.5	890	915	815	750	540	590	549	635
	720	890	835	820	525	593	555	629
3.0	670	624	710	695	353	495	463	540
	620	655	690	705	395	515	510	551

Nota: En la tabla se muestra las interacciones de los factores: pH con sus niveles 2.5 y 3.0, META (Metabisulfito de sodio) con sus niveles 1.0 y 1.5 (g), SULFATO (Sulfato ferroso) con sus niveles 1.0 y 1.5 (g) y PERÓXIDO (Peróxido de hidrógeno) con sus niveles de 1.0 y 2.0 (mL).

La Tabla 17 muestra la codificación de las interacciones de los 4 factores y sus respectivos niveles, para ingresar los datos de DQO a los programas Minitab y SPSS.

**Tabla 17**

*Codificación de las interacciones de los 4 factores y sus niveles*

pH	PERÓXIDO							
	1.0				2.0			
	SULFATO							
	1.0		1.5		1.0		1.5	

	META							
	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5
2.5	1111	1211	1121	1221	1112	1212	1122	1222
	1111	1211	1121	1221	1112	1212	1122	1222
3.0	2111	2211	2121	2221	2112	2212	2122	2222
	2111	2211	2121	2221	2112	2212	2122	2222

Nota: Las codificaciones mostradas en las tablas fueron ingresadas al programa SPSS para poder ingresar los resultados de DQO de cada interacción y así poder analizar la información recolectada en cada experimento.

Una vez que se ingresó los datos de DQO para cada factor y sus interacciones de acuerdo a las codificaciones, se obtuvo sus medias marginales con un intervalo de confianza al 95%. En la Tabla 18, se muestra las medias marginales estimadas para los 4 factores: pH, META, SULFATO y PEROXIDO.

**Tabla 18**

*Medias marginales estimadas para los 4 factores*

Variable dependiente: DQO				
Factor	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
pH				
2.5	703.188	9.227	683.628	722.747
3.0	574.438	9.227	554.878	593.997
META				
1.0	605.000	9.227	595.441	634.559
1.5	662.625	9.227	643.066	682.184
SULFATO				
1.0	624.375	9.227	604.816	643.934
1.5	653.250	9.227	633.691	672.809
PEROXIDO				
1.0	750.250	9.227	730.691	769.809

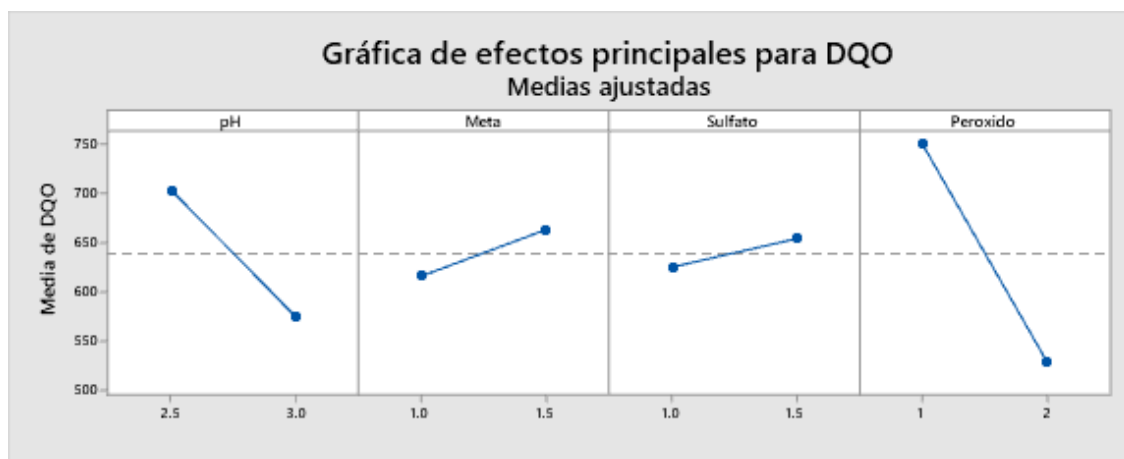
Variable dependiente: DQO				
Factor	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
2.0	527.375	9.227	507.816	546.934

Nota: \*META: Metabisulfito de sodio, \*\*SULFATO: Sulfato ferroso, se acorto los nombres de algunos reactivos para poder ingresar al programa de Minitab y SPSS.

En la **Figura 8**, se muestra los efectos positivos y negativos de cada factor: pH, META, SULFATO y PEROXIDO.

**Figura 8**

*Gráfica de efectos principales para el DQO*



Nota: De la figura podemos decir que el pH y el peróxido tiene un efecto negativo en los promedios del DQO, debido a la pendiente negativa que se muestra en la figura, mientras que el meta y el sulfato tienen un efecto positivo en los promedios del DQO, debido a la pendiente positiva que se muestra en la figura.

La Tabla 19 muestra las medias marginales estimadas para la interacción de 2 factores: pH\*META, pH\*SULFATO, pH\*PEROXIDO, META\*SULFATO, META\*PEROXIDO y SULFATOS\*PEROXIDO.

**Tabla 19**

*Medias marginales estimadas para la interacción de 2 factores*

Variable dependiente: DQO					
Factores		Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
pH	META				
2.5	1.0	678.625	13.048	650.964	706.286
	1.5	727.750	13.048	700.089	755.411
3.0	1.0	551.375	13.048	523.714	579.036
	1.5	597.500	13.048	569.839	625.161
pH	SULFATO				
2.5	1.0	707.875	13.048	680.214	735.536
	1.5	698.500	13.048	670.839	726.161
3.0	1.0	540.875	13.048	513.214	568.536
	1.5	608.000	13.048	580.339	635.661
pH	PEROXIDO				
2.5	1.0	829.375	13.048	801.714	857.036
	2.0	577.000	13.048	549.339	604.661
3.0	1.0	671.125	13.048	643.464	698.786
	2.0	477.750	13.048	450.089	505.411
META	SULFATO				
1.0	1.0	589.125	13.048	561.464	616.786
	1.5	640.875	13.048	613.214	668.536
1.5	1.0	659.625	13.048	631.964	687.286
	1.5	665.625	13.048	637.964	693.286
META	PEROXIDO				
1.0	1.0	743.750	13.048	716.089	771.411
	2.0	486.250	13.048	458.589	513.911
1.5	1.0	756.750	13.048	729.089	784.411
	2.0	568.500	13.048	540.839	596.161
SULFATO	PEROXIDO				
1.0	1.0	748.000	13.048	720.339	775.661
	2.0	500.750	13.048	473.089	528.411
1.5	1.0	752.500	13.048	724.839	780.161
	2.0	554.000	13.048	526.339	581.661

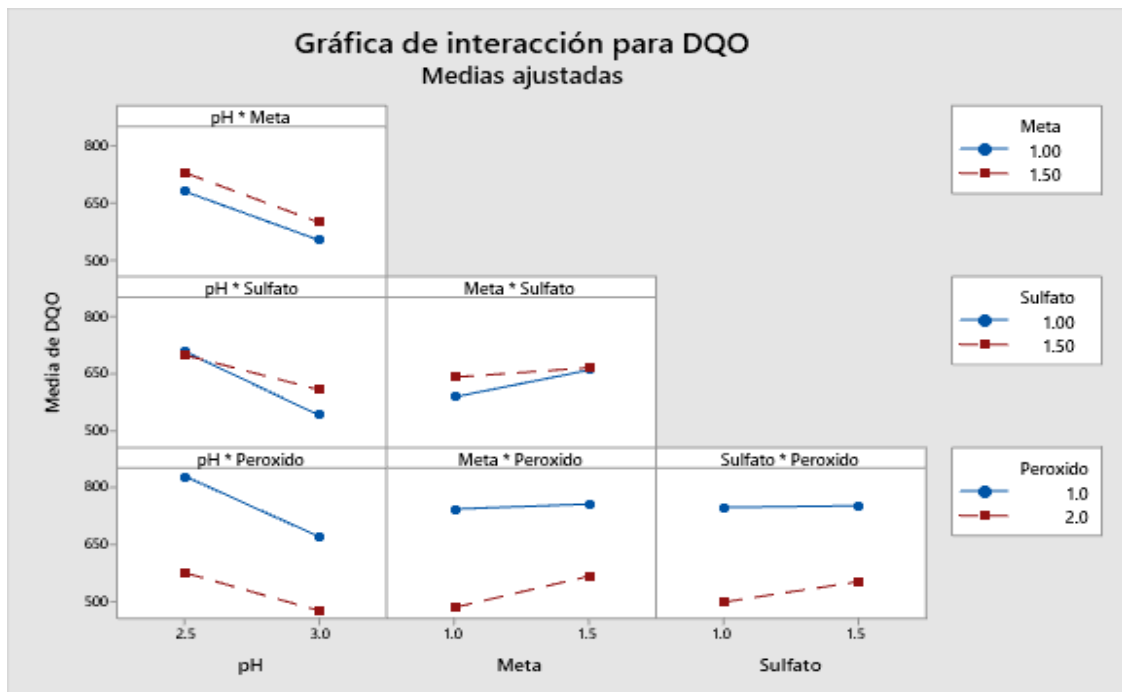


Nota: \*META: Metabisulfito de sodio, \*\*SULFATO: Sulfato ferroso, se acorto los nombres de algunos reactivos para poder ingresar al programa de Minitab y SPSS.

En la **Figura 9**, Se muestra los efectos positivos y negativos de la interacción de dos factores: pH\*META, pH\*SULFATO, pH\*PEROXIDO, META\*SULFATO, META\*PEROXIDO y SULFATOS\*PEROXIDO.

**Figura 9**

Grafica de interacción para el DQO



Nota: De la figura podemos decir que la interacción de Meta\*Sulfato tiene un efecto positivo en los promedios del DQO. La interacción pH\*Sulfato tiene efecto negativo en los promedios del DQO.

La Tabla 20 muestra las medias marginales estimadas para la interacción de 3 factores: pH\*META\*SULFATO, pH\*META\*PEROXIDO, pH\*SULFATO\*PEROXIDO y META\*SULFATO\*PEROXIDO.

**Tabla 20**

*Medias marginales estimadas para la interacción de 3 factores*

Variable dependiente: DQO						
Factores			Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
pH	META	SULFATO				
2.5	1.0	1.0	668.750	18.453	629.631	707.869
		1.5	688.500	18.453	649.381	727.619
	1.5	1.0	747.000	18.453	707.881	786.119
		1.5	708.500	18.453	669.381	747.619
3.0	1.0	1.0	509.500	18.453	470.381	548.619
		1.5	593.250	18.453	554.131	632.369
	1.5	1.0	572.250	18.453	533.131	611.369
		1.5	622.750	18.453	583.631	661.869
pH	META	PEROXIDO				
2.5	1.0	1.0	853.750	18.453	814.631	892.869
		2.0	562.000	18.453	522.881	601.119
	1.5	1.0	805.000	18.453	765.881	844.119
		2.0	592.000	18.453	552.881	631.119
3.0	1.0	1.0	642.250	18.453	603.131	681.369
		2.0	439.500	18.453	400.381	478.619
	1.5	1.0	700.000	18.453	660.881	739.119
		2.0	516.000	18.453	476.881	555.119
pH	SULFATO	PEROXIDO				
2.5	1.0	1.0	853.750	18.453	814.631	892.869
		2.0	562.000	18.453	522.881	601.119
	1.5	1.0	805.000	18.453	765.881	844.119
		2.0	592.000	18.453	552.881	631.119
3.0	1.0	1.0	642.250	18.453	603.131	681.369
		2.0	439.500	18.453	400.381	478.619
	1.5	1.0	700.000	18.453	660.881	739.119
		2.0	516.000	18.453	476.881	555.119
META	SULFATO	PEROXIDO				
1.0	1.0	1.0	725.000	18.453	685.881	764.119
		2.0	453.250	18.453	414.131	492.369
	1.5	1.0	762.500	18.453	723.381	801.619

Variable dependiente: DQO						
Factores			Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
		2.0	519.250	18.453	480.131	558.369
1.5	1.0	1.0	771.000	18.453	731.881	810.119
		2.0	548.250	18.453	509.131	587.369
	1.5	1.0	742.500	18.453	703.381	781.619
		2.0	588.750	18.453	549.631	627.869

Nota: \*META: Metabisulfito de sodio, \*\*SULFATO: Sulfato ferroso, se acorto los nombres de algunos reactivos para poder ingresar al programa de Minitab y SPSS.

La Tabla 21 muestra las medias marginales estimadas para la interacción de 4 factores: pH\*META\*SULFATO\*PEROXIDO.

**Tabla 21**

*Medias marginales estimadas para interacción de los 4 factores*

Variable dependiente: DQO							
pH	META	SULFATO	PERÓXIDO	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
2.5	1.0	1.0	1.0	805.000	26.097	749.678	860.322
			2.0	532.500	26.097	477.178	587.822
		1.5	1.0	825.000	26.097	769.678	880.322
			2.0	552.000	26.097	496.678	607.322
	1.5	1.0	1.0	902.500	26.097	847.178	957.822
			2.0	591.500	26.097	536.178	646.822
		1.5	1.0	785.000	26.097	729.678	840.322
			2.0	632.000	26.097	576.678	687.322
3.0	1.0	1.0	1.0	645.000	26.097	589.678	700.322
			2.0	374.000	26.097	318.678	429.322
		1.5	1.0	700.000	26.097	644.678	755.322
			2.0	486.500	26.097	431.178	541.822
	1.5	1.0	1.0	639.500	26.097	584.178	694.822

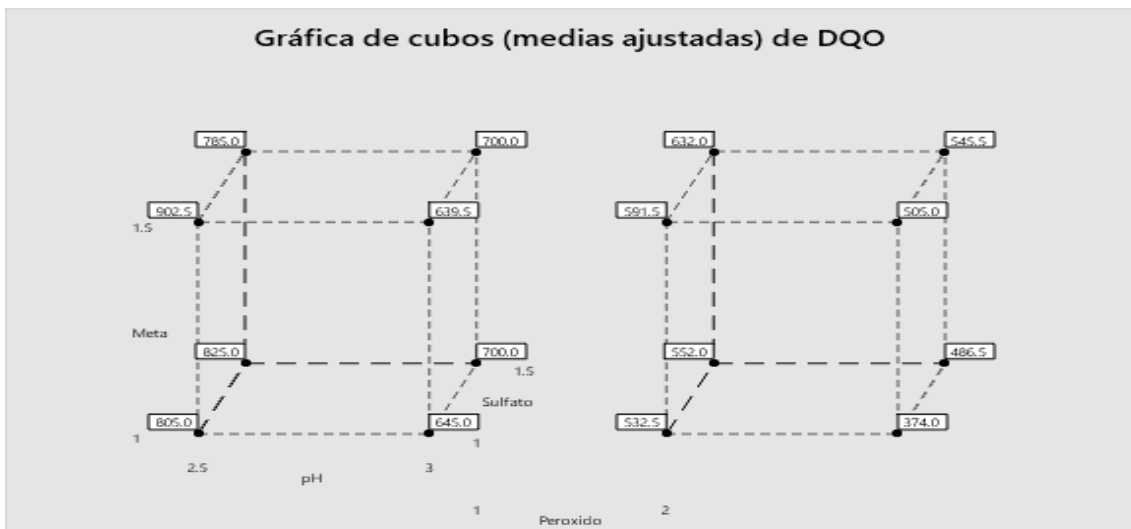
	2.0	505.000	26.097	449.678	560.322
1.5	1.0	700.000	26.097	644.678	755.322
	2.0	545.500	26.097	490.178	600.822

Nota: \*META: Metabisulfito de sodio, \*\*SULFATO: Sulfato ferroso, se acorto los nombres de algunos reactivos para poder ingresar al programa de Minitab y SPSS.

En la **Figura 10**, se muestra la interacción más óptima de los 4 factores (pH, Meta, Sulfato, Peróxido) con sus respectivos niveles donde se obtiene el DQO más bajo, se presenta la siguiente figura de cubos:

**Figura 10**

Grafica de cubos (medias ajustadas) para DQO



Nota: De la figura podemos decir que: pH= eje y, Meta= eje z, Sulfato= eje X y el Peróxido queda globalmente dentro de las dos gráficas, en el caso del valor= 1 está la gráfica de la izquierda y en caso de que el valor=2 es el gráfico de la derecha.

Donde podemos decir que los mejores valores del DQO (por ser el menor valor) lo podemos ver en cada uno de los vértices y son los siguientes:

Los mejores resultados del DQO siendo el menor valor de la reacción son pH (+1=3.0), Meta (-1=1.0), Sulfato (-1=1.0) y Peróxido (+1=2.0), el más bajo valor de DQO que podemos conseguir es **374.00 mg/L**.

Otra combinación sería pH (+1=3.0), Meta (-1=1.0), Sulfato (+1=1.5) y Peróxido (+1=2.0), da un valor de DQO = **486.50 mg/L**.

## 5.2. Resultados inferenciales

A continuación, se presentará las pruebas de normalidad según Shapiro-Wilk, dado que las muestras son de 32 muestras para las variables y sus dimensiones, esto debido que la prueba de hipótesis de la relación entre las dos variables requiere de conocer el tipo de distribución que tiene una variable.

La Tabla 22 presenta los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicado a los datos de DQO con cada de los datos de los factores.

**Tabla 22**

*Prueba de normalidad - variables*

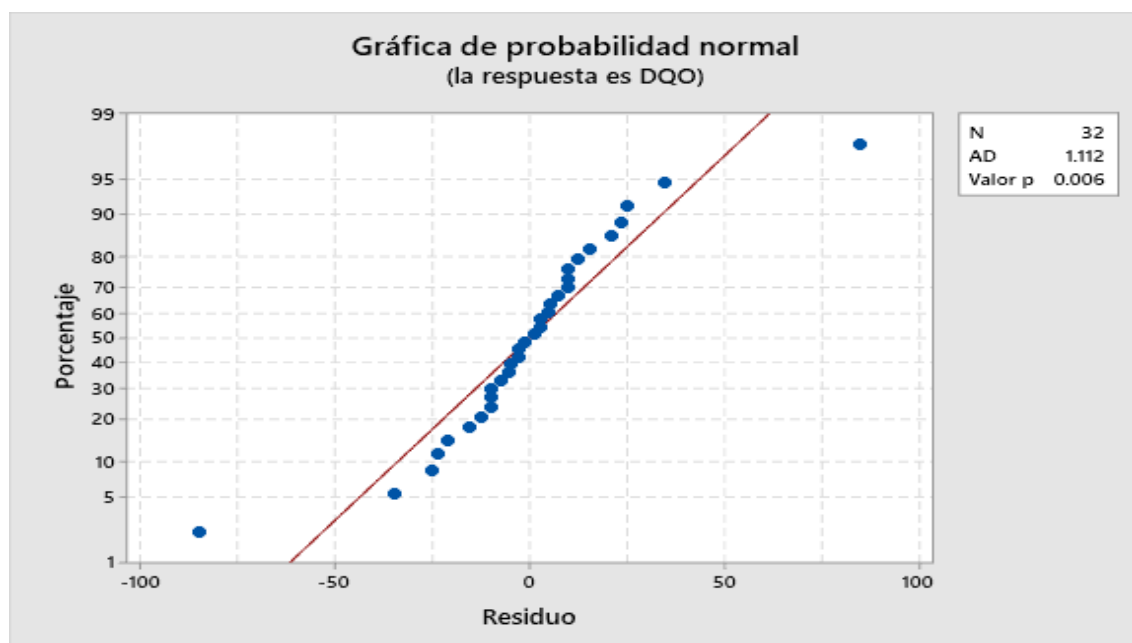
		Prueba de normalidad			
		Shapiro-Wilk			
			Estadístico	gl.	Sig.
DQO	pH	2.5	0.891	16	0.059
		3.0	0.925	16	0.204
	META	1.0	0.972	16	0.866
		1.5	0.929	16	0.236
	SULFATO	1.0	0.938	16	0.320
		1.5	0.942	16	0.380
	PEROXIDO	1.0	0.920	16	0.170
		2.0	0.929	16	0.233

El p-valor encontrado indica que los datos de las variables DQO y los factores del proceso Fenton, presentan normalidad ( $p > 0,05$ ), motivo por lo que se realizó las pruebas paramétricas.

En la **Figura 11**, se presenta la probabilidad normal de las variables.

**Figura 11**

*Gráfica de probabilidad normal*



Nota: En esta gráfica se verifica el ajuste de los residuos a la distribución normal p-valor = 0.006, lo cual es  $< 0.05$ . Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna  $H_1$ . Por lo tanto, existe una normalidad de los residuos porque los puntos están muy cerca a la recta.

La Tabla 23 presenta la prueba de t-Student de los datos de la DQO final.

**Tabla 23**

*Prueba de t-Student para el DQO*

t	Gl.	Significación		Diferencias de medias	95 % de intervalo de confianza de la diferencia		
		P de un factor	P de los factores		Inferior	Superior	
DQO	0.000	31	0.500	1.000	0.003	-51.20	+51.20

Nota: De acuerdo al análisis estadístico el t-Student, con un p-valor = 0.000 de la DQO se encuentra en el rango del límite inferior y superior; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

### 5.2.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Con respecto a los resultados inferenciales podemos decir:

- Variable de respuesta: La variable de respuesta son el valor DQO.
- Factor controlado: Factor controlado (pH) (Meta) (Sulfato) (Peróxido).
- Niveles de factor: Dos niveles de factor (alta y baja) para cada factor; en total serian 8 niveles de factor.

Para rechazar o aceptar las hipótesis nulas H0 o hipótesis alternas H1, la Tabla 24 presenta el análisis de varianza (ANOVA), donde se estableció un nivel de significancia de 0.05, y la última muestra el valor de p.

**Tabla 24**

*Análisis de varianza (ANOVA)*

Factores / Interacción	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p (Sig.)
Lineal	4	554814	138703	101.83	0.000
<b>pH</b>	<b>1</b>	<b>132613</b>	<b>132613</b>	<b>97.36</b>	<b>0.000</b>
<b>Meta</b>	<b>1</b>	<b>18145</b>	<b>18145</b>	<b>13.32</b>	<b>0.002</b>
<b>Sulfato</b>	<b>1</b>	<b>6670</b>	<b>6670</b>	<b>4.90</b>	<b>0.042</b>
<b>Peróxido</b>	<b>1</b>	<b>397386</b>	<b>397386</b>	<b>291.75</b>	<b>0.000</b>
Interacciones de 2 términos	6	37215	6202	4.55	0.007
pH*Meta	1	18	18	0.01	0.910
<b>pH*Sulfato</b>	<b>1</b>	<b>11704</b>	<b>11704</b>	<b>8.59</b>	<b>0.010</b>
<b>pH*Peróxido</b>	<b>1</b>	<b>6962</b>	<b>6962</b>	<b>5.11</b>	<b>0.038</b>
Meta*Sulfato	1	4186	4186	3.07	0.099
<b>Meta*Peróxido</b>	<b>1</b>	<b>9591</b>	<b>9591</b>	<b>7.04</b>	<b>0.017</b>
Sulfato*Peróxido	1	4753	4753	3.49	0.080
Interacciones de 3 términos	4	4557	1139	0.84	0.522
pH*Meta*Sulfato	1	312	312	0.23	0.638
pH*Meta*Peróxido	1	1624	1624	1.19	0.291
pH*Sulfato*Peróxido	1	1800	1800	1.32	0.267
Meta*Sulfato*Peróxido	1	820	820	0.60	0.449
Interacciones de 4 términos	1	6962	6962	5.11	0.038

Factores / Interacción	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p (Sig.)
<b>pH*Meta*Sulfato*Peróxido</b>	<b>1</b>	<b>6962</b>	<b>6962</b>	<b>5.11</b>	<b>0.038</b>
Error	16	21793	1362		
Total	31	625341			

Nota: \*META: Metabisulfito de sodio, \*\*SULFATO: Sulfato ferroso, se acortó los nombres de algunos reactivos para poder ingresar al programa de Minitab y SPSS.

De acuerdo a la Tabla 24 de ANOVA, podemos decir que los factores y sus interacciones que tienen un  $p\text{-valor} < 0.05$  son:

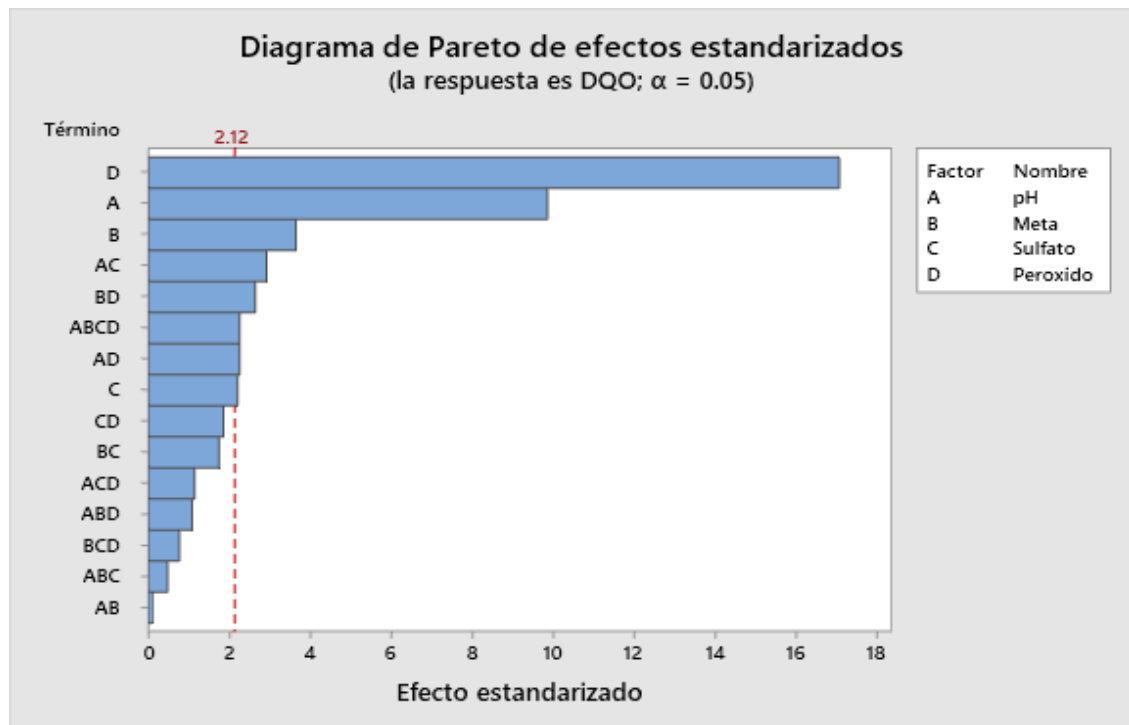
- Factor D (Peróxido)  $p\text{-valor} = 0.000$
- Factor A (pH)  $p\text{-valor} = 0.000$
- Factor B (Meta)  $p\text{-valor} = 0.002$
- Interacción AC (pH-Sulfato)  $p\text{-valor} = 0.010$
- Interacción BD (Meta-Peróxido)  $p\text{-valor} = 0.017$
- Interacción ABCD (pH-Meta-Sulfato-Peróxido)  $p\text{-valor} = 0.038$
- Interacción AD (pH-Peróxido)  $p\text{-valor} = 0.038$
- Factor C (Sulfato)  $p\text{-valor} = 0.042$

En la Figura 12, se muestra el diagrama de Pareto podemos observar a detalle los factores e interacciones que tienen el  $p\text{-valor} < 0.05$ :



**Figura 12**

*Diagrama de Pareto de efectos estandarizados*



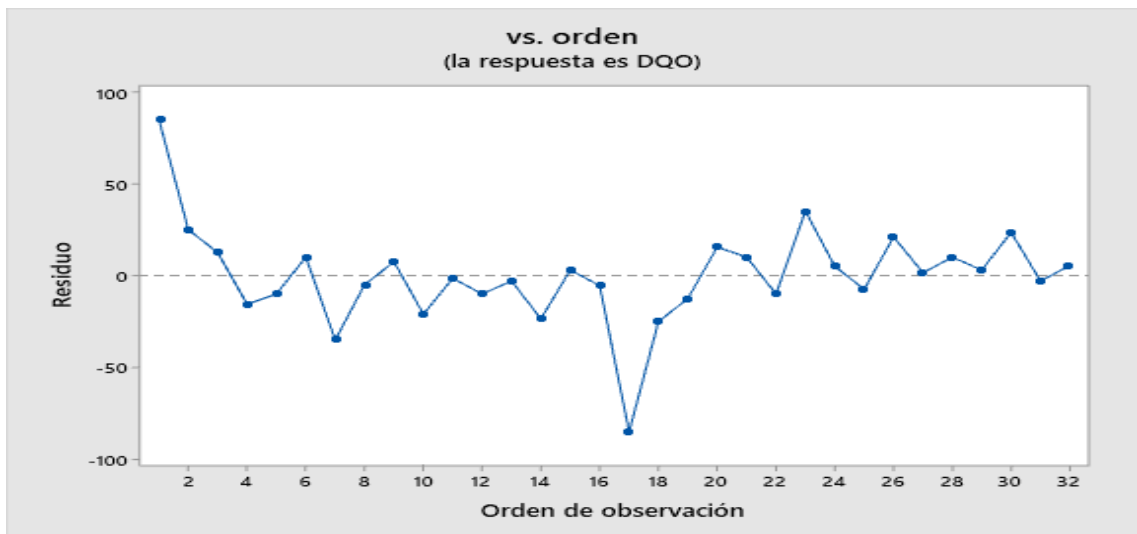
Nota: Del gráfico de Pareto podemos decir, los principales efectos de factor o interacción, tienen el p-valor  $< 0.05$ , por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta hipótesis de la investigación donde los factores e interacciones que influyen en el DQO son: Factor D (Peróxido), Factor A (pH), Factor B (Meta), Interacción AC (pH-Sulfato), Interacción BD (Meta-Peróxido), Interacción ABCD (pH-Meta-Sulfato-Peróxido), Interacción AD (pH-Peróxido) y Factor C (Sulfato).

### 5.2.2. Los residuos deben de ser independientes

Para determinar la aleatoriedad de los residuos, en la **Figura 13** se presenta la aleatoriedad.

**Figura 13**

Grafica de aleatoriedad



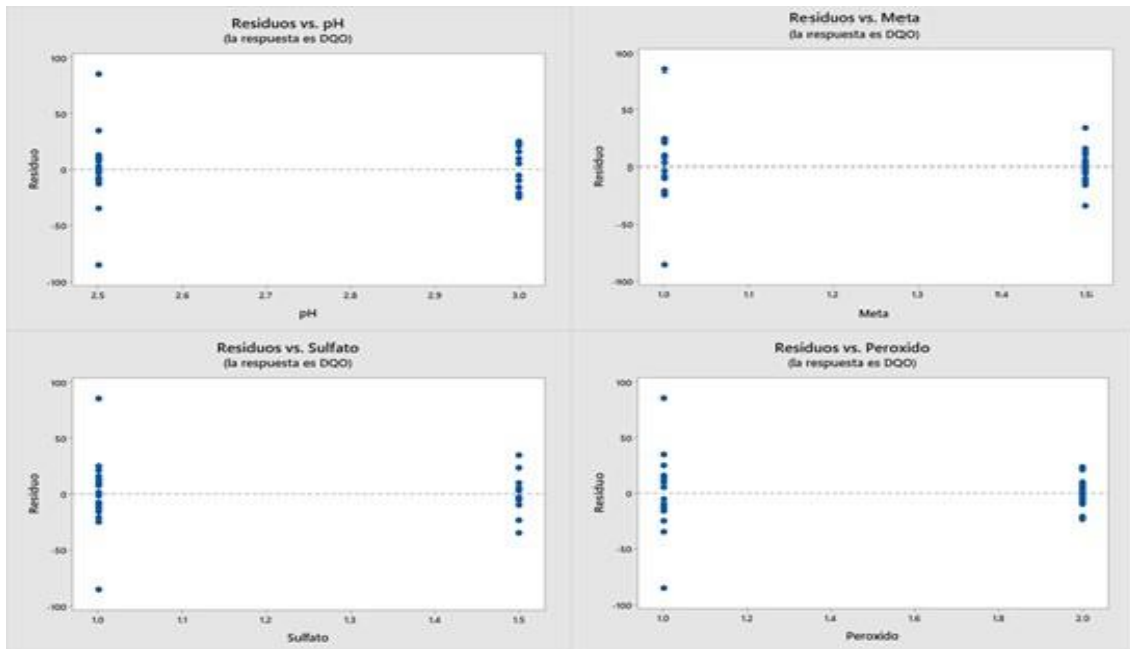
Nota: De la figura, se confirma debido a que existe una dispersión absoluta entre los datos, podemos asegurar que nuestro experimento tiene una buena aleatoriedad y que no existe ninguna tendencia rara.

### 5.2.3. Los residuos deben de tener varianza constante

Para cada uno de los factores se va analizar los residuos para ver su varianza constante, en la **Figura 14** se presenta las varianzas de los residuos.

## Figura 14

Grafica de las varianzas de los residuos



Nota: De acuerdo a las figuras, los residuos para cada factor tienen varianzas constantes, debido a que existe una alineación entre los puntos de valor máximo y mínimo. Por tanto, la suposición de varianza se confirma con las gráficas.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

#### 6.1.1. Contrastación de hipótesis para el DQO

**HIPÓTESIS 1:** Factor A = pH

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de pH (2.5 y 3.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de pH (2.5 y 3.0).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 23) es 0.000 valor  $< 0.05$  se rechaza la hipótesis nula **H0** y se acepta la hipótesis alterna **H1**, Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de pH (2.5 y 3.0).
- **CONCLUSIÓN:** con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la aplicación de dos niveles de pH (2.5 y 3.0). El promedio de DQO al 2.5 es **703.19 mg/L** y al 3.0 es **574.45 mg/L**.

**HIPÓTESIS 2:** Factor B = META

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de META (1.0 y 1.5).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de META (1.0 y 1.5).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 24) es 0.002 valor  $< 0.05$  se rechaza la hipótesis nula **H0** y se acepta la hipótesis alterna **H1**. Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de META (1.0 y 1.5).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de

DQO, debido a la aplicación de dos niveles de META (1.0 y 1.5). El promedio de DQO al 1.0 es **615.00 mg/L** y al 1.5 es **662.63 mg/L**.

### **HIPÓTESIS 3:** Factor C = SULFATO

**Ho:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de SULFATO (1.0 y 1.5).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de SULFATO (1.0 y 1.5).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 25) es 0.042 valor < 0.05 se rechaza la hipótesis nula **H0** y se acepta la hipótesis alterna **H1** (Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de SULFATO (1.0 y 1.5).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la aplicación de dos niveles de SULFATO (1.0 y 1.5). El promedio de DQO al 1.0 es **624.38 mg/L** y al 1.5 es **653.25 mg/L**.

### **HIPÓTESIS 4:** Factor D = PERÓXIDO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 26) es 0.000 valor < 0.05 se rechaza la hipótesis nula **H0** y se acepta la hipótesis alterna **H1**. Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la aplicación de dos niveles de PEROXIDO (1.0 y 2.0).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la aplicación de dos niveles de PERÓXIDO (1.0 y 2.0). El promedio de DQO al 1.0 es **750.25 mg/L** y al 2.0 es **527.38 mg/L**.

### **HIPÓTESIS 5:** Interacción A\*B = pH\*META

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de META (1.0 y 1.5).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de META (1.0 y 1.5).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 27) es 0.910 valor  $> 0.05$  se rechaza la hipótesis alterna **H1** y se acepta la hipótesis nula **H0**. No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de META (1.0 y 1.5).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de META (1.0 y 1.5). El promedio de DQO cuando el pH 2.5 y META 1.0 es **678.63 mg/L**, a pH 2.5 y META 1.5 es **727.75 mg/L**, a pH 3.0 y META 1.0 es **551.38 mg/L** y a pH 3.0 y META 1.5 es **597.50 mg/L**.

### **HIPÓTESIS 6:** Interacción A\*C = pH\*SULFATO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de SULFATO (1.0 y 1.5).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de SULFATO (1.0 y 1.5).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 28) es 0.010 valor  $> 0.05$  se rechaza la hipótesis nula **H0** y se acepta la hipótesis alterna **H1**. Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de SULFATO (1.0 y 1.5).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de SULFATO (1.0 y 1.5). El promedio de DQO cuando el pH 2.5 y SULFATO 1.0

es **707.88 mg/L**, a pH 2.5 y SULFATO 1.5 es **698.50 mg/L**, a pH 3.0 y SULFATO 1.0 es **540.88 mg/L** y a pH 3.0 y SULFATO 1.5 es **608.00 mg/L**.

#### **HIPÓTESIS 7:** Interacción A\*D = pH\*PERÓXIDO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 29) es 0.038 valor > 0.05 se rechaza la hipótesis nula **H0** y se acepta la hipótesis alterna **H1**. Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de PERÓXID (1.0 y 2.0).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0). El promedio de DQO cuando el pH 2.5 y PERÓXIDO 1.0 es **829.38 mg/L**, a pH 2.5 y PERÓXIDO 2.0 es **577.00 mg/L**, a pH 3.0 y PERÓXIDO 1.0 es **671.13 mg/L** y a pH 3.0 y PERÓXIDO 2.0 es **477.75 mg/L**.

#### **HIPÓTESIS 8:** Interacción B\*C = META\*SULFATO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5) y SULFATO (1.0 y 1.5).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5) y de SULFATO (1.0 y 1.5).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 30) es 0.099 valor > 0.05 se rechaza la hipótesis alterna **H1** y se acepta la hipótesis nula **H0**. No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5) y de SULFATO (1.0 y 1.5).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de

DQO, debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5) y de SULFATO (1.0 y 1.5). El promedio de DQO cuando el META 1.0 y SULFATO 1.0 es **589.13 mg/L**, a META 1.0 y SULFATO 1.5 es **640.88 mg/L**, a META 1.5 y SULFATO 1.0 es **659.63 mg/L** y a META 1.5 y SULFATO 1.5 es **665.63 mg/L**.

**HIPÓTESIS 9:** Interacción B\*D = META\*PERÓXIDO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 31) es 0.017 valor > 0.05 se rechaza la hipótesis nula **H0** y se acepta la hipótesis alterna **H1**. Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0). El promedio de DQO cuando el META 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **743.75 mg/L**, a META 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **486.25 mg/L**, a META 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **756.75 mg/L** y a META 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **568.50 mg/L**.

**HIPÓTESIS 10:** Interacción C\*D = SULFATO\*PEROXIDO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de SULFATO (1.0 y 1.5) y PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de SULFATO (1.0 y 1.5) y PERÓXIDO (1.0 y 2.0).



- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 32) es 0.080 valor > 0.05 se rechaza la hipótesis alterna **H1** y se acepta la hipótesis nula **H0**. No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de SULFATO (1.0 y 1.5) y PERÓXIDO (1.0 y 2.0).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles de SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0). El promedio de DQO cuando el SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **748.00 mg/L**, a SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **500.75 mg/L**, a SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **752.50 mg/L** y a SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **554.00 mg/L**.

**HIPÓTESIS 11:** Interacción A\*B\*C = pH\*META\*SULFATO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5) y de SULFATO (1.0 y 1.5).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5) y SULFATO (1.0 y 1.5).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 33) es 0.638 valor > 0.05 se rechaza la hipótesis alterna **H1** y se acepta la hipótesis nula **H0**. No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5) y SULFATO (1.0 y 1.5).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5%, los datos recopilados nos dan evidencia de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles del pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5) y SULFATO (1.0 y 1.5). El promedio de DQO cuando el pH 2.5, META 1.0 y SULFATO 1.0 es **668.75 mg/L**; a pH 2.5, META 1.0 y SULFATO 1.5 es **688.50 mg/L**; a pH 2.5, META 1.5 y SULFATO 1.0 es **747.00 mg/L**; a pH 2.5, META 1.5 y SULFATO 1.5 es **708.50 mg/L**; a pH 3.0, META 1.0 y SULFATO 1.0 es **509.50 mg/L**; a pH 3.0, META 1.0 y SULFATO 1.5 es

**593.25 mg/L;** a pH 3.0, META 1.5 y SULFATO 1.0 DQO es **572.25 mg/L** y a pH 3.0, META 1.5 y SULFATO 1.5 es **622.75 mg/L.**

**HIPÓTESIS 12:** Interacción A\*B\*D = pH\*META\*PEROXIDO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 34) es 0.291 valor > 0.05 se rechaza la hipótesis alterna **H1** y se acepta la hipótesis nula **H0**. No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5%, los datos recopilados nos dan evidencia de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0). El promedio de DQO cuando el pH 2.5, META 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **815.00 mg/L;** a pH 2.5, META 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **542.25 mg/L;** a pH 2.5, META 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **843.75 mg/L;** a pH 2.5, META 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **611.75 mg/L;** a pH 3.0, META 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **672.50 mg/L;** a pH 3.0, META 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **430.25 mg/L;** a pH 3.0, META 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **669.75 mg/L** y pH 3.0, META 15 y PERÓXIDO 2.0 es **525.25 mg/L.**

**HIPÓTESIS 13:** Interacción A\*C\*D = pH\*SULFATO\*PEROXIDO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 35) es 0.267 valor > 0.05 se rechaza la hipótesis alterna **H1** y se acepta la hipótesis nula **H0**. No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de dos niveles de pH (2.5 y 3.0), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0). El promedio de DQO, cuando el pH 2.5, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **853.75 ;mg/L** a pH 2.5, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **562.00 mg/L**; a pH 2.5, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **805.00 mg/L**; a pH 2.5, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **592.00 mg/L**; a pH 3.0, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **642.25 mg/L**; a pH 3.0, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **439.50 mg/L**; a pH 3.0, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **700.00 mg/L** y a pH 3.0, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **516.00 mg/L**.

**HIPÓTESIS 14:** Interacción B\*C\*D = META\*SULFATO\*PEROXIDO

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 36) es 0.449 valor > 0.05 se rechaza la hipótesis alterna **H1** y se acepta la hipótesis nula **H0**. No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de

dos niveles de META (1.0 y 1.5), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la interacción de los dos niveles de META (1.0 y 1.5), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0). El promedio de DQO cuando el META 1.0, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **725.00 mg/L**; a META 1.0, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **453.25 mg/L**; a META 1.0, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **762.50 mg/L**; a META 1.0, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **519.25 mg/L**; a META 1.5, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **771.00 mg/L**; a META 1.5, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **548.25 mg/L**; a META 1.5, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **742.50 mg/L** y a META 1.5, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **588.75 mg/L**.

**HIPÓTESIS 15:** Interacción  $A*B*C*D = pH*META*SULFATO*PEROXIDO$

**H0:** No existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

**H1:** Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).

- **DISCUSIÓN:** Como el Sig. o p-valor (Tabla 37) es 0.038 valor  $> 0.05$ , se rechaza la hipótesis nula **H0** y se acepta la hipótesis alterna **H1**. Si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0).
- **CONCLUSIÓN:** Con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO debido a la interacción de los dos niveles de pH (2.5 y 3.0), META (1.0 y 1.5), SULFATO (1.0 y 1.5) y de PERÓXIDO (1.0 y 2.0). El promedio de DQO cuando el pH 2.5, META 1.0, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **805.00 mg/L**;

a pH 2.5, META 1.0, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **532.50 mg/L**; a pH 2.5, META 1.0, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **825.00 mg/L**; a pH 2.5, META 1.0, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **552.00 mg/L**; a pH 2.5, META 1.5, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **902.50 mg/L**; a pH 2.5, META 1.5, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **591.50 mg/L**; a pH 2.5, META 1.5, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **785.00 mg/L**; a pH 2.5, META 1.5, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **632.00 mg/L**; a pH 3.0, META 1.0, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **645.00 mg/L**; a pH 3.0, META 1.0, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **374.00 mg/L**; a pH 3.0, META 1.0, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **700.00 mg/L**; a pH 3.0, META 1.0, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **486.50 mg/L**; a pH 3.0, META 1.5, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 1.0 es **639.50 mg/L**; a pH 3.0, META 1.5, SULFATO 1.0 y PERÓXIDO 2.0 es **505.00 mg/L**; a pH 3.0, META 1.5, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 1.0 es **700.00 mg/L** y a pH 3.0, META 1.5, SULFATO 1.5 y PERÓXIDO 2.0 es **545.50 mg/L**.

## 6.2. Contrastación de las hipótesis de investigación

### 6.2.1. Hipótesis general

La hipótesis general “**La optimización del proceso Fenton influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales en la industria textil.**” se contrastó con los resultados obtenidos, lo cual nos permite determinar si nuestra hipótesis planteada es aceptada o rechazada.

**H<sub>1</sub>**: La optimización del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales en la industria textil.

**H<sub>0</sub>**: La optimización del proceso Fenton **no** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales en la industria textil.

De acuerdo a los resultados, la optimización del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, esto se demuestra en la obtención con los resultados del DQO siendo el valor más bajo con un promedio de 374.00 mg/L con un nivel de significación 5% y un p-valor <

0.05; y con las condiciones óptimas de trabajo con la interacción del pH a 3.0, Metabisulfito de sodio a 1.0 g, Sulfato ferroso a 1.0 g y Peróxido de hidrógeno a 2.0 mL. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

Además, de acuerdo al análisis estadístico del t-Student (ver tabla 23) con un p-valor= 0.000, nos confirma que la DQO se encuentra en el rango del límite inferior y superior, por lo tanto. Se acepta la hipótesis alterna.

Por último, podemos afirmar que los resultados de DQO (mg/L) del tratamiento de las aguas residuales de la industria textil mediante el método Fenton cumple con los VMA según el D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.

### **6.2.2. Hipótesis específicas**

- **Hipótesis específica 1**

**H<sub>1</sub>**: El pH del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>01</sub>**: El pH del proceso Fenton **no** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el pH del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, esto se demuestra con los resultados de DQO obtenido; con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la aplicación de dos niveles de pH (2.5 y 3.0). El promedio de DQO al 2.5 es 703.19 mg/L y al 3.0 es 574.45 mg/L. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

- **Hipótesis específica 2**

**H<sub>2</sub>**: La masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>02</sub>:** La masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton **no** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, esto se demuestra con los resultados de DQO obtenido; con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la aplicación de dos niveles de Metabisulfito de sodio (1.0 y 1.5). El promedio de DQO al 1.0 es 615.00 mg/L y al 1.5 es 662.63 mg/L. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

- **Hipótesis específica 3**

**H<sub>3</sub>:** La masa de sulfato ferroso del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>03</sub>:** La masa de sulfato ferroso del proceso Fenton **no** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la masa de sulfato ferroso del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, esto se demuestra con los resultados de DQO obtenido; con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la aplicación de dos niveles de Sulfato ferroso (1.0 y 1.5). El promedio de DQO al 1.0 es 624.38 mg/L y al 1.5 es 653.25 mg/L. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

- **Hipótesis específica 4**

**H<sub>4</sub>:** El volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton **si** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

**H<sub>04</sub>:** El volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton **no** influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton si influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, esto se demuestra con los resultados de DQO obtenido; con un nivel de significación de 5% los datos recopilados nos dan evidencia de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de DQO, debido a la aplicación de dos niveles de Peróxido de hidrógeno (1.0 y 2.0). El promedio de DQO al 1.0 es 750.25 mg/L y al 2.0 es 527.38 mg/L. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

### **6.3. Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

Los datos obtenidos durante las pruebas experimentales en el tratamiento de aguas residuales de industria textil a través de la aplicación del proceso Fenton y comparando estos los resultados con otros estudios realizados nos indican que en algunos casos hay similitudes y en otras pequeñas diferencias.

En la presente investigación se analizó la interacción de los parámetros de pH (2.5 y 3.0), dosis de reactivos como Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1.0 y 1,5 g), FeSO<sub>4</sub> (1.0 y 1,5 g) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1.0 y 2,0 mL) utilizados durante el proceso Fenton aplicado a las aguas residuales de una industria textil; obteniendo un valor promedio de DQO de 374.00 mg/L generando un porcentaje de remoción de carga orgánica de 83.00%. Estos resultados se obtuvieron trabajando con valores en un rango de pH de 3.0, dosis de reactivos: Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 1.0 g/L, FeSO<sub>4</sub> de 1.0 g/L y de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 2.0 mL/L. De los resultados obtenidos, nos confirma por ejemplo que la investigación de **Favero y otros (2018)**, en la cual también evalúa la eficiencia del proceso Fenton un **72.60 % de DQO**, 36.25% de color y 98.59% de turbidez; utilizando diferentes rangos de pH y reactivos como Fe<sup>+2</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, entre otros, concluyendo que nuestros resultados son similares.



**Ilhan y otros (2019)**, que en su investigación de tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utiliza el proceso Fenton convencional, regulando la dosificación de los reactivos  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , el pH utilizando como medida de indicador de la remoción de carga orgánica al DQO. La óptima remoción de carga orgánica lo logró con 1.093 g/L  $\text{Fe}^{+2}$  concentración, 1.600 g/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentración, pH 3.2; teniendo como eficiencias del **82,8% para el DQO**, similar a la investigación realizada por **Ramos y otros (2021)**, que aplicando el proceso Fenton como alternativa de tratamiento de efluentes textiles logró reducir un promedio de **82% de DQO**, utilizando también como reactivos durante el proceso Fenton  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; además de trabajar en un pH cercano a 3.0, para lograr la formación de los radicales  $\text{OH}^\cdot$  mediante la reacción de  $\text{Fe}^{+2}$  y el  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; ya que estos radicales se encargan de la degradación de los contaminantes orgánicos. De los resultados mencionados confirma en su investigación **Ames y otros (2015)**, que el proceso Fenton es un tratamiento adecuado para remover contaminantes de los efluentes industriales que colorantes como de las industrias textiles y lo demuestra utilizando reactivos como metabisulfito de sodio, sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno; obteniendo un promedio de DQO de 876.00 mg/L. También tenemos la investigación de **Medina y otros (2017)**, que nos confirma la optimización del proceso Fenton para el tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario obteniendo valores óptimos de trabajo en dos temporadas: en época de lluvia con un pH = 3.19, Sulfato ferroso = 1645.55 mg/L y Peróxido de hidrógeno = 1096.55 mg/L y en época de estiaje con un pH = 3.26, Sulfato ferroso = 1788.61 mg/L y Peróxido de hidrógeno = 1180.83 mg/L, con una eliminación cercana de 42% de DQO en ambas épocas. Similar a la investigación de **Rosales (2017)**, logra la remoción de carga orgánica de un efluente textil obteniendo como resultado un DQO por encima del 86%, con dosis óptima de 12.17 mL/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30% y 0.2 g/L de  $\text{Fe}^{+2}$  a un pH ácido de 2.6.

#### **6.4. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes**

El presente proyecto de investigación tiene a considerar dentro de sus normas éticas y procedimientos que se han desarrollado de manera íntegra durante todo el proceso de recolección de información, parte experimental y

procesamiento de información analizando la problemática planteada. Además, está sujeto a la normativa y a los principios ético que han sido establecidos por la Universidad Nacional del Callao.

Toda la información que se encuentra en este documento cuenta con el consentimiento de los representantes de la empresa textil de donde provienen las aguas residuales para los estudios que se han realizado. Además, se cuenta con el permiso de los representantes del Instituto Tecsup N° 1, en el uso de sus ambientes de laboratorio, equipos, etc., para el desarrollo de la parte experimental, teniendo acceso al uso de la información para efectos de la investigación.

Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en la presente tesis, estando de acuerdo con el Reglamento del Código de ética de la investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N°260-2019 CU, donde se señala los principios éticos como norma de comportamiento constitucional; por ello los tesisistas somos responsables de los procesos y procedimientos de diseño, desarrollo de nuestra investigación.

## VII.

## CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación se concluye, que la evaluación de la optimización del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil nos permitió determinar los parámetros óptimos de trabajo como el pH, masa de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ , masa de  $\text{FeSO}_4$  y volumen  $\text{H}_2\text{O}_2$ , para obtener como resultado un DQO de 374.00 mg/L con un porcentaje de remoción de carga orgánica de 83%, lo cual indica que se está cumpliendo con los VMA del D.S. N° 010-2019 VIVIENDA.
- Se concluye que, el pH óptimo del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, fue de 3.0 y la masa óptima de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  fue de 1.0 g/L, con los cuales se obtuvo un mayor porcentaje de remoción de carga orgánica.
- Se concluye que, la masa óptima de  $\text{FeSO}_4$  fue de 1.0 g/L y el volumen óptimo de  $\text{H}_2\text{O}_2$  del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil fue de 2.0 mL/L y, con los cuales se obtuvo un mayor porcentaje de remoción de carga orgánica.
- La eliminación de carga orgánica en aguas residuales textiles se puede lograr aplicando el proceso Fenton y se obtiene mejores resultados controlando los parámetros de pH a 3.0, masa de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  a 1.0 g/L, masa de  $\text{FeSO}_4$  a 1,0 g/L y volumen de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a 2.0 mL/L. Por lo tanto, se concluye que el proceso Fenton es un tratamiento de oxidación avanzada eficiente para la remoción de altos contenidos de carga orgánica en efluentes de industrias textiles.

## VIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar con otros indicadores como el tiempo del proceso Fenton y la velocidad de agitación.
- Se recomienda una dosificación automática (ácido o base) para regular el pH de la muestra durante el proceso Fenton.
- Se recomienda, estudiar con otros niveles de masa de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  y  $\text{FeSO}_4$  y volumen de  $\text{H}_2\text{O}_2$  para encontrar una mayor remoción de DQO.
- Se recomienda estudiar otros parámetros relacionados a la variable dependiente.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AMES, Enrique, REQUE, María y VÁSQUEZ, César. 2015.** *Fenton térmico activado en el tratamiento de efluentes de la producción industrial de colorantes de carmín y bixina.* Perú : TECSUP, 2015.

**BES, Sarai, SILVA, Adrián y BENGEOA, Christophe. 2018.** *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales.* España : CYTED, 2018.

**BUSTAMANTE, Raúl. 2016.** *La industria textil y confecciones.* Perú : Asociación peruana de tóxicos textiles, 2016.

**CALDERÓN, Fabiola y OLORTICO, Stefany. 2019.** *Proceso fotofenton para la degradación de color del efluente de la industria textil.* Perú : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.

**CERRÓN, Alonso y UNTERLASS, Miriam. 2018.** *Síntesis ecoamigables de colorantes.* Perú : Revista de Química PUCP, 2018.

**CORREA, Santiago. 2016.** *Evaluación del proceso ozono-fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.* Colombia : Universidad EAFIT, 2016.

**CORTAZAR, Adriana, y otros. 2016.** *Contaminación generada por colorantes de la industria textil.* México : Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, 2016.

**DÍAZ, Noemi, MATOS, Carmen y QUISPE, Ruth. 2018.** *Uso del quitosano como coagulante natural para el tratamiento de efluentes generados por la industria textil caso: Compañía Universal Textil S.A.* Perú : Universidad Nacional del Callao, 2018.

**DIGESA. 2007.** *Protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales.* Perú : s.n., 2007.

**FAVERO, Bruno, y otros. 2018.** *Evaluation of the efficiency of coagulation/flocculation and Fenton process in reduction of colour, turbidity and COD of a textile effluent.* Brasil : Revista Environmental Technology, 2018.

**GILPAVAS, Edison. 2017.** *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a proceso fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia.* México : Revista internacional de contaminación ambiental de la ciudad de México, 2017.

**HERNÁNDEZ, Roberto, FERNÁNDEZ, Carlos y BAPTISTA, María del Pilar. 2014.** *Metodología de la investigación*. México : Mc Graw Hill, 2014.

**ILHAN, Fatih, y otros. 2019.** *Treatability of raw textile wastewater using Fenton process and its comparison with chemical coagulation*. Turkey : Yildiz Technical University, 2019.

**LÓPEZ, Víctor y CRESPI, Martín. 2015.** *Gestión de los efluentes de la industria textil*. Argentina : Universidad Politécnica de Cataluña, 2015.

**MEDINA, Carlos, MONTERO DEL ÁGUILA, Edgar y CRUZ, Liz. 2017.** *Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios*. Perú : Revista Sociedad Química, 2017.

**Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. 2019.** *Decreto supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillados sanitario, Decreto Supremo N° 010-2019-Vivienda*. Perú : s.n., 2019.

**NICODEMOS, Márcio, SANTANA, Cássia y MARQUES, Alisson. 2021.** *A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes*. s.l. : Revista Process Safety and Environmental Protection, 2021.

**NIETO, Rubí y HUAMAN, Juan. 2019.** *Optimización de los parámetros operacionales del proceso de oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales provenientes de un matadero de porcinos*. Perú : Universidad Nacional del Callao, 2019.

**ÑAUPAS, Humberto, y otros. 2018.** *Metodología de la investigación Cuantitativa- Cualitativa y redacción de la tesis*. Colombia : Ediciones de la U, 2018.

**PADILLA, Ernesto. 2012.** *Desarrollo de los aspectos metodológicos para la implementación de un sistema integrado de gestión en la industria textil y confecciones*. Perú : Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012.

**PADILLA, Felipe, VARGAS, Carlos y COLPAS, Freddy. 2000.** *Degradación de cianuro en aguas residuales provenientes de la actividad minera del municipio de San Martín de Loba empleando método de oxidación química*. Colombia : Universidad de Cartagena, 2000.

**PEREA, Begoña. 2012.** *Estudio de tratabilidad de agua residual de industria textil a escala laboratorio*. España : Universidad de Cantabria, 2012.

**PEREZ, Wilber y LÓPEZ, Javier. 2017.** *Application of a Factorial design in the Rímac River Turbidity Removal by Coagulation and Flocculation using Tara Gum*. Perú : Universidad Peruana Unión, 2017.

**PINOS, Veronica. 2020.** *Procesos de Oxidación Avanzada.* Ecuador : Universidad de CUENCA, 2020.

**RAMOS, M., y otros. 2021.** *A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes.* s.l. : ELSEVIER, 2021.

**RODRÍGUEZ, Mayra y BARRERA, Carlos. 2020.** *Proceso de oxidación avanzada en el tratamiento de agua.* México : Universidad Autónoma del Estado de México, 2020.

**ROSALES, Ronel. 2017.** *Reducción del contenido de colorantes en efluentes de la industria textil usando el proceso fenton, Zarate, 2017.* Perú : Universidad César Vallejo, 2017.

**RUBIO, Ainhoa, CHICA, Edwim y PEÑUELA, Gustavo. 2014.** *Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico.* Colombia : Universidad de Antioquia de Colombia, 2014.

**SALAS, Guillermo. 2010.** *Tratamiento por oxidación avanzada reacción Fenton de aguas residuales de la industria textil.* Perú : Universidad Mayor de San Marcos, 2010.

**SANTANDER, Nancy y DELGADO, Daniel. 2017.** *Remoción de coloración de tintes de teñido en aguas residuales de la industria textil, utilizando Proceso de Oxidación avanzada (POA).* Perú : Universidad Nacional del Altiplano, 2017.

**SUPO, José. 2020.** *Metodología de la investigación científica.* Perú : SINCIE, 2020.

**TERÁN, Mery. 2016.** *Estudio de la aplicación de proceso de oxidación avanzada a aguas contaminadas.* España : Universidad Politécnica de Catalunya, 2016.

**URIBE, Carmen, y otros. 2020.** *Reúso en procesos de blanqueo textil de los efluentes provenientes de tinturas con colorantes reactivos negros decolorados mediante el método de fenton.* Perú : Revista de la Sociedad Química del Perú, 2020.

**ZHANG, Yiqing, y otros. 2021.** *Treatment of Textile Wastewater Using Advanced Oxidation Processes a critical review.* USA : Revista Water Switzerland, 2021.

## **ANEXOS**



## Anexo 1 Matriz de consistencia

### OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A NIVEL PILOTO

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	VALOR FINAL	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICA	METODOLOGÍA
<p><b>GENERAL:</b></p> <p>¿Cómo será la optimización del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?</p> <p><b>ESPECÍFICO:</b></p> <p>P.1. ¿Cuál será el pH del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?</p> <p>P.2. ¿Cuál será la masa de sulfato ferroso del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?</p> <p>P.3. ¿Cuál será el volumen del peróxido de hidrógeno del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?</p> <p>P.4. ¿Cuál será la masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil?</p>	<p><b>GENERAL:</b></p> <p>Evaluar la optimización del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p> <p><b>ESPECÍFICO:</b></p> <p>O.1. Determinar el pH del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p> <p>O.2. Determinar la masa de sulfato ferroso del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p> <p>O.3. Determinar el volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p> <p>O.4. Determinar la masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p>	<p><b>GENERAL:</b></p> <p>La optimización del proceso Fenton influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p> <p><b>ESPECÍFICO:</b></p> <p>H.1. El pH del proceso Fenton influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p> <p>H.2. La masa de sulfato ferroso del proceso Fenton influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p> <p>H.3. El volumen de peróxido de hidrógeno del proceso Fenton influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p> <p>H.4. La masa de metabisulfito de sodio del proceso Fenton influye positivamente en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil.</p>	Poceso Fenton	<p>El proceso Fenton, es un método que consiste en la adición de sales de hierro (<math>Fe^{2+}</math>) como un catalizador en presencia de <math>H_2O_2</math> para la producción de radicales <math>HO^\bullet</math>. Durante este proceso se forman los radicales <math>HO^\bullet</math> debido a la interacción entre el <math>Fe^{2+}</math> y <math>H_2O_2</math> en medio ácido entre los rangos pH 2.5 - 4. (Rodríguez y Barrera, 2020).</p>	<p>El proceso Fenton (VI) se evalúa tomando en cuenta la dimensión sus condiciones (D) ; de acuerdo con sus indicadores: pH, masa de sulfato ferroso, volumen peróxido de hidrógeno y masa de metabisulfito de sodio (I), a través de un pH metro, balanza analítica, micropipeta y balanza analítica (I).</p>	D.1 Condición del proceso	<p>pH</p> <p>Masa metabisulfito de sodio</p> <p>Masa sulfato ferroso</p> <p>Volumen peróxido de hidrógeno</p>	<p>2.5, 3.0</p> <p>1.0, 1.5 g</p> <p>1.0, 1.5 g</p> <p>1.0, 2.0 mL</p>	Método inductivo	<p>Obsrevación</p> <p>Obsrevación</p> <p>Obsrevación</p> <p>Obsrevación</p>	<p>pHetro</p> <p>Balanza analítica</p> <p>Balanza analítica</p> <p>Micropipeta</p>
			VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	VALOR FINAL	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICA	METODOLOGÍA
			Tratamiento de agu residuales	<p>Los tratamientos, son los procedimientos y/o procesos a los que se deben someter las aguas residuales para garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno. (Rodríguez y Barrera, 2020).</p>	<p>El tratamiento de agua residual (VD) se evalúa tomando en cuenta el parámetro fisicoquímico (D) ; de acuerdo con sus indicadores: demanda química de oxígeno (I), a través de un equipo digestor, turbidímetro y micropipeta (I).</p>	D.1. Parámetro fisicoquímico	Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	Método inductivo	Obsrevación	<p>Micropipeta</p> <p>Equipo digestor de DQO</p> <p>Colorímetro</p>

## Anexo 2 Matriz de operacionalización

### OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIAL TEXTIL A NIVEL PILOTO

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES (Objetivas)	INDICADORES	VALOR FINAL	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTOS
Proceso Fenton	El proceso Fenton, es un método que consiste en la adición de sales de hierro ( $Fe^{+2}$ ) como un catalizador en presencia de $H_2O_2$ para la producción de radicales $HO^\circ$ . Durante este proceso se forman los radicales $HO^\circ$ debido a la interacción entre el $Fe^{+2}$ y $H_2O_2$ en medio ácido entre los rangos pH 2.5 - 4. (Rodríguez y Barrera, 2020).	El proceso Fenton (VI) se evalúa tomando en cuenta la dimensión sus condiciones (D); de acuerdo con sus indicadores: pH, masa de sulfato ferroso, volumen peróxido de hidrógeno y masa de metabisulfito de sodio (I), a través de un pH metro, balanza analítica, micropipeta y balanza analítica (I).	D.1. Condición del proceso	pH	2.5, 3.0	Método inductivo.	Observación	pH metro
				Masa metabisulfito de sodio	1.0, 1.5 g		Observación	Balanza analítica
				Masa sulfato ferroso	1.0, 1.5 g		Observación	Balanza analítica
				Volumen peróxido de hidrógeno	1.0, 2.0 mL		Observación	Micropipeta
VARIABLES DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES (Objetivas)	INDICADORES	VALOR FINAL	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTOS
Tratamiento de aguas residuales	Los tratamientos, son los procedimientos y/o procesos a los que se deben someter las aguas residuales para garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno. (Rodríguez y Barrera, 2020).	El tratamiento de agua residual (VD) se evalúa tomando en cuenta el parámetro fisicoquímico (D); de acuerdo con sus indicadores: demanda química de oxígeno (I), a través de un equipo digestor, turbidímetro y micropipeta (I).	D.1. Parámetro fisicoquímico	Demanda química de oxígeno (DQO)	< 1000 mg/L	Método inductivo.	Observación	Micropipeta Equipo digestor de DQO Colorímetro



**Anexo 4 Base de datos de la caracterización de la muestra**

BASE DE DATOS DEL LABORATORIO N° 0001														
LABORATORIO DE _____														
<b>PROYECTO</b>		: Optimización del proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil a nivel piloto												
<b>UBICACIÓN Y/O LUGAR</b>		: Tecsup N° 1 - Sede centro												
<b>TIPO DE MUESTRA</b>		: Agua residual industrial												
<b>FECHA DE ENSAYO</b>		: -												
<b>RESPONSABLE</b>		: Yorsel Mayhua / Juan Malpica												
CARACTERIZACIÓN DE MUESTRA INICIAL								CARACTERIZACIÓN DE MUESTRA FINAL						
Muestra	Volumen inicial (mL)	Turbidez (NTU)	pH	T° (°C)	SST (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Muestra	Turbidez (NTU)	pH	SST (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Volumen final (mL)
<b>M-01</b>	9000	155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>M-01</b>	0.83	7.89	42.50	890	220	700
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>M-02</b>	0.99	7.79	59.50	815	180	730
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>M-03</b>	0.95	7.80	48.40	540	152	750
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>M-04</b>	0.89	7.85	60.10	549	158	750
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>M-05</b>	0.95	7.81	49.90	915	222	740
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>M-06</b>	1.05	7.89	59.50	750	182	700
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>M-07</b>	0.99	7.70	52.90	590	160	710
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>M-08</b>	0.92	7.85	49.80	635	169	715
<b>M-02</b>	9000	160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>M-09</b>	0.87	7.80	45.60	670	159	720
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>M-10</b>	0.89	7.90	50.90	710	174	710
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>M-11</b>	0.92	7.70	59.10	353	148	700
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>M-12</b>	0.89	7.82	60.00	463	152	750
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>M-13</b>	0.96	7.81	48.20	624	164	740
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>M-14</b>	0.98	7.87	47.90	695	161	710
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>M-15</b>	1.06	7.85	59.90	495	158	720
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>M-16</b>	0.88	7.79	55.60	540	154	740

**BASE DE DATOS DEL LABORATORIO N° 0002**

**LABORATORIO DE \_\_\_\_\_**

**PROYECTO** : Optimización del proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil a nivel piloto  
**UBICACIÓN Y/O LUGAR** : Tecsup N° 1 - Sede centro  
**TIPO DE MUESTRA** : Agua residual industrial  
**FECHA DE ENSAYO** : -  
**RESPONSABLE** : Yorsel Mayhua / Juan Malpica

CARACTERIZACIÓN DE MUESTRA INICIAL								CARACTERIZACIÓN DE MUESTRA FINAL						
Muestra	Volumen inicial (mL)	Turbidez (NTU)	pH	T° (°C)	SST (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Muestra	Turbidez (NTU)	pH	SST (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Volumen final (mL)
<b>M-01</b>	9000	155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>R M-01</b>	0.93	7.80	57.30	720	169	700
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>R M-02</b>	0.98	7.78	52.90	835	182	750
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>R M-03</b>	0.96	7.70	60.00	525	160	730
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>R M-04</b>	1.05	7.82	59.70	555	172	710
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>R M-05</b>	1.03	7.80	48.90	890	183	750
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>R M-06</b>	0.99	7.83	49.10	820	190	740
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>R M-07</b>	0.88	7.79	47.30	593	165	760
		155.40	10.61	32.5	546.50	2180	1010	<b>R M-08</b>	0.87	7.75	59.40	629	169	700
<b>M-02</b>	9000	160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>R M-09</b>	0.84	7.85	55.80	620	173	740
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>R M-10</b>	0.89	7.92	54.70	690	179	710
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>R M-11</b>	1.06	7.81	59.90	395	152	710
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>R M-12</b>	0.95	7.89	57.30	510	164	720
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>R M-13</b>	0.97	7.83	52.80	655	172	750
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>R M-14</b>	0.89	7.92	49.70	705	182	740
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>R M-15</b>	0.91	7.99	47.90	515	170	750
		160.20	10.52	33.4	575.90	2020	1100	<b>R M-16</b>	0.98	7.82	52.80	551	163	740

**Anexo 5 Base de datos de las pruebas experimentales aplicando el proceso Fenton**

BASE DE DATOS DEL LABORATORIO N° 0001																
PROYECTO		Optimización del proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil a nivel piloto														
UBICACIÓN Y/O LUGAR		Tecsup N° 1- Sede centro														
TIPO DE MUESTRA		Agua Residual Industrial														
FECHA DE ENSAYO																
RESPONSABLE		Yorsel Mayhua / Juan Malpica														
PROCESO FENTON																
Muestra	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g)	Tiempo (min)*	FeSO <sub>4</sub> (g)	Tiempo (min)*	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL)**	Tiempo (min)*	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL)***	Tiempo (min)*	pH	NaOH (mL)**	pH	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mL)	Magnafloc (mL)	Tiempo (min)****	pH
	FENTON									FLOCULACIÓN Y COAGULACIÓN						FINAL
M-01	2.50	1.0	10	1.0	10	0.5	30	0.5	30	3.01	6.40	8.92	1	1	60	7.89
R-01	2.50	1.0	10	1.0	10	0.5	30	0.5	30	2.50	6.30	8.80	1	1	60	7.80
M-02	2.49	1.0	10	1.5	10	0.5	30	0.5	30	3.01	6.40	8.90	1	1	60	7.79
R-02	2.50	1.0	10	1.5	10	0.5	30	0.5	30	2.95	6.30	8.89	1	1	60	7.79
M-03	2.50	1.0	10	1.0	10	1.0	30	1.0	30	2.52	6.40	8.85	1	1	60	7.80
R-03	2.52	1.0	10	1.0	10	1.0	30	1.0	30	2.64	6.40	8.90	1	1	60	7.70
M-04	2.51	1.0	10	1.5	10	1.0	30	1.0	30	2.64	6.30	9.01	1	1	60	7.85
R-04	2.50	1.0	10	1.5	10	1.0	30	1.0	30	2.60	6.50	8.99	1	1	60	7.82
M-05	2.51	1.5	10	1.0	10	0.5	30	0.5	30	3.05	6.20	8.85	1	1	60	7.81
R-05	2.51	1.5	10	1.0	10	0.5	30	0.5	30	3.01	6.30	8.89	1	1	60	7.80
M-06	2.50	1.5	10	1.5	10	0.5	30	0.5	30	2.90	6.40	9.00	1	1	60	7.89
R-06	2.50	1.5	10	1.5	10	0.5	30	0.5	30	2.59	6.50	9.01	1	1	60	7.80
M-07	2.50	1.5	10	1.0	10	1.0	30	1.0	30	3.00	6.30	9.15	1	1	60	7.70
R-07	2.49	1.5	10	1.0	10	1.0	30	1.0	30	3.01	6.40	9.01	1	1	60	7.83
M-08	2.49	1.5	10	1.5	10	1.0	30	1.0	30	2.58	6.00	8.90	1	1	60	7.85
R-08	2.50	1.5	10	1.5	10	1.0	30	1.0	30	2.79	6.50	8.99	1	1	60	7.79

**BASE DE DATOS DEL LABORATORIO N° 0002**

**PROYECTO** : Optimización del proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil a nivel piloto  
**UBICACIÓN Y/O LUGAR** : Tecsup N° 1- Sede centro  
**TIPO DE MUESTRA** : Agua Residual Industrial  
**FECHA DE ENSAYO** :  
**RESPONSABLE** : Yorsel Mayhua / Juan Malpica

**PROCESO FENTON**

Muestra	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g)	Tiempo (min)*	FeSO <sub>4</sub> (g)	Tiempo (min)*	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL)**	Tiempo (min)*	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL)***	Tiempo (min)*	pH	NaOH (mL)**	pH	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mL)	Magnafloc (mL)	Tiempo (min)****	pH
FENTON										FLOCULACIÓN Y COAGULACIÓN						FINAL
<b>M-09</b>	3.01	1.0	10	1.0	10	0.5	30	0.5	30	2.95	6.20	9.01	1	1	60	7.80
<b>R-09</b>	3.02	1.0	10	1.0	10	0.5	30	0.5	30	3.00	6.40	8.89	1	1	60	7.75
<b>M-10</b>	3.00	1.0	10	1.5	10	0.5	30	0.5	30	3.01	6.40	8.95	1	1	60	7.90
<b>R-10</b>	3.00	1.0	10	1.5	10	0.5	30	0.5	30	2.99	6.10	9.01	1	1	60	7.85
<b>M-11</b>	3.01	1.0	10	1.0	10	1.0	30	1.0	30	2.89	6.30	8.95	1	1	60	7.70
<b>R-11</b>	3.00	1.0	10	1.0	10	1.0	30	1.0	30	2.90	6.30	8.88	1	1	60	7.85
<b>M-12</b>	3.02	1.0	10	1.5	10	1.0	30	1.0	30	3.01	6.40	9.01	1	1	60	7.82
<b>R-12</b>	3.02	1.0	10	1.5	10	1.0	30	1.0	30	2.73	6.20	8.89	1	1	60	7.81
<b>M-13</b>	3.01	1.5	10	1.0	10	0.5	30	0.5	30	2.89	6.50	8.90	1	1	60	7.80
<b>R-13</b>	3.00	1.5	10	1.0	10	0.5	30	0.5	30	2.79	6.00	8.92	1	1	60	7.89
<b>M-14</b>	3.01	1.5	10	1.5	10	0.5	30	0.5	30	2.94	6.50	9.01	1	1	60	7.80
<b>R-14</b>	3.00	1.5	10	1.5	10	0.5	30	0.5	30	2.91	6.30	8.96	1	1	60	7.89
<b>M-15</b>	3.02	1.5	10	1.0	10	1.0	30	1.0	30	2.99	6.20	8.99	1	1	60	7.85
<b>R-15</b>	3.00	1.5	10	1.0	10	1.0	30	1.0	30	3.01	6.40	8.79	1	1	60	7.76
<b>M-16</b>	3.02	1.5	10	1.5	10	1.0	30	1.0	30	3.02	6.40	9.01	1	1	60	7.79
<b>R-16</b>	3.02	1.5	10	1.5	10	1.0	30	1.0	30	2.99	6.50	8.99	1	1	60	7.82

**Anexo 6 Consentimiento de uso de los Laboratorio de Tecsup N° 1 para pruebas experimentales**



**INSTITUTO DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN PERÚ  
TECSUP N° 1  
Av. Cascanueces 2221 Santa Anita – Lima**

**CONSTANCIA**

**EL JEFE DEL DEPARTAMENTO DE MINERÍA Y PROCESOS QUÍMICO - METALURGICO DEL INSTITUTO TECSUP N° 1 SEDE LIMA, QUE SUSCRIBE:**

**HACE CONSTAR:**

Que doña **YORSEL SOLEDAD MAYHUA SOTO**, con DNI N° 42780196, realizó pruebas experimentales como Docente en nuestro ambiente de Laboratorio Químico del Instituto TECSUP N° 1 sede Lima, para utilizarlos como tratamiento de datos en su trabajo de investigación titulado: "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A NIVEL PILOTO", para obtener el grado de Magister en Gestión Ambiental para el desarrollo sostenible en la Universidad Nacional del Callao.

Se expide la presente solicitud de la interesada, para los fines que estime conveniente.

Sata Anita, 26 de junio del 2023

Jorge Victor Castillo Migone

Jefe de Minería y Procesos Químicos-Metalúrgicos



## Anexo 7 Certificados de calibraciones

### Balanza analítica digital



**RELES**  
EQUIPOS DE LABORATORIO

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° 10-011



**INACAL**  
DA - Perú  
Laboratorio de Calibración  
Acreditado

Registro N° LC - 010

### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN LCM-A-090-2022

CON VALOR OFICIAL  
SEGÚN CÉDULA DE NOTIFICACIÓN N° 124-2021-INACAL/DA

N° de Exp. : 220945  
PÁGINA: 1 de 4  
Fecha de Emisión:  
2022-04-11

- 1.- **CLIENTE** : TECSUP N° 1
- 2.- **DIRECCIÓN** : Av. Cascanueces N° 2221 - Santa Anita
- 3.- **PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN** : INDECOPI - SNM PC-011 (4ª Edición Abril 2010) ,  
*Procedimiento de Calibración de Balanzas de Funcionamiento No Automático Clase I y Clase II .*
- 4.- **MÉTODO DE CALIBRACIÓN** : Comparación de las indicaciones de la balanza contra cargas aplicadas de valor conocido (pesas patrón).
- 5.- **PATRONES DE REFERENCIA Y TRABAJO** (VIM3 5.6 y 5.7)
 

Trazabilidad metrología (VIM3 2.41)	Nombre del patrón	Código del patrón	Certificado de Calibración
DM INACAL - PERÚ	Juego de Pesas 1 mg a 200 g	MM 001/2	PE21-C-1582
DM INACAL - PERÚ	Pesa de 100 g	MM 001/2	PE22A-C-0073

Las pesas patrón utilizadas durante la calibración de la balanza, tienen asegurada su trazabilidad metrología a los patrones de la Dirección de Metrología del INACAL (DM INACAL).
- 6.- **INSTRUMENTO CALIBRADO** :
 

(*) BALANZA			
Marca	: METTLER TOLEDO	Capacidad Máxima (Max)	: 220 g
Modelo	: AB265-S	Resolución (d)	: 0,01 mg / 0,1 mg
Serie	: 1125453666	División de Verificación (e)	: 1 mg / 1 mg (**)
Código	: BAL-04	Clase de Exactitud	: I (***)
- 7.- **CONDICIONES DE REFERENCIA** (VIM3 4.11) :
 

**Lugar de Calibración** :

Laboratorio de Química  
Tecsups N° 1

**Condiciones ambientales durante la calibración** :

	Inicio	Final
Temperatura Ambiental	28,8 °C	29,1 °C
Humedad Relativa	49,7 %	49,2 %
- 8.- **FECHA DE CALIBRACIÓN** :  
2022-04-01



JEFE DEL LABORATORIO DE CALIBRACIÓN	RESPONSABLE DE DIVISION
 <small>EDITH AGUIRRE CASTILLA CALLE #GENERO 10803 Reg. C.P.N. 141875</small>	 Martín Cuenca Mallma

Jr. Pomabamba N° 774 - Breña Telf: 4246152 / 3301720 / 6523200 Fax: 6523213 (102) Ventas : Anexo (101)  
metrologia@reles.com.pe ventas@reles.com.pe www.reles.com.pe

*Nota.* En la Institución Tecsups N° 1, el mantenimiento y calibración de las balanzas analíticas digitales se realiza de manera anual.

## Reactor digital para medir DQO

<b>OMEGA PERU S.A.</b>	<b>CONSTANCIA N° 9935-OP-2022</b>
<b>ÁREA DE METROLOGÍA</b>	
<b>CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN</b>	
<b>Solicitante</b>	: TECSUP N°1
<b>Dirección</b>	: Av. Cascanueces 2221 - Santa Anita
<b>Equipo</b>	: REACTOR DIGITAL
<b>Alcance</b>	: 37 °C a 165°C
<b>Marca</b>	: HACH CO.
<b>Modelo</b>	: DRB 200
<b>Número de serie</b>	: 11080C0093
<b>Procedencia</b>	: USA
<b>Instrumentos de Medición</b>	: TERMOMETRO DE INDICACIÓN DIGITAL (*)
<b>Alcance</b>	: NO INDICA
<b>Resolución</b>	: 0.1 °C
<b>Selector</b>	: CONTROLADOR DIGITAL (*)
<b>Alcance</b>	: 37 °C a 165 °C
<b>Resolución</b>	: 0.1 °C
<b>Fecha de Verificación</b>	: 11/03/2022
<b>Condiciones Ambientales</b>	
Temperatura	26.4 °C
Humedad Relativa	69 %
Presión Atmosférica	1001 mbar
<b>Patrones de Referencia</b>	
Los resultados obtenidos tienen trazabilidad a los patrones Nacionales del SNM-INDECOPI	
Equipo	Certificado de Calibración
Termómetro digital Marca Cole Parmer Serie: H01005881 con diez termopares con Certificado de Calibración.	LT - 0123 - 2021
<b>Método de Verificación</b>	
Determinación de la temperatura en distintos puntos del interior del medio termostático, tomando como referencia el PC - 018 "Procedimiento para la Calibración o Caracterización de Medios Isotermos con aire como medio Termóstático". SNM-INDECOPI	
Fecha de Emisión 11/03/2022	
	 <b>Ing. FÉLIX CAMARENA F.</b> CIP. 88393 Jefe de Servicio Técnico OMEGA PERU S.A.
Prohibida su reproducción total o parcial de este documento Av. Oscar R. Benavides N° 1593 Int. A Urb. Chacra Rios Norte Lima / Telfs.: 336-6523 • 657-6206 • 657-6207 e-mail: metrologia@omegaperu.com.pe	

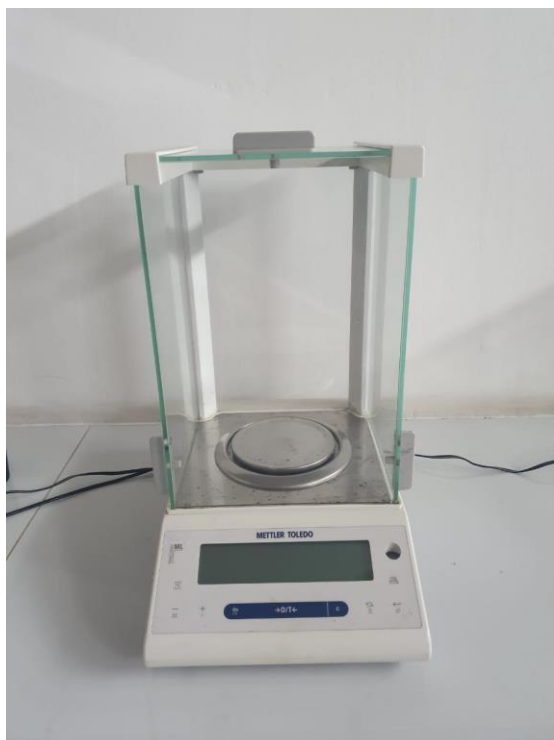
Nota. En la Institución Tecsup N° 1, el mantenimiento y calibración de los equipos se realiza de manera anual.

## Anexo 8 Panel fotográfico



**Fotografía 1.**  
*Reactor Digital para analizar DQO*

Nota. Reactor digital, Marca: HACH CO, Modelo: DRB 200, Serie: 11080C0093.



**Fotografía 2.**  
*Balanza analítica digital*

Nota. Balanza analítica digital, Marca: METTLER TOLEDO, Modelo: AB265-S, Serie: 1125453666.

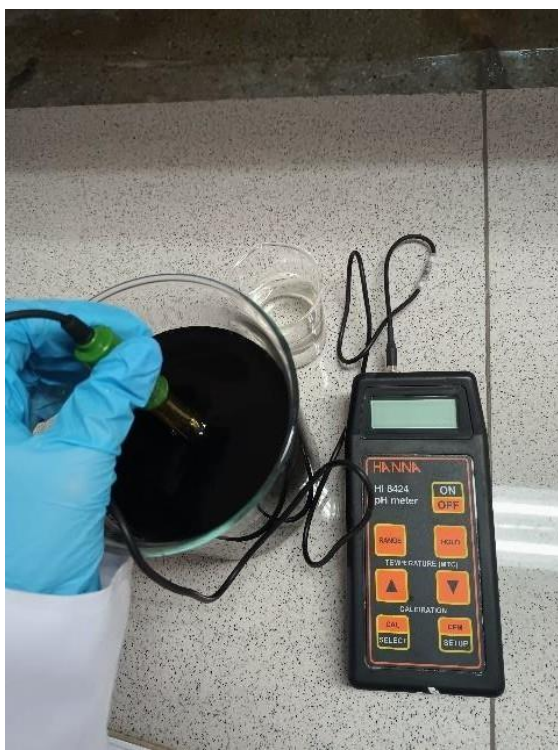


**Fotografía 3.**  
*Equipo digital para medir pH*

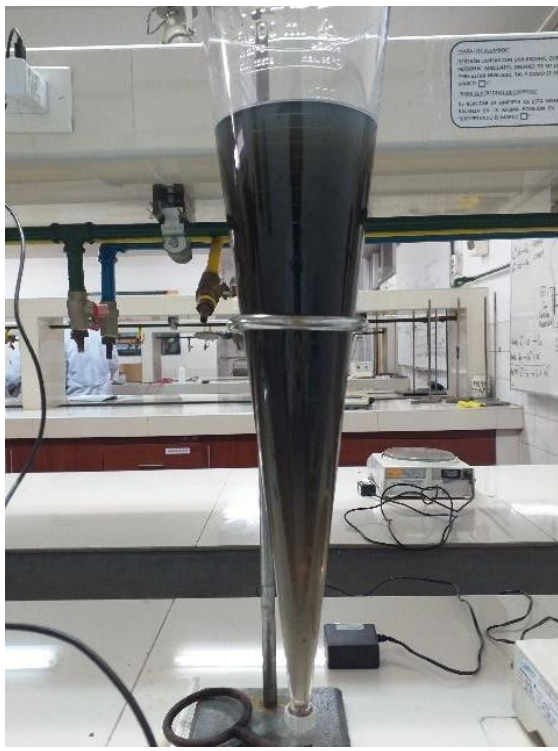
*Nota.* Para la calibración del equipo se observa al costado del equipo el manual de calibración, y esto se realiza cada vez que se van a realizar medidas de pH con los buffer 4.01, 7.01 y 10.01 de acuerdo al manual.



**Fotografía 4.**  
*Equipo digital para medir turbidez*



**Fotografía 5.**  
*Medición de pH, caracterización inicial de muestras.*



**Fotografía 6.**  
*Ensayo de solidos totales suspendidos, caracterización inicial de muestra.*



**Fotografía 7.**  
*Equipo para la determinación de BDO<sub>5</sub>.*



**Fotografía 8.**  
*Mediciones de parámetros para su caracterización inicial y ajuste del pH inicial (2.5 – 3.0).*



**Fotografía 9.**

*Acondicionamiento para la Agitación de las muestras en el test de jarras para empezar el tratamiento Fenton y agregar los reactivos correspondientes de acuerdo a la secuencia:  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  (g),  $\text{FeSO}_4$  (g) y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (mL).*



**Fotografía 10.**

*Medición final del pH en las muestras de aguas residuales luego de haber terminado el proceso Fenton.*



**Fotografía 11.**

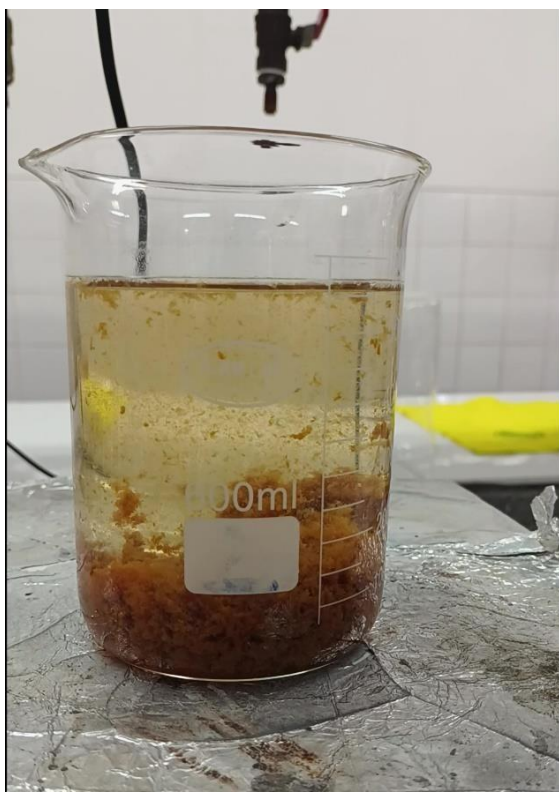
*Ajuste final del pH a (8.5-9.5) de las muestras de aguas residuales luego de haber terminado el proceso Fenton.*



**Fotografía 12.**

*Proceso de coagulación, agregando el coagulante  $Al_2(SO_4)_3$ .*

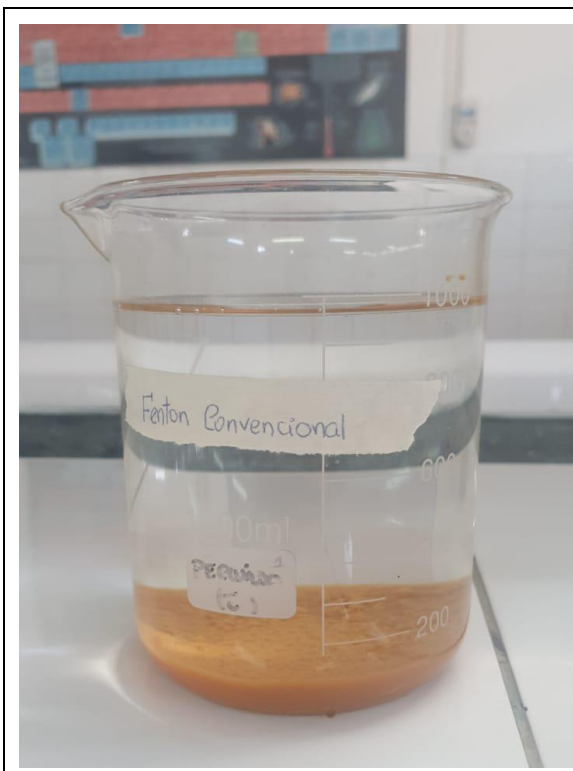




**Fotografía 13.**  
*Proceso de floculación, agregando el floculante Magnafloc.*



**Fotografía 14.**  
*Agitación ligera para sedimentar los flocúlos.*



**Fotografía 15.**  
*Finalización del proceso Fenton, obtención del agua clarificada.*