

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Evaluación del proceso foto fenton con agente
quelante para el tratamiento de aguas residuales
textiles en el distrito de Hualhuas, Junín 2022**

Andy David Ayala Alvino
Roy Lalo Perez Lazo

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Lima, 2022

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

EVALUACIÓN DEL PROCESO FOTO FENTON CON AGENTE QUELANTE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES EN EL DISTRITO DE HUALHUAS, JUNIN 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

26%

INDICE DE SIMILITUD

24%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

12%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	3%
3	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	3%
4	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	2%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
6	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
8	www.minem.gob.pe Fuente de Internet	1%

9	repositorio.upads.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
11	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.upct.es Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to University of La Guajira Trabajo del estudiante	<1 %
14	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	www.aulavirtualusmp.pe Fuente de Internet	<1 %
19	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
20	hmong.es Fuente de Internet	<1 %

21	repositorio.udec.cl Fuente de Internet	<1 %
22	1library.co Fuente de Internet	<1 %
23	kupdf.net Fuente de Internet	<1 %
24	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
25	www.solarpedia.info Fuente de Internet	<1 %
26	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	Submitted to unsaac Trabajo del estudiante	<1 %
28	dx.doi.org Fuente de Internet	<1 %
29	scielo.senescyt.gob.ec Fuente de Internet	<1 %
30	zaguan.unizar.es Fuente de Internet	<1 %
31	ri.uaemex.mx Fuente de Internet	<1 %
32	Submitted to American Public University System	<1 %

33	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
34	repositoriodigital.uns.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
35	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.utp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	repositorio.ual.es Fuente de Internet	<1 %
38	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
39	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
40	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
41	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
42	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
43	Edgar Marcelino Pérez. "Proceso foto-Fenton como una alternativa en la degradación de microplásticos de poliamida presentes en	<1 %

aguas residuales textiles", Universitat Politecnica de Valencia, 2022

Publicación

44 pt.scribd.com <1 %
Fuente de Internet

45 revistas.sqperu.org.pe <1 %
Fuente de Internet

46 es.scribd.com <1 %
Fuente de Internet

47 mediambient.gencat.net <1 %
Fuente de Internet

48 www.slideshare.net <1 %
Fuente de Internet

49 Submitted to The Scientific & Technological
Research Council of Turkey (TUBITAK) <1 %
Trabajo del estudiante

50 repositorio.unsa.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

51 Submitted to Universidad Autónoma de
Nuevo León <1 %
Trabajo del estudiante

52 burjcdigital.urjc.es <1 %
Fuente de Internet

53 moam.info <1 %
Fuente de Internet

54	portal-academico.upads.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
55	repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet	<1 %
56	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
57	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
58	repositorio.unj.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
59	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	<1 %
60	Amal Mejri, Paula Soriano-Molina, Sara Miralles-Cuevas, José Antonio Sánchez Pérez. "Fe ³⁺ -NTA as iron source for solar photo-Fenton at neutral pH in raceway pond reactors", Science of The Total Environment, 2020 Publicación	<1 %
61	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1 %
62	inis.iaea.org Fuente de Internet	<1 %

63

portales.reniec.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

64

Edwin Hualpa-Cutipa, Richard Andi Solórzano Acosta, Sheena Sangay-Tucto, Xiomara Gisela Mendoza Beingolea et al. "Recent trends for treatment of environmental contaminants in wastewater: An integrated valorization of industrial wastewater", Elsevier BV, 2022

Publicación

<1 %

65

Submitted to Engineers Australia

Trabajo del estudiante

<1 %

66

dspace.esPOCH.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

67

www.owasa.org

Fuente de Internet

<1 %

68

cybertesis.uni.pe

Fuente de Internet

<1 %

69

www.jove.com

Fuente de Internet

<1 %

70

Submitted to Escuela Politecnica Nacional

Trabajo del estudiante

<1 %

71

Revista Actualidades Biológicas. "IX Seminario Colombiano de Limnología 2012, Medellín - Colombia", Actualidades Biológicas, 2012

Publicación

<1 %

72	repositorio-aberto.up.pt Fuente de Internet	<1 %
73	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
74	repositorio.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
75	upcommons.upc.edu Fuente de Internet	<1 %
76	www2.ual.es Fuente de Internet	<1 %
77	LEONARDO ANDRES SIERRA VARELA. "EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA SOSTENIBILIDAD SOCIAL PARA EL DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURAS.", Universitat Politecnica de Valencia, 2017 Publicación	<1 %
78	Nirmalendu Mishra, Rajesh Reddy, Aneek Kuila, Ankita Rani, Ahmad Nawaz, Saravanan Pichiah. "A Review on Advanced Oxidation Processes for Effective Water Treatment", Current World Environment, 2017 Publicación	<1 %
79	Raquel Garzón Lloría. "Análisis estructural de los productos derivados de cereales y su aplicación en la optimización de procesos y	<1 %

productos", Universitat Politecnica de Valencia, 2021

Publicación

80	archivo.alde.es Fuente de Internet	<1 %
81	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
82	depurtotal.es Fuente de Internet	<1 %
83	digibug.ugr.es Fuente de Internet	<1 %
84	portal.amelica.org Fuente de Internet	<1 %
85	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
86	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
87	www.uam.es Fuente de Internet	<1 %
88	www.yumpu.com Fuente de Internet	<1 %
89	ANA CAROLINA LÓPEZ DE DICASTILLO BERGAMO. "DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE POLÍMEROS ACTIVOS HIDROFÍLICOS PARA EL ENVASADO DE	<1 %

ALIMENTOS", Universitat Politecnica de Valencia, 2011

Publicación

90	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo Trabajo del estudiante	<1 %
91	bolsa-trabajo.upads.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
92	doczz.net Fuente de Internet	<1 %
93	eprints.ucm.es Fuente de Internet	<1 %
94	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
95	futur.upc.edu Fuente de Internet	<1 %
96	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
97	patents.google.com Fuente de Internet	<1 %
98	portaldeinformacao.utfpr.edu.br Fuente de Internet	<1 %
99	repositorio.cinvestav.mx Fuente de Internet	<1 %
100	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

101	repositorio.ugto.mx Fuente de Internet	<1 %
102	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
103	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
104	revistas.untrm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
105	weblogs.madrimasd.org Fuente de Internet	<1 %
106	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %
107	www.aqualex.org Fuente de Internet	<1 %
108	www.arlsura.com Fuente de Internet	<1 %
109	www.coddiq.es Fuente de Internet	<1 %
110	www.yara.com.gt Fuente de Internet	<1 %
111	Fausto Peñafiel Villarreal. "Revalorización de lodos resultantes del pasivado de aluminio por oxidación anódica mediante su utilización	<1 %

en la síntesis de zeolitas NaP1 y LTA",
Universitat Politecnica de Valencia, 2022

Publicación

112 dspace.ucuenca.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

113 eprints.uanl.mx <1 %
Fuente de Internet

114 Gina Terán, Paola Posligua, Carlos Banchón.
"Dosificación mínima del reactivo Fenton para
la remediación de agua contaminada con
colorantes", Enfoque UTE, 2015 <1 %
Publicación

115 Petrick A. Soares, Renata Souza, Juan Soler,
Tânia F.C.V. Silva et al. "Remediation of a
synthetic textile wastewater from polyester-
cotton dyeing combining biological and
photochemical oxidation processes",
Separation and Purification Technology, 2017 <1 %
Publicación

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Activo

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Continental,
por ser parte de nuestra formación académica y darnos las facilidades para
desarrollar nuestra tesis.

A nuestro asesor, Mg. Edwin Natividad Gabriel Campos,
por su constante apoyo, en cada parte de nuestra tesis, compartiendo sus
conocimientos.

A nuestros amigos,
por su entusiasmo y sus buenos deseos.

Los autores

DEDICATORIA

A Dios,
a mis padres, Charo y David,
a mis hermanos
y a mi novia, Rosario,
por creer en mí y haberme ayudado a superarme como persona y
profesional, estando conmigo en todo momento.

David

A Dios
y a mis padres.

Roy

ÍNDICE

ASESOR	1
AGRADECIMIENTOS	2
DEDICATORIA	3
ÍNDICE	4
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I	12
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	12
1.1. Planteamiento y formulación del problema	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo general	13
1.2.2. Objetivos específicos	13
1.3. Justificación e importancia	14
1.3.1. Justificación teórica	14
1.3.2. Justificación metodológica	14
1.3.3. Justificación práctica	15
1.3.4. Importancia	15
1.4. Hipótesis y descripción de variables	16
1.4.1. Hipótesis general	16
CAPÍTULO II	18
MARCO TEÓRICO	18
2.1. Antecedentes del problema	18
2.1.1. Antecedentes internacionales	18
2.1.2. Antecedentes nacionales	22
2.2. Bases teóricas	25
2.2.1. Contaminación de las aguas y la industria textil	25
2.2.2. Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales	32
2.2.3. Proceso de oxidación avanzada	36
2.2.4. Marco normativo	47
2.3. Definición de términos básicos	49
CAPÍTULO III	51
METODOLOGÍA	51
3.1. Método y alcance de la investigación	51

3.1.1.	Método de la investigación.....	51
3.1.2.	Alcance de la investigación.....	51
3.2.	Diseño de la investigación.....	51
3.3.	Población y muestra.....	53
3.3.1.	Población.....	53
3.3.2.	Muestra.....	53
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	54
3.4.1.	Técnicas de recolección de datos.....	54
3.4.2.	Materiales.....	54
3.4.3.	Reactivos.....	54
3.4.4.	Equipos e instrumentos.....	55
3.4.5.	Procedimiento.....	55
a.	Muestreo.....	55
b.	Determinación de la dosis del agente quelante y H ₂ O ₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton.....	58
CAPÍTULO IV.....		62
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		62
4.1	Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	62
4.1.1.	Determinación de la dosis del agente quelante y de H ₂ O ₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton.....	62
a.	Caracterización de las aguas residuales textiles.....	62
b.	Medidas estadísticas descriptivas de las variables.....	62
c.	Color de las aguas residuales textiles después del tratamiento por el proceso foto Fenton.....	63
4.1.2.	Análisis de los efectos del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales por el proceso foto Fenton.....	64
4.1.3.	Evaluación de la eficiencia del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles.....	65
a.	Determinación de la dosis de agente quelante y dosis de H ₂ O ₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton.....	66
4.1.4.	Determinación de la factibilidad del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.....	68
4.2	Prueba de hipótesis.....	68
4.3	Discusión de resultados.....	69
CONCLUSIONES.....		73
RECOMENDACIONES.....		74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		75
ANEXOS.....		83

ANEXO A. Certificado de los análisis de laboratorio	84
ANEXO B. Panel fotográfico	86
ANEXO C. Matriz de consistencia	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Operaciones en la industria textil y contaminantes generados.....	27
Figura 2. Clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales.....	34
Figura 3. Métodos utilizados en la remoción de colorantes del agua.	36
Figura 4. Diagrama esquemático que explica los procesos involucrados en los POA.	37
Figura 5. Diferentes categorías de procesos de oxidación avanzada (POA) utilizados para el tratamiento de aguas residuales complejas.....	38
Figura 6. Aplicación de los POA en el tratamiento de aguas.	39
Figura 7. Combinaciones de tratamientos en el diseño 3^2	52
Figura 8. Tratamiento de las aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton.....	53
Figura 9. Lugar de venta de los productos de la empresa textil.....	56
Figura 10. Proceso de teñido de lana de oveja.....	57
Figura 11. Medición de parámetros físicos de las muestras de las aguas residuales textiles ...	58
Figura 12. Diagrama del proceso del experimento	60
Figura 13. Desarrollo de los experimentos	61
Figura 14. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	64
Figura 15. Gráfica de efectos principales para el porcentaje de decoloración	65
Figura 16. Gráfica de contorno del porcentaje de decoloración vs dosis de agente quelante y dosis de H_2O_2	67
Figura 17. Gráfica de superficie del porcentaje de decoloración vs dosis de agente quelante y dosis de H_2O_2	67
Figura 18. Valores óptimos de la dosis de agente quelante y dosis de H_2O_2 en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables	17
Tabla 2. Característica de las aguas residuales textiles	28
Tabla 3. Valores reales de las variables independientes con sus niveles codificados	52
Tabla 4. Caracterización de las aguas residuales textiles	62
Tabla 5. Estadísticos descriptivos del tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton	63
Tabla 6. Color en función a dosis del agente quelante y de H ₂ O ₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton	64
Tabla 7. Resumen del modelo	66
Tabla 8. Decoloración en función a dosis del agente quelante y de H ₂ O ₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton.....	66
Tabla 9. Análisis de varianza.....	69

RESUMEN

En la investigación, se determinó la factibilidad del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín. Para ello, se determinaron y analizaron los efectos de la dosis del agente quelante y de H_2O_2 y se evaluó la eficiencia del proceso. Se utilizó el diseño factorial de bloques aleatorizados 3^2 y, en cada experimento, se utilizó 1 L de las aguas residuales textiles del teñido de lana de oveja de color azul, en agitación, se agregó EDTA (1,125; 1,350 o 1,575 mM) y $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (0,9 mM de Fe^{3+}), se fijó el pH en 7 y se añadió peróxido de hidrógeno (500, 750 o 1000 ppm). Después de una hora, se muestreó 40 ml para la determinación del color. De los resultados, la dosis del agente quelante y de H_2O_2 es 1,575 mM (relación molar de 1,75:1) y 1000 ppm, respectivamente, a esas condiciones se logró una decoloración de 76,84 %; mientras que los valores óptimos estimados por el método de superficie son 1,575 mM y 818,18 ppm, respectivamente. La dosis del agente quelante influye directamente en el porcentaje de decoloración y el efecto de la dosis de H_2O_2 es cuadrático. La dosis de agente quelante presenta un efecto mayor que la dosis de H_2O_2 . Se concluye que es factible aplicar el proceso foto Fenton con agente quelante, pero para un menor color a 247,50 PCU del efluente del tratamiento, evaluar mayores dosis del quelante u otro quelante.

PALABRAS CLAVE: Aguas residuales textiles, foto Fenton, agente quelante.

ABSTRACT

The feasibility of the foto Fenton process with chelating agent in the treatment of textile wastewater in the district of Hualhuas, Junín will be reduced in the investigation. For which the effects of the dose of the chelating agent and of H_2O_2 were anticipated and analyzed and the efficiency of the process was evaluated. A 3^2 randomized block factorial design was obtained and in each experiment 1 L of the textile wastewater from the dyeing of blue sheep wool was obtained, in swelling, EDTA (1,125; 1,350 or 1,575 mM) and $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ were added (0,9 mM Fe^{3+}), the pH was set at 7 and hydrogen peroxide (500, 750 or 1000 ppm) was added; after 1 h, 40 mL was sampled for color determination. From the results, the dose of the chelating agent and H_2O_2 is 1,575 mM (1,75:1 molar ratio) and 1000 ppm, respectively, at those conditions a discoloration of 76,84% is improved; while the optimal values estimated by the surface method are 1,575 mM and 818,18 ppm, respectively. The dose of the chelating agent directly influences the percentage of discoloration and the effect of the dose of H_2O_2 is quadratic; the dose of chelating agent has a greater effect than the dose of H_2O_2 . It is concluded that it is feasible to apply the Fenton photo process with a chelating agent, but for a lower color of 247,50 PCU of the treatment effluent, evaluate higher doses of the chelating agent or another chelating agent.

KEYWORDS: Textile wastewater, photo Fenton, chelating agent.

INTRODUCCIÓN

El hombre consume considerables cantidades de agua para satisfacer sus necesidades, como resultado genera aguas residuales que se caracterizan por contener contaminantes emergentes o recalcitrantes. Estos contaminantes no se degradan con los tratamientos convencionales debido a que están diseñadas para eliminar partículas y nutrientes en suspensión, por lo que la mayor parte se vierte al medio acuático, impactando, así, negativamente al medio que lo rodea y al hombre. Las empresas textiles son uno de los mayores consumidores de agua y productos químicos complejos (colorantes y otros); por ello, sus aguas residuales contienen contaminantes recalcitrantes. Existen empresas textiles artesanales que tiñen lana y otros materiales con colorantes sin control alguno, esto es crítico porque las aguas residuales se descargan directamente al alcantarillado o a los cuerpos de agua y la contaminación ambiental es severa.

Los procesos de oxidación avanzados (POA) son eficaces en la degradación de contaminantes emergentes o recalcitrantes, entre ellos el método foto Fenton es recomendable porque mineraliza moléculas orgánicas, pero la desventaja es el rango de pH de 2 a 4 (recomendable 3) para evitar la precipitación como especies de hierro. Para lograr tal condición de pH, se usa ácidos y se saben los aspectos negativos económicos y ambientales que involucran su uso. Para superar esta limitación, al foto Fenton se le puede agregar un agente quelante para formar complejos y solubilizar el hierro en un intervalo de pH más extenso que el foto Fenton convencional y evitar la precipitación del catalizador. Además, este proceso permite usar la irradiación solar como fuente natural de energía y, de esa forma, aprovechar la radiación solar alta de nuestra zona.

El objetivo general de la tesis es determinar la factibilidad del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín. Para ello, se determinó la dosis del agente quelante y H_2O_2 , se analizaron los efectos de los factores y se evaluó la eficiencia del proceso. La hipótesis indica que el proceso foto Fenton con agente quelante es factible en el tratamiento de aguas residuales textiles porque generan radicales hidroxilos responsables de degradar los contaminantes en el distrito de Hualhuas, Junín.

El informe contiene cuatro capítulos. En el primer capítulo, se desarrolla el planteamiento del estudio, se detallan el problema, objetivos, justificación e hipótesis de la investigación. En el segundo capítulo, se presenta el marco teórico que incluye los antecedentes, bases teóricas y definición de términos básicos. El capítulo III trata de la metodología de la investigación. El capítulo IV presenta los resultados y discusión, aquí se incluye la prueba de hipótesis y discusión de los resultados. Finalmente, se detallan las conclusiones de la investigación, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema.

Una enorme cantidad de agua se consume a nivel mundial para cubrir las necesidades de la agricultura, industrias, ser humano y de los ecosistemas de nuestra sociedad altamente industrializada y con un uso intensivo de energía. Esta utilización del agua a gran escala da como resultado, en última instancia, la generación de grandes volúmenes de aguas residuales, lo que plantea un desafío para tratar sosteniblemente y recuperar del agua utilizable (1). Como parte de las aguas residuales es común encontrar contaminantes emergentes o recalcitrantes, que se caracterizan por su baja concentración, bioacumulación, persistencia y resistencia a los tratamientos convencionales de aguas residuales. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) fueron diseñadas para eliminar partículas y nutrientes en suspensión, pero no contaminantes orgánicos en concentraciones mínimas (2), en consecuencia, la mayor parte se vierte al medio acuático impactando negativamente al medio que lo rodea y al hombre.

Estos contaminantes se generan por las actividades del ser humano, en la agricultura, la industria química y otros. Una serie de efluentes coloreados que contienen colorantes se liberan de las industrias textil, alimentaria, del cuero, de colorantes y de teñido (3) y se caracterizan por contener sales y material biológico recalcitrante. Específicamente la industria textil es uno de los mayores consumidores de agua e insumos químicos, como colorantes, tensioactivos, ceras, grasas, jabones, disolventes, aceites y sales (4). Son diversos los colorantes en función del material a teñir, el color, la naturaleza y el precio.

En muchos lugares, existen empresas textiles artesanales que tiñen algodón, lana y otros materiales con diferentes colorantes, sin control alguno. Esto es crítico porque las aguas residuales se descargan directamente al alcantarillado o a los cuerpos de agua y la contaminación ambiental es severa.

Los POA son útiles para la degradación de contaminantes emergentes o recalcitrantes, entre ellos el método foto Fenton es recomendable porque puede mineralizar las moléculas orgánicas y producir como productos finales CO_2 , H_2O e iones inorgánicos. La desventaja que limita su aplicación es el rango de pH de 2 a 4 (recomendable 3) para evitar la precipitación como especies de hierro. Para lograr tal condición de pH, es necesario utilizar ácidos y se saben los aspectos negativos

económicos y ambientales que involucren su utilización.

1.1.2. Formulación del problema.

a) Problema general

- ¿Es factible el proceso foto Fenton con agente quelante para decolorar las aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín, y ser utilizado para el riego de vegetales y bebida de animales?

b) Problemas específicos

- ¿Cuál es la dosis del agente quelante y H_2O_2 en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton en el distrito de Hualhuas, Junín?
- ¿Cuáles son los efectos del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?
- ¿Cuál es la eficiencia del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

- Determinar la factibilidad del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Determinar la dosis del agente quelante y H_2O_2 en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton en el distrito de Hualhuas, Junín.
- Analizar los efectos del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.
- Evaluar la eficiencia del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación teórica.

Por la compleja estructura aromática y estabilidad de los colorantes, los métodos de tratamiento biológico convencional no son muy efectivos para la degradación. Hay investigaciones con procesos físicos, químicos y biológicos y sus combinaciones para el tratamiento de efluentes textiles. Entre ellos, los POA son más efectivos y capaces de mineralizar diversos contaminantes orgánicos (5), aquí encontramos la fotocatalisis homogénea y heterogénea, ozonización, sonólisis y otros. El tratamiento con Fenton decolora completamente los colorantes de la industria textil en tiempos de reacción cortos y es posible por los radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) que se generan durante la descomposición catalizada por hierro del H_2O_2 en una solución ácida. Los radicales hidroxilos con alto potencial de oxidación destruyen completamente los contaminantes en el tratamiento Fenton (5). Las tecnologías Fenton y foto Fenton son ampliamente estudiadas y reportadas como alternativas interesantes para ser empleadas como tratamientos específicos para lograr la eliminación de contaminantes emergentes (2), de esa manera, mitigamos los impactos perjudiciales al medio ambiente y salud del ser humano.

La finalidad de la investigación es aportar al conocimiento existente sobre los POA, especialmente el proceso foto Fenton con agente quelante. También evidenciar la utilización de este método en el tratamiento de aguas residuales textiles y promover el desarrollo de nuevos proyectos para implementar una infraestructura a escala real, de tal manera que los efluentes vertidos cumplan con la normativa ambiental vigente o sean reutilizados en el proceso productivo. En forma indirecta, demostrar que esta tecnología se puede utilizar en el tratamiento de aguas residuales con contaminantes emergentes y/o recalcitrantes.

1.3.2. Justificación metodológica.

En la evaluación del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles de la investigación se aplicó el método científico, el cual involucra la observación, la formulación del problema, la hipótesis, la verificación, el análisis y la conclusión. Por ello, los resultados son reproducibles y confiables y son la base para investigaciones futuras que involucran el tratamiento de aguas residuales con los procesos de oxidación avanzada.

Los POA que se fundamentan en la reacción Fenton están condicionados críticamente por el pH del efluente en tratamiento, debido que debe ser entre 2 y 4.

Niveles de pH diferentes producen una baja eficiencia en el tratamiento por la baja velocidad de producción de radicales hidroxilos a causa de la desaparición del catalizador (Fe^{2+}). El foto Fenton con agente quelante podría realizarse utilizando sustancias capaces de solubilizar el hierro en un rango de pH más amplio (preferentemente en condiciones neutras) que el foto Fenton convencional. Estas sustancias quelantes pueden formar especies fotoactivas (Fe^{3+}L) que podrían usarse para mantener soluble el hierro. La quelación es útil para extender el rango de pH sobre el cual el hierro es soluble porque el ligando quelante compite favorablemente con el ion hidróxido por la coordinación y los complejos quelados son típicamente solubles (2). De esa manera, se evita el uso de ácidos como el HCl o H_2SO_4 y se minimizan la contaminación y los costos por estos reactivos químicos.

1.3.3. *Justificación práctica.*

Con la utilización del foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles, se reducirán considerablemente los contaminantes porque serán oxidados y el vertido contendrá H_2O e iones inorgánicos. De esa manera, se contribuirá con mitigar la contaminación que actualmente generan estos efluentes por los contaminantes fisicoquímicos y aniónicos que contienen y su alta concentración. Estos contaminantes forman parte de los cuerpos de aguas naturales y suelo, incluso el aire por evaporación, y son evidentes los impactos negativos al medio ambiente y la salud del ser humano. Los beneficiarios de la implementación del proceso serían las empresas debido a que el efluente tratado puede reutilizarse en el proceso y, los más importantes, serían el ambiente y población que habitan cerca de los puntos de descarga de los efluentes.

1.3.4. *Importancia.*

El tratamiento de las aguas residuales textiles con el foto Fenton es importante porque aporta en el cuidado del ambiente mitigando la contaminación del agua superficial y subterráneo, suelo y aire. Si consideramos que esta contaminación se acumula en el tiempo y los efectos negativos cada vez son mayores, es necesario implementar estas tecnologías.

En el mundo, la carencia de agua es creciente, la opción es recuperar y reutilizar los efluentes generados, pero las plantas de tratamiento convencionales no fueron diseñadas para los contaminantes de la industria textil por ser emergentes y/o recalcitrantes, así que no queda otro camino que desarrollar tecnologías a través de investigaciones donde se evidencien resultados satisfactorios. Ante esta necesidad, los POA son soluciones potenciales.

Al tratar estas aguas residuales con el proceso foto Fenton con quelante, se tendría una corriente de salida prácticamente libre de contaminantes recalcitrantes y se evitaría la utilización de ácidos para alcanzar los niveles de pH que requiere el proceso foto Fenton.

El proceso foto Fenton requiere una cantidad de energía proporcionada por longitudes de onda que corresponden a la luz UV, por ello, muchas investigaciones utilizan una fuente artificial para acelerar las reacciones de oxidación de los contaminantes. Para que esta alternativa de tratamiento sea atractiva y viable, aprovechar la energía solar como fuente natural de rayos UV es totalmente razonable. Si consideramos que, en nuestra región, el nivel de irradiación es alto, resulta positivo aprovechar esta energía renovable que es gratuita y limpia.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis general.

- Hi: En el proceso foto Fenton con agente quelante es significativa el efecto de la dosis de agente quelante y dosis de H₂O₂ en la decoloración de las aguas residuales textiles.
- Ho: En el proceso foto Fenton con agente quelante no es significativa el efecto de la dosis de agente quelante y dosis de H₂O₂ en la decoloración de las aguas residuales textiles.

1.4.2. Descripción de variables.

a) Variables

Variable dependiente:

- Decoloración de las aguas residuales textiles.

Variables independientes:

- Proceso foto Fenton con agente quelante:
- Dosis de agente quelante (EDTA).
- Dosis de H₂O₂.

b) Operacionalización de variables

La Tabla 1, se presenta la operacionalización de variables:

Tabla 1.

Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de recolección de datos
<p>Variable dependiente: Decoloración de las aguas residuales textiles</p>	<p>Pérdida del color de aguas residuales que puede lograrse aplicando métodos físicos como la absorción o la filtración, químicos (oxidación, fotoquímicos, electroquímicos, entre otros) y mediante sistemas biológicos. (6)</p>	<p>Se medirá el color de las aguas residuales textiles antes y después del tratamiento con el proceso foto Fenton con agente quelante para determinar el porcentaje de decoloración.</p>	<p>Color. Decoloración.</p>	<p>Unidades de color (PCU). Porcentaje de decoloración (%).</p>	<p>Técnica: Análisis documental Experimento</p> <p>Instrumentos: Ficha de identificación del punto de monitoreo. Colorímetro. Balanza. pHmetro. Cronómetro.</p>
<p>Variable independiente: Proceso foto Fenton con agente quelante</p>	<p>En este proceso, para evitar el estricto control de pH requerido en el proceso foto Fenton convencional, se introducen agentes quelantes en el sistema para formar complejos estables con iones férricos y prevenir la precipitación férrica a pH neutro. (7)</p>	<p>Peso de agente quelante (EDTA) y volumen de H₂O₂ por volumen de agua residual textil en tratamiento por el proceso foto Fenton con agente quelante.</p>	<p>Dosis de EDTA. Dosis de H₂O₂.</p>	<p>Dosis de EDTA (mM, mili molar). Dosis de H₂O₂ (ppm).</p>	

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes internacionales.

En el artículo de Arzate et al. (8) eliminaron contaminantes emergentes presentes en el efluente de la plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (Bobar-España) con el proceso foto Fenton solar de flujo continuo a pH neutro. Utilizaron 1 m³ del efluente y reactores abiertos de estanque de 5 cm de profundidad y realizaron pruebas en tres días consecutivos. El agente quelante que utilizaron fue el etilendiamina-N,N'-disuccínica (EDDS) para mantener el hierro disuelto a pH igual a 7 o neutro para la formación del complejo Fe(III):EDDS, el cual es la fuente de hierro para el tratamiento. Evaluaron el efecto de las variables relación molar Fe(III):EDDS (1:1 y 1:2) y tiempo de residencia hidráulico (20 y 40 min) en la eliminación de los contaminantes. De las conclusiones, indicaron que las mejores condiciones de operación son: relación molar de Fe(III):EDDS de 1:1, tiempo de residencia de 20 min, concentración de Fe(III) y EDDS de 0.1 mM, y concentración de H₂O₂ de 0.88 mM, a tales condiciones lograron una eliminación de los contaminantes de aproximadamente del 60 %.

En el artículo de Sánchez et al. (9) evaluaron técnica y económicamente el pH para la degradación de contaminantes de preocupación emergente (CEC) en aguas residuales reales mediante foto Fenton solar a escala de planta piloto en Almería, España. Evaluaron el efecto del tiempo de residencia hidráulica (HRT), profundidad del líquido y porcentaje de remoción del CEC en la capacidad de tratamiento. A una capacidad de los reactores de estanque de 2250 L/m²día, experimentaron a pH ácido (2,8) y fuente de hierro el FeSO₄ (Fe²⁺) y a pH neutro (7,0) con el complejo Fe(III)-EDDS, el HRT fue 30 min, 0,1 mM de hierro y 0,88 mM de H₂O₂, para lograr una eliminación del 80% de la CEC, quiere decir que obtuvieron prácticamente los mismos resultados a las dos condiciones diferentes de pH. Respecto de los costos estimados, el tratamiento con pH ácido se considera una mejor opción que el pH neutro, principalmente debido al impacto de EDDS en los costos operativos. Este estudio abre el camino para la implementación del proceso foto Fenton con radiación solar como opción para el tratamiento terciario.

En la publicación de Masoumeh et al. (10) evaluaron la eficiencia del proceso Fenton (FP) y foto Fenton (PFP) en la eliminación del colorante rojo 80 (DR80) de aguas residuales sintéticas. Evaluaron los efectos de las variables pH, tiempo,

concentración de Fe^{2+} , dosis de H_2O_2 y concentración de DR80; las condiciones óptimas para FP son 2, 35 min, 80, 35 y 20 mg/L, respectivamente; entre tanto para PFP 2, 20 min, 15 y 2 mg/L. A estas condiciones la eficiencia del proceso fue 95% y 99,5% para FP y PFP, respectivamente. De los resultados, el PFP tiene una mayor eficiencia en la eliminación de DR80 en poco tiempo que el FP, el cual usa una menor cantidad de H_2O_2 y Fe^{2+} . Concluyeron que los dos procesos, al incrementar el tiempo de contacto, concentración de Fe^{2+} y dosis de H_2O_2 se mejora la eficiencia de eliminación de colorante.

En el estudio de Soriano et al. (11) estudiaron el diseño y operación de reactores solares foto Fenton abiertos para la remoción de CEC de efluentes secundarios de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) a pH neutro. Los experimentos lo realizaron al aire libre en la Universidad de Almería (Andalucía, España) y utilizaron un fotorreactor que consiste en un estanque dividido en dos canales. La concentración de H_2O_2 y Fe^{3+} (a una relación molar Fe^{3+} -EDDS de 1:1) fue 0,88 mM (30 mg/L) y 0,1 mM (5,6 mg/L), respectivamente. Evaluaron los efectos del tiempo de residencia hidráulica (HRT) y profundidad del líquido sobre la capacidad de tratamiento. Estimaron capacidades de tratamiento tan altas como 1800 y 9000 L/m²día para una eliminación del 70 % de los CEC, en invierno y verano, respectivamente. Propusieron una herramienta de diseño para tratar las aguas residuales y ajustaron parámetros cinéticos del modelo foto Fenton desarrollado con efluentes sintéticos para predecir la eliminación de CEC en efluentes de EDAR reales.

En el artículo de Liu et al. (12) estudiaron la degradación del colorante anilina con el proceso Fenton heterogéneo, en la cual utilizaron como catalizador un complejo de oxalato de Ni-Fe que fue sintetizado con el proceso Brunauere Emmette Teller y caracterizado con microscopía electrónico de barrido y espectroscopía foto electrónica de rayos X. Utilizaron como reactor para el tratamiento vasos de 150 mL y la concentración inicial del colorante fue 20 mg/L. Este proceso heterogéneo de Fenton con el catalizador sintetizado demostró ser potencial para eliminar la anilina del agua. Las condiciones óptimas fueron 293 K para la temperatura, 0,2 g/L para la dosificación del catalizador, 4 mM para la concentración de H_2O_2 y 5,4 para el valor de pH inicial de la solución en tratamiento. A tales condiciones, la anilina se degradó al 100 % en 35 min y más del 88 % del nitrógeno orgánico pudo convertirse en nitrógeno inorgánico en 60 min. El catalizador complejo mostró una excelente propiedad de tolerancia al pH, y la anilina se pudo degradar de manera efectiva en la reacción de Fenton heterogénea con un pH inicial amplio de 3 a 8.

En la investigación de Dehghani et al. (13) determinaron las condiciones óptimas para una máxima eliminación del colorante Rojo Directo 81 con el proceso Fenton y evaluaron su viabilidad. En la parte experimental, en un reactor fotoquímico de 1 L manipularon las variables: pH (de 3 a 9), concentración de Fe^{2+} (entre 10 y 150 mg/L), concentración de H_2O_2 (de 20 a 150 mg/L), concentración inicial del colorante (entre 25 y 150 mg/L) y el tiempo de tratamiento o reacción (entre 15 a 120 min). Los valores óptimos del proceso son pH igual a 3, concentración o dosis de Fe^{2+} de 10 mg/L, concentración de H_2O_2 de 50 mg/L, concentración inicial del Rojo Directo 81 de 100 mg/L y tiempo de reacción igual a 45 min. En las condiciones determinadas, la eficiencia de degradación máxima fue 98,29 % en un tiempo de 120 min. Finalmente, concluyeron que el porcentaje de la eficiencia de eliminación del colorante Rojo Directo 81 disminuye al incrementar el pH y el tiempo de reacción aumentará.

En el artículo de Soares et al. (4) mejoraron la reacción foto Fenton solar con ligandos férrico-orgánicos para el tratamiento de aguas residuales de tintura acrílica-textil debido a que la cinética de mineralización de la mayoría de las aguas residuales de colorantes acrílicos y textiles utilizando una reacción de foto Fenton son lentos y requiere un alto consumo de sustancias químicas. También evaluaron la mejora de una reacción foto Fenton solar mediante el uso de diferentes ligandos férrico-orgánicos aplicados al tratamiento de un efluente de teñido acrílico-textil simulado, como un paso de preoxidación para mejorar su biodegradabilidad. La reacción de foto Fenton se vio afectada negativamente por dos productos auxiliares de tintura: Sera®Tard A-AS (tensioactivo) y Sueros®Sperse M-IW (agente dispersante). La actividad catalítica de los ligandos siguió este orden: Fe(III)-Oxalato > Fe(III)-Citrato > Fe(III)-EDDS, y todos fueron mejores al tradicional foto Fenton. Evaluaron la concentración de hierro, pH, temperatura, condiciones de flujo, radiación UV y dosis de adición de H_2O_2 . El foto Fenton inducido por ferrioxalato presentó los mejores resultados con una mineralización del 87 % a pH cercano al neutro. La biodegradabilidad de las aguas residuales textiles mejoró significativamente durante el tratamiento con foto Fenton, alcanzando un valor del 73 %.

En la publicación de Doumic et al. (14) investigaron el tratamiento biológico aeróbico, foto Fenton (PF) y foto Fenton con complejos de ferrioxalato (PF/Ferrioxalato) y determinaron el nivel de degradación del agua residual de teñido textil de algodón sintético. El proceso biológico no influyó significativamente en la decoloración, pero COT disminuyó por la biodegradación del ácido acético presente en el agua residual. El PF también disminuyó el COT, pero se debe a la precipitación de los complejos orgánicos de Fe (III). El ácido oxálico limitó la precipitación del hierro, por lo cual mineralizó la mayor parte de los contaminantes orgánicos. Analizaron la

influencia de los diferentes colorantes y auxiliares del teñido en la eficiencia del PF y PF/Ferrioxalato. Demostraron la viabilidad del sistema PF/ferrioxalato para mineralizar los contaminantes de las aguas residuales textiles sintético, las mejores condiciones son: concentración de Fe^{3+} de 40 mg/L, relación hierro/oxalato igual a 1:3, pH de 4,0 y concentración de H_2O_2 de 50 o 100 mg/L (1,5-2,9 mmol/L). La fuente de energía para el sistema PF/Ferrioxalato fue la luz solar que fue concentrado en colectores parabólicos compuestos.

En la investigación de Azizi et al. (15) realizaron la oxidación del colorante anilina en solución acuosa con el proceso foto Fenton en un reactor discontinuo. Usaron un reactor con un volumen de 2 L implementado con una lámpara UV e intensidad de 50 W, una bomba de circulación. Para la concentración inicial de anilina de 0.5 mmol/L, la eficiencia de oxidación o eliminación fue 84.14 % a las condiciones óptimas de pH de 3 y relación $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ igual a 6.66/100 mg/L. Evidenciaron que el sistema $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ es competente para la oxidación de la anilina, y sugirieron aplicar este proceso para la oxidación de sustancias orgánicas en medio acuoso. También que el pH ácido de la solución favorece la producción de radicales hidroxilos, en consecuencia, la velocidad de degradación es mayor y que cantidad de H_2O_2 influye directamente en la velocidad de eliminación del contaminante.

En el estudio de Ayodele et al. (16) mineralizaron los colorantes Azul Directo 71 (DB71), Verde Ácido 25 (AG25) y Azul Reactivo (RB4) con el proceso foto Fenton en solución acuosa, el catalizador sintetizado fue el ferrioxalato soportado por bentonita modificada con cobre (CuMBFOx) cuya actividad catalítica sin ajuste de pH fue evaluada, asimismo, la cinética de mineralización. Caracterizaron el catalizador con técnicas TGA, XRF, XRD, FTIR, BET y SEM. La mineralización fue total por debajo del punto de detección del espectrofotómetro UV-vis y la capacidad de mineralización del CuMBFOx fue controlado con el análisis de DQO. En el estudio de la cinética de mineralización de los colorantes, utilizaron un modelo matemático fenomenológico. Los resultados mostraron que la eficiencia siguió el siguiente orden, de mayor a menor, DB71 > AG25 > RB4 por sus componentes químicos y estructura. El catalizador CuMBFOx demostró cualidades excelentes para la mineralización de los colorantes estudiados.

En el estudio de De Luca et al. (17) evaluaron la eficiencia de los quelatos de hierro en el proceso foto Fenton homogéneo a pH neutro para eliminar el sulfametoxazol del agua. Los agentes quelantes considerados son: ácido nitrilotriacético (NTA), ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), ácido tartárico (TA) y ácido oxálico (OA). Utilizaron un reactor termostático de 2 L implementado con tres lámparas UV, una solución de quelato de hierro de 0.089 mM y de H_2O_2 de 0.294 mM

y ajustaron el pH de la solución de OA y TA en 7,0 y 8,0 para la solución de EDTA y NTA. La lixiviación de hierro fue monitoreada para evaluar la estabilidad de los quelatos y su resistencia a la HO[•] y radiación UV-A. Los quelatos de EDTA y NTA presentaron mayor estabilidad que OA y TA, lo que también confirmó su mayor eficiencia. También realizaron el análisis de COT para evaluar la contribución en términos de contaminación de la solución por el uso de agentes quelantes. La relación molar estequiométrica L-Fe de 1:1 generalmente no es suficiente para la quelación completa del hierro y debe determinarse observando la eficacia del quelante, protección del medio ambiente y menores costos. El NTA podría representar una opción útil para realizar este proceso con una relación de 1,5:1.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

En la tesis de maestría de Huamán (18) decoloraron aguas residuales de la industria textil artesanal con el proceso foto Fenton y como fuente de energía la radiación solar. Elaboró la curva de calibración con anilina de color verde y preparó las aguas residuales sintética de 40 mg/L. Manipuló la concentración del sulfato ferroso (Fe²⁺, 50 y 150 mg/L), concentración de H₂O₂ (0.5 y 1.0 g/L) y tiempo de tratamiento (1, 2 ó 3 h) en medio de agitación (1000 rpm), el pH inicial fue igual a 3. Los mejores valores de las variables concentración de Fe²⁺ y de H₂O₂ y tiempo de tratamiento fue 150 mg/L, 1.0 g/L y 3 h, respectivamente, a tales valores el porcentaje de decoloración fue 97.55%. Considerando las condiciones de las variables, concluyó que la concentración de Fe²⁺ y tiempo influyen significativamente en la decoloración, pero no la concentración de H₂O₂.

En la tesis de Álvarez y Bais (19) aplicaron el proceso foto Fenton solar para decolorar aguas contaminadas con el colorante Azul Directo 71. Utilizaron planchas agitadoras de laboratorio (a una velocidad de agitación de 300 rpm), 300 mL de las aguas contaminadas con el colorante, 1 mL de H₂O₂ de 10 volúmenes y el pH se manipuló con HCl. El diseño factorial utilizado fue 23 con un punto central y consideraron las siguientes variables: pH, dosis de hierro y concentración inicial del Azul Directo 71, y las condiciones óptimas fueron 2, 0.04 g/L y 20 mg/L, respectivamente, lograron una decoloración del 90 % después de 180 min de tratamiento. Concluyeron que el proceso estudiado es un proceso eficaz en la decoloración de aguas contaminadas con el colorante.

En la tesis de Chico y López (20) implementaron un sistema automático de control para la degradación de aguas residuales de la industria textil de pantalones de vaquero con la técnica de foto Fenton, dicho efluentes se producen principalmente en las empresas textiles pequeñas y medianas por no disponer o tener implementado el tratamiento. El sistema de tratamiento involucró un reactor batch, tablero eléctrico,

recipiente de almacenamiento del agua residual, luz UV y PLC de marca Unitronic V200-18-E3XB. Para el pH, utilizaron un lazo de control cerrado y fijaron en tres y un lazo de control abierto para la variable turbidez. Concluyeron que la propuesta es satisfactoria porque cumple con los estándares ambientales de NTU (Unidad de Turbidez Nefelométrica) y que el efluente debe presentar un valor máximo de 100 NTU para descargar al alcantarillado.

En el artículo de Gutiérrez y Pilco (21) optimizaron la degradación de compuestos orgánicos persistentes con el proceso foto-Fenton mediante el método de superficie de respuesta. Utilizaron tres reactores fotoquímicos (Hach, DRB200) a escala laboratorio, tres lámparas UV de 4W, agitador magnético (600 rpm) y para las mediciones el espectrofotómetro Varían, Cary 50. Investigaron las variables: relación H_2O_2/Fe^{2+} (11,25, 18,75 y 26,25 mg/L), potencia de lámpara UV (4, 11 y 18 W), pH (2, 3 y 4) y tiempo de tratamiento (60, 120 y 180 min). La muestra fue sintética y es resultado de la mezcla de colorantes sintéticos (Sunzol Turquoise Blue G 266 %, Sunfix Rubi S3B y Sunfix Yellow SS) e insumos auxiliares (Soquitquest CMF, Dispersoquit, Cromagen, suavizante). Encontraron que el proceso investigado es efectivo en el tratamiento de los efluentes textiles con una remoción del 86 %, en función a la DQO.

En el artículo de Anaya (22) se trató aguas residuales con colorantes reactivos con el proceso Fenton y H_2O_2/UV . Utilizó el colorante Sunfix Yellow S4GL(RAS) con una concentración inicial de 20 ppm que está presente en aguas residuales de la industria textil. El pH inicial fue entre 2.5 ó 3 y utilizó vasos de precipitado (reactor) con un agitador magnético. En el método H_2O_2/UV , los valores óptimos fueron: concentración de H_2O_2 de 1292 mg/L y pH igual a 3, y logró la decoloración del 100 % en 40 min. En el proceso foto Fenton, los valores óptimos fueron: concentración de Fe^{2+} de 3,52 mg/L, concentración de H_2O_2 de 300 mg/L, pH de 2,51, con los cuales también decoloró totalmente en 30 min de exposición a la luz UV-C. Concluyó que la eficiencia del método foto Fenton es mayor al H_2O_2/UV debido a que requiere menor cantidad de H_2O_2 , fuente de luz UV y tiempo.

En la tesis de Calderón y Olórtico (23) aplicaron el proceso foto Fenton para la degradación de colorante presente en un efluente de la industria textil. Para ello, prepararon 6,75 L de un efluente textil sintética con el colorante Rojo Moderdirect Supra 4B con una concentración de 100 ppm, NaOH, mordiente (Sulfato aluminio potásico) y Na_2CO_3 . Utilizaron como vasos de precipitación de 250 mL como reactor y evaluaron las variables: tiempo de residencia (30, 60 y 90 min) y relación H_2O_2 y Fe(II) (8,4; 9,7; y 25,5) en la remoción del colorante. De los resultados, el mejor tiempo de residencia y relación H_2O_2 y Fe(II) fue 90 min y 17,0, a estas condiciones la remoción de color fue 99,743 %. Caracterizaron el efluente tratado, la $DQO < 5$, sólidos

totales < 1,0 y conductividad de 326,55 uS/cm. Concluyeron que el proceso foto-Fenton es muy efectivo en la degradación de colorante de los efluentes textiles.

En la investigación de Alegre y Rosales (24) aplicaron la fotocatalisis homogénea y heterogénea aguas residuales textiles de la empresa Gabler S.A.C. Los resultados del análisis del efluente son: pH igual 3,75, color de 765,6 °JIS, y DQO de 981.1 ppm. Utilizaron 25 L de aguas residuales sintéticos (preparados según la caracterización que realizaron) y dos fotorreactores tubulares en la cual evaluaron el tipo de fotocatalisis (homogénea y heterogénea) y tiempo de tratamiento (1, 2 y 3 h). Los reactivos utilizados son el colorante anilina, biftalato de potasio, ácido clorhídrico, sulfato ferroso heptahidratado, solución de peróxido de hidrógeno y dióxido de titanio. De los resultados, la degradación y decoloración de la fotocatalisis homogénea y heterogénea fueron 83.47 % y 40.33 %, y 90.62 % y 60.85 %, respectivamente, respecto al tiempo óptimo fue 2.76 y 4.85 h, y 3.18 y 4.85 h, respectivamente. Finalmente, realizaron un experimento con un efluente real y degradaron en 15.90 % y 47.80 %, y 66.50 % y 50.20 %, respectivamente.

En la investigación (25) determinaron la dosificación mínima del reactivo Fenton para el tratamiento de agua que contiene colorantes azoicos amarillo 160, azul 81 y rojo 190, cuya concentración inicial corresponde a 3300 mg/L y una DQO de 1719 mg O₂/L. Utilizaron un equipo para prueba de jarras con una agitación de 300 rpm, tiempo de reacción de 45 min, volumen del residual sintética de 250 mL y temperatura inicial de 40 °C. Manipularon el pH (3,5; 7,0 y 9,0) y la relación molar de sulfato ferroso (Fe²⁺) y peróxido de hidrógeno (de 1:1 a 1:80). De los resultados, con el proceso Fenton logró una remoción de materia orgánica del 99,9% y remoción de turbidez del 100% para el pH de 3,5 y relación molar de Fe²⁺/H₂O₂ entre 1:3 y 1:5. Demostraron la calidad del agua del tipo I con un barrido espectrofotométrico y medición del potencial de oxidoreducción.

En la publicación de Tinoco et al. (26) trataron efluentes textiles con luz ultravioleta solar con el objetivo de evaluar su viabilidad. Simularon un efluente textil industrial que prepararon con el colorante rojo de synosol a 100 ppm e hidróxido de sodio (4.0 M), luego, analizaron el efluente textil preparado y el pH fue 4,6 y la turbidez 5,6 NTU. Evaluaron las siguientes variables: concentración del H₂O₂ (0,005; 0,008; 0,010; 0,013 y 0,015 %), concentración de TiO₂ (50, 75, 100, 125 y 150 ppm) y tiempo de tratamiento (1,0; 1,5 y 2,0 h) en el porcentaje de color remanente. Las condiciones óptimas de degradación es 0.015 %, 50 ppm y 2 h, respectivamente. Confirmaron al TiO₂ como fotocatalizador para el tratamiento de efluentes textiles con fuente de energía a luz ultravioleta solar.

En la publicación de Salas (27) realizaron el tratamiento de aguas residuales producidas por una empresa textil por el proceso Fenton. Utilizaron el efluente de una textil y previamente aplicaron un tratamiento físico y químico que consistió en coagulación-floculación y flotación por aire disuelto. Antes de aplicar el proceso Fenton, la muestra presentó un DQO de 1700 ppm, DBO de 460 ppm y pH de 8.1. Evaluó el efecto del pH, concentración de H_2O_2 y de Fe^{2+} , y a las condiciones que experimentaron de pH de 3, concentración de Fe^{2+} de 200 mg/L y concentración de H_2O_2 de 3612 mg/L, disminuyeron el 97% de la DQO en 40 min. Concluyeron que el proceso Fenton representa una alternativa viable o complementaria a la depuración convencional de las aguas residuales textiles.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Contaminación de las aguas y la industria textil.

La contaminación del agua por contaminantes peligrosos representa una grave dificultad ambiental en el mundo. Estos contaminantes se pueden dividir en dos categorías: contaminantes naturalmente peligrosos y tóxicos hechos por el hombre (antropogénicos). Los contaminantes antropogénicos se obtienen por reacción química o combustión de materiales naturales y sintéticos. Además, el gas natural, petróleo y carbón liberan al medio ambiente una gran cantidad de gases peligrosos y son causantes del calentamiento global que han afectado directa e indirectamente la vida de los seres vivos. Entre todos los combustibles fósiles, el gas natural (metano) es considerado como la fuente más limpia de todos los combustibles fósiles según la EPA (Agencia de Protección Ambiental). A diferencia del gas natural, otras fuentes de energía (carbón y petróleo) están formadas por moléculas de composición compleja y un alto contenido de carbono, nitrógeno y azufre. Por lo tanto, la combustión de estas moléculas complejas emite un mayor nivel de emisiones tóxicas. Estos gases nocivos, así como los contaminantes relacionados con el transporte afectaron la capa de ozono.

La contaminación a través de iones de metales pesados se considera riesgosa en comparación con los contaminantes no metálicos, por su naturaleza no biodegradable. Estos iones son muy dañinos cuando se acumulan en los órganos blandos del cuerpo (riñón, cerebro y pulmones) sin metabolizarse en el cuerpo y, por lo tanto, interrumpe las funciones corporales normales que resultan en una serie de infecciones. Estos metales se liberan directa o indirectamente al ambiente cuando se inhalan o se consumen a través de los alimentos o el agua, causan graves daños en las partes del cuerpo. Entre las series de metales pesados, el arsénico resulta ser el elemento más contaminante y su toxicidad en el agua produce diversas enfermedades. El zinc es un

elemento esencial para las actividades metabólicas, pero a altos niveles produce enfermedades. El plomo, a niveles altos, produce problemas en el crecimiento y retraso mental. Así, el cobre, el cadmio, el aluminio y el níquel son esenciales e importantes en ciertas actividades, pero a concentraciones mayores son causas de diversos problemas. La emisión de mercurio a la atmósfera por varias industrias como hidroeléctricas y curtidorías acompañadas de la quema de municipales agrícolas y médicas profanan es un grave problema. En el aire, el óxido de estos desechos reacciona con el agua (como vapor) y se convierte en metilmercurio que es altamente tóxico. Por lo tanto, la exposición de una concentración mínima de iones de metales pesados puede causar problemas de salud en los seres humanos e impactos negativos en la flora y fauna. (28, pp. 2-4)

a) Industria textil

La industria textil presenta una tendencia de rápido crecimiento. Las fibras, los tejidos, los colorantes, los insumos químicos y auxiliares se usan en los procesos de esta industria. Se clasifican en dos categorías: tela seca y húmeda y los desperdicios son sólidos y líquidos, respectivamente. La demanda de productos de la industria textil se está incrementando y la consecuencia es la presencia de colorantes en aguas residuales, lo cual es el principal problema de contaminación en el mundo. En base a la información del Banco Mundial, entre el 17 y 20 % de los efluentes industriales se originan en las empresas textiles. La acumulación de los colorantes en el medio ambiente es por su estabilidad y permanecen por extensos períodos de tiempo. Influyen en la fotosíntesis de las plantas e impactan negativamente en los organismos acuáticos por la floración de algas que es una consecuencia de las aguas residuales textiles. (29)

La industria textil involucra diferentes procesos como desengrasar, desengrasar, blanquear y teñir, y usan una mezcla de insumos químicos, colorantes y agua, entre otras sustancias, el medio ambiente es el principal destino de las sustancias que sobran de proceso. Con el teñido se agrega color a las fibras y aproximadamente el 85 % del colorante contaminante se descarga en esta etapa. Esta industria utiliza una gran cantidad de agua en los diversos procesos. La Figura 1 muestra contaminantes del agua que pueden producirse en el procesamiento húmedo. (30)

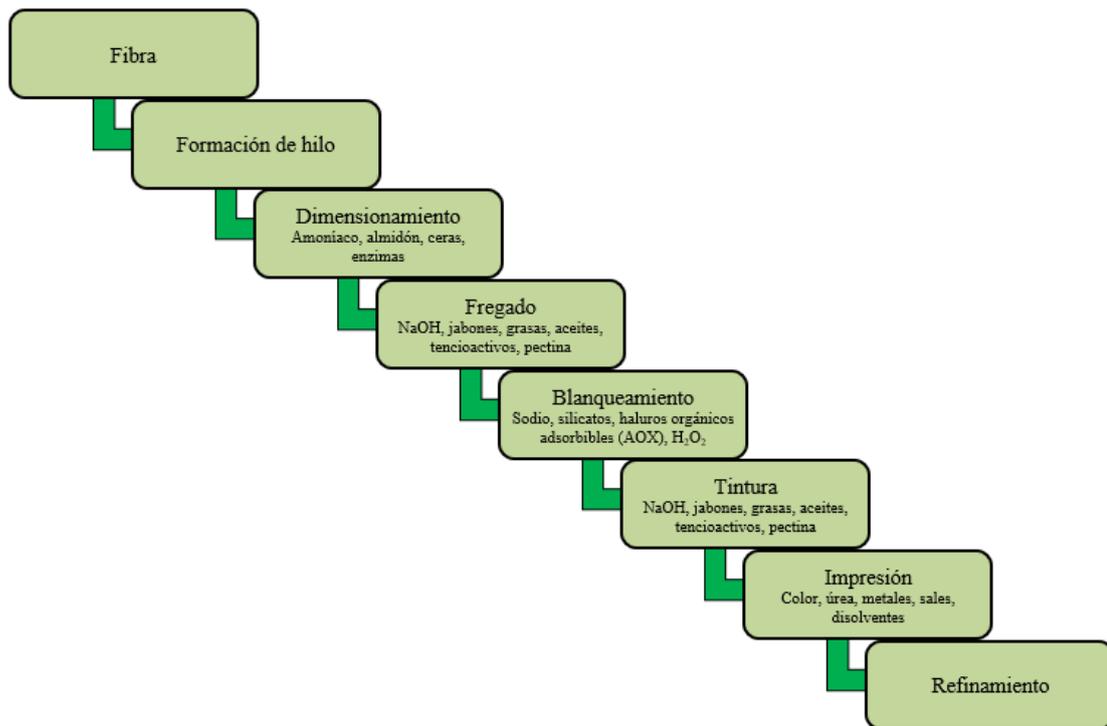


Figura 1. Operaciones en la industria textil y contaminantes generados.

Extraída de “Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives” (30).

b) Aguas residuales textiles

La industria textil es parte de la economía de muchos países del mundo y la operación fundamental es el teñido en el procesamiento de la fibra textil. Debido a la utilización de colorantes, genera aguas residuales más o menos coloreadas cuya intensidad depende del grado de fijación del colorante en el sustrato. Los efluentes textiles, específicamente del teñido, presentan baja DBO y alta DQO, por lo que pueden ser tóxicas para la vida acuática. Los colorantes alteran la actividad biológica en los cuerpos de agua, pueden ser mutagénicos y cancerígenos y pueden causar daños severos al hombre. Los efluentes con colorantes son una mezcla muy compleja e inconsistente de diversas sustancias contaminantes que son recalcitrantes. El tratamiento de aguas residuales textiles es complejo y es un desafío para la fraternidad ambiental y las industrias; las estrictas normativas actuales agravan aún más el problema. (31)

La gran cantidad de concentración de colorantes es capaz de destruir el ecosistema acuático, específicamente reducen la penetración de la luz y, con ello, la fotosíntesis de los organismos y conduce al desequilibrio del nivel trófico. (32)

Estas aguas residuales contienen colorantes y otros contaminantes que prácticamente la mayoría son peligrosos. Su composición depende del proceso textil, colorantes, materiales y/o aditivos utilizados, por ello, en el efluente se encuentran normalmente colorantes, solventes, sales y detergentes. Las características generales de

los efluentes textiles se muestran en la Tabla 2. (33)

Tabla 2.

Característica de las aguas residuales textiles

Parámetros	Valor (mg/L)
pH	9.5-12.5
Sólidos suspendidos total	60-416
Sólidos disueltos total	4500-12800
COT	26390-73190
DBO	25-433
DQO	1835-3828
Aminas aromáticas	20-75
Amoníaco	2-3
Cloruro	1200-1375
Sulfato	700-2400

Extraída de *"An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes"* (33).

Los efluentes de las fábricas textiles representan una amenaza al ambiente. Incluso a bajas concentraciones representan una contaminación estética (aparición desagradable) y química, dificulta la penetración de la luz reduce la actividad fotosintética dentro del cuerpo de agua e influyen en el equilibrio de la vida acuática y cadena alimenticia. La concentración de los colorantes en estos efluentes es variable, un valor promedio es alrededor de 300 mg/L. (33)

La presencia de compuestos orgánicos contaminantes como los colorantes, DDT, HCH, otros pesticidas, PCB, PAH, surfactantes y otros en la hidrosfera, es de particular preocupación para los ambientes de agua dulce, costeros y marinos porque son contaminantes recalcitrantes, es decir, difíciles de degradar con los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales.

La presencia de los colorantes en las aguas no es deseada ni a niveles de concentración muy pequeños. Especialmente los colorantes sintéticos son venenosos y cancerígenos, con mayor razón son una gran amenaza a la vida acuática. Los colorantes son difíciles de tratar porque son moléculas orgánicas recalcitrantes que son resistentes a la digestión aeróbica y son estables a la luz, el calor y oxidantes. (34)

c) **Causas y consecuencias de la contaminación de la industria textil**

En los párrafos siguientes, se detallan las causas y consecuencias de la

contaminación generada por las empresas textiles a nivel internacional y nacional que evidencian el crítico problema ambiental.

Bangladesh es un país sudasiático donde el sector textil es una parte importante de su economía. En muchos casos, los efluentes textiles (217 millones de m³ en el 2016) se vierten a ríos o humedales sin el tratamiento adecuado. Los ríos (como el río Shitalakkhya) y cuerpos de agua cercanos a las zonas industriales textiles de Bangladesh (como Dhaka, Narayanganj y Gazipur) son los principales receptores de los efluentes sin tratar. Varias aldeas en Gazipur y Dhaka-Narayanganj-Demra se ven amenazadas por consumir y usar esta agua contaminada para bañarse, lavar y realizar tareas domésticas, especialmente los niños son propensos a enfermedades asociadas con la contaminación, como náuseas, llagas en la piel, irritación de las vías respiratorias, cólera y otros. La industria textil consume grandes volúmenes de agua y utiliza agua subterránea, su extracción excesiva puede aumentar la salinidad del agua subterránea y del suelo y afectar los ecosistemas acuáticos y reducir la productividad de los cultivos y vida acuática. Niveles altos de salinidad del agua pueden causar presión arterial alta, enfermedades cardíacas e insuficiencia cardíaca. Para el 2016, se estimó la cantidad de sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno en los efluentes descargados por la industria textil en 49445, 912532, 108817 y 322470 TM, respectivamente. Con este nivel de contaminación, el agua es desagradable y, potencialmente dañina para la salud y el medio ambiente, puede afectar a los peces (como trucha, salvelino, salmón y timalo) y a los organismos acuáticos en su mortalidad y cambios en la composición. El pH de este efluente oscila entre 3,9 y 14, pH menores a 4,5 y mayores a 8,5 pueden ser letales para la vida acuática. La temperatura de las aguas residuales textiles puede llegar a los 65 °C, cuando es alta puede aumentar la temperatura de los cuerpos de agua en los que se descargan y reducir el nivel de oxígeno disuelto, lo que lleva a la pérdida de biodiversidad. (35)

En España, se evaluó el impacto ecológico y la recuperación del río Ripoll tras recibir el efluente de una planta de tratamiento convencional para aguas residuales textiles, desde el verano de 2012 hasta la primavera de 2013. Examinaron la calidad del agua y estado ecológico 1.5 km aguas arriba y aguas abajo del lugar de descarga de la planta de tratamiento, en la cual se demostró que se incrementó la conductividad y contenido de nitrógeno y fósforo, y, ligeramente, la temperatura del agua. En el río Ripoll se registraron hasta 45, 34, 40 y 4 representantes de diatomeas, macrófitos, macroinvertebrados y peces, respectivamente. Después de la industria textil, se produjo una marcada disminución de la riqueza taxonómica global, el impacto fue particularmente agudo para los peces, tal es así que no se encontraron peces en los sitios

más contaminados en ninguna temporada, pero las diatomeas fueron la excepción. Considerando que los efluentes textiles contienen metales pesados, estos podrían haber quedado atrapados en el sedimento y afectar a los organismos que viven o se alimentan en el fondo del río. Finalmente, se evidenció que el efluente vertido deterioró severamente la calidad del agua y las comunidades biológicas en el sitio de descarga, pero mejoraron a 1.5 km aguas abajo. (36)

En Narayanganj, ciudad de Bangladés, evaluaron el impacto de los efluentes de las industrias textiles en la calidad del agua superficial. Consideraron doce empresas que descargan una gran cantidad de aguas residuales, lodos de aguas residuales y materiales de desecho sólidos directamente en el cuerpo de agua circundante. En las muestras, determinaron los parámetros fisicoquímicos, parámetros aniónicos y metales pesados como Pb, Zn, Cd y Cu. Los efluentes líquidos son muy coloreados y con olor acre, temperatura promedio de 50 °C, pH varió de 7,59 a 11,91, conductividad eléctrica de 14109.56 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólidos suspendidos totales entre 736 a 1960 mg/L, sólidos suspendidos totales entre 391 y 46700 mg/L, oxígeno disuelto entre 0,42 y 4,60 mg/L, DBO de 415 a 770 mg/L, DQO de 860 a 1560 mg/L, concentración de fluoruro varió de 0,02 a 1023 ppm, concentración de cloruro de 1035 a 69494 ppm, concentración de nitrito de 0,07 a 14 ppm, concentración de fosfato de 191.30 a 5969.03 ppm. Debido a los altos niveles en los parámetros, las principales consecuencias de la descarga de aguas residuales textiles son: reducción de la solubilidad de los gases (como el oxígeno) y utilidad del agua para beber, irrigación y propósitos industriales, vida acuática y autodepuración de las aguas naturales limitada, presencia de sustancias tóxicas como el ion cloruro que puede ser letal para los peces, eutrofización, etc. Por lo que se concluye que las industrias de teñido de textiles descargan efluentes que contienen diversos contaminantes fisicoquímicos y aniónicos a un nivel considerablemente más alto en comparación con el límite de contaminación y contaminantes aniónicos en límites intolerables, por lo que el agua superficial de alrededores está altamente contaminada. (37)

En Kaduna, Nigeria, se caracterizó efluentes de cinco importantes industrias textiles para evaluar la implicancia en la contaminación. De las mediciones realizadas, siete de los parámetros medidos excedieron el límite establecido por el Ministerio Federal de Medio Ambiente. La intensidad del color superó en unas 350 veces en promedio, mientras que DQO, TSS, NH_3 , DBO_5 y S^{2-} superaron en 24, 13, 8, 7 y 3 veces respectivamente. Detectaron TDS en todas las muestras con límite excedido solo en dos fábricas. Detectaron nitrato, aceite y grasa en una y dos fábricas y dentro del límite. Detectaron Al, Mn y Zn se en el 80 % y, dentro del límite, mientras que el Fe fue detectado en el 60 %. Detectaron Cu en el 80 % con un límite excedido en unas 3

veces en promedio. Las calidades de los efluentes estudiados estaban muy por debajo de los límites establecidos por el Ministerio Federal de Medio Ambiente de Nigeria y algunos organismos mundiales como la OMS en cuatro de las cinco fábricas textiles. Los efluentes no tienen características uniformes y esto puede dificultar enormemente el uso de una planta central de tratamiento de efluentes como la propuesta por el gobierno. Demostraron que la calidad del aire del área cubierta por toda la cuenca del río Kaduna podría verse afectada negativamente por las emisiones gaseosas y partículas que podrían liberarse de los efluentes debido a que la temperatura ambiente siempre es cálida que favorece la evaporación y, con ello, la transferencia de los diversos contaminantes al aire. Las mediciones que se realizaron sustentan que la zona es inhabitable para los organismos acuáticos y alrededores. (38)

A las aguas residuales de una empresa textil de Arequipa se les realizó el análisis del agua antes (del pozo) y después del uso industrial para evaluar el incremento de ciertos parámetros producto de la operación del área de lavado, los parámetros evaluados son cloruros (de 89.80 a 113.93 ppm), sulfato (de 158.70 a 173.20 ppm), sólidos (de 474.10 a 1571.00 ppm), dureza (de 253.40 a 278.40 ppm), calcio (de 61.90 a 86.39 ppm), aluminio (constante en 0228 ppm) y aceite y grasas (de 0 a 513.33 ppm), por los niveles que presenta el efluente no es apta para uso doméstico ni uso agrícola. Por otra parte, el volumen aproximado que utiliza es 50 L por kg de lana, haciendo un total de 40 m³ por turno de 8 h. La situación que agrava es la producción permanente de la empresa y vierte el efluente al alcantarillado después de un tratamiento primario, donde no elimina los contaminantes disueltos y suspendidos, por ende, el impacto negativo en los cuerpos de aguas naturales y suelo es considerable. El problema es crítico porque la industria textil utiliza grandes volúmenes de agua y compuestos químicos, entre estos colorantes y detergentes. (39)

En un estudio realizado respecto de la contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil en Lima-Perú, se realizaron estimaciones para el 2015 con la población mundial de 7400 millones de personas, el consumo textil per cápita fue 13.1 kg/hab/año, se demandan 54 millones de TM de fibras naturales anuales, 1 millón de TM de colorantes y 7 millones de productos químicos por año, se consume 30-150 L/kg de material textil para el 2015. El volumen de agua para fabricar prendas es función de la fibra textil y colorante usados, por ejemplo, un par de jean de algodón con colorantes índigos, necesita mínimamente de 42 L de agua para el teñido, lavado y acabado; y 21 L para lavarlo en casa. En forma general, esta industria consume entre 5 % a 20 % del agua disponible. En el Perú y el mundo, el volumen de las aguas residuales generadas por las empresas formales e informales no es conocida con exactitud. La industria textil se distingue sus altos consumos de agua, energía, reactivos químicos y

no usan el mismo proceso de producción, ni sustancias químicas y ni el mismo volumen de agua. Por lo cual los principales impactos ambientales son el alto consumo de agua y las aguas residuales generadas en los procesos diversos presentan alta carga contaminante, tal es así que la personas están expuestas a diversas sustancias tóxicas, como los siguientes metales: arsénico, cadmio, cromo, cobalto y otros. (40)

La Cooperativa Industrial Manufacturas del Centro Ltda. es una empresa textil que operó, desde el año 1966, en Huancayo. Hace muchos años fue vendida y las instalaciones ya no existen. El 2008, se realizó una caracterización del agua residual en la cual se evidenció el grado de contaminación. Los resultados fueron: concentración de oxígeno disuelto de 2.2 ppm, DBO₅ de 378.5 ppm, DQO de 802.0 ppm, pH igual a 3, sólidos totales de 6410 mg/L y conductividad de 12400 µS/cm. Estos niveles son altos debido a que el efluente del proceso de teñido no se trataba, lo cual es común actualmente en muchas empresas de la región Junín y otros lugares. Esta situación era crítica por los grandes volúmenes de aguas residuales que se vertía directamente al río Sullcas causando contaminación al agua y el suelo, esta situación se evidenciaba por la contaminación visual, la coloración del agua y la ausencia de vida acuática en esa área. (41)

2.2.2. Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.

Los tipos principales de aguas residuales son las municipales, industriales y agrícolas. El origen son las aguas residuales humanas y domésticas, desechos industriales y animales, infiltración de aguas subterráneas y otros. Estas aguas componen del 99,9 % (w/w) de agua y 0,1 % de material en suspensión o disuelto.

Fundamentalmente, son tres tipos de tratamiento convencionales que se utilizan y son: procesos físicos, químicos y biológicos. Cuando estos procesos se utilizan de forma secuencial o concurrente, pueden ser eficientes para eliminar o degradar contaminantes, las limitaciones para su aplicación están relacionadas con la eficiencia, ejecución y costos. Los métodos biológicos son recomendables para el tratamiento de efluentes agrícolas y de la industria láctea. Otros métodos de tratamiento presentan desventajas como rango de pH y alteraciones de la carga orgánica, comportamiento físico-químico de los efluentes y otros. La finalidad del tratamiento de aguas residuales es convertir las aguas residuales en un efluente útil que no genere problemas ambientales y ni a la salud, en otras palabras, reutilizar el agua. La infraestructura física se denomina planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y se clasifican según los tipos de aguas residuales a tratar. En un país industrializado, una planta de tratamiento de aguas residuales típica se compone de los tres tipos de tratamiento convencionales. (42, pp. 3–4)

a) **Tratamiento primario**

Separación de fases. Los contaminantes se convierten en una fase no acuosa en puntos intermedios de una secuencia de tratamiento para eliminar los sólidos generados durante la oxidación o pulido en la separación de fases. Las grasas y aceites también se pueden recuperar para ser utilizado como combustible o saponificación. Los sólidos inorgánicos disueltos pueden tratarse con métodos como ósmosis inversa, intercambio iónico, destilación y otros.

- **Sedimentación.** Los sólidos y líquidos no polares se eliminan por gravedad por las diferencias de densidad en tanques de sedimentación y es el tratamiento primario de las aguas residuales. Los sólidos de mayor peso sedimentan o depositan en el fondo de los tanques de sedimentación.
- **Filtración.** Los sólidos finos que se encuentran en suspensiones coloidales se pueden filtrar y con ello eliminar, en la cual los materiales filtrantes pueden ser mallas o tamices más gruesos, los tamaños de las partículas deben ser más grande que las aberturas del medio filtrante. (42, p. 5)

b) **Tratamiento secundario**

Oxidación. El objetivo de esta operación es reducir la DBO de las aguas residuales y, con ello, la toxicidad de algunas contaminantes. Comúnmente, algunas contaminantes se transforman en CO₂, agua y biosólidos. También se utiliza frecuentemente para la desinfección.

- **Oxidación bioquímica.** La oxidación de sustancias orgánicas disueltas y coloidales se usa con frecuencia para algunos efluentes agrícolas e industriales. Oxida contaminantes orgánicos como fuente de alimento para el ecosistema de tratamiento.
- **Oxidación química.** Mayormente oxida algunos compuestos orgánicos persistentes y las concentraciones sobrantes después de la oxidación bioquímica. El uso de ozono, cloro o hipoclorito en la oxidación química oxida las bacterias y patógenos microbianos.

Pulido. Los tratamientos después de la oxidación se conocen como pulido y se usa independientemente para algunas aguas residuales industriales. Después de la oxidación química, la reactividad química de los efluentes se puede reducir mediante la reducción química o ajuste del pH. Luego, los contaminantes restantes se eliminarán por absorción con carbón activado. La filtración por arena (carbonato de calcio) o filtro de tela se usa comúnmente para efluentes municipales. (42, p. 5)

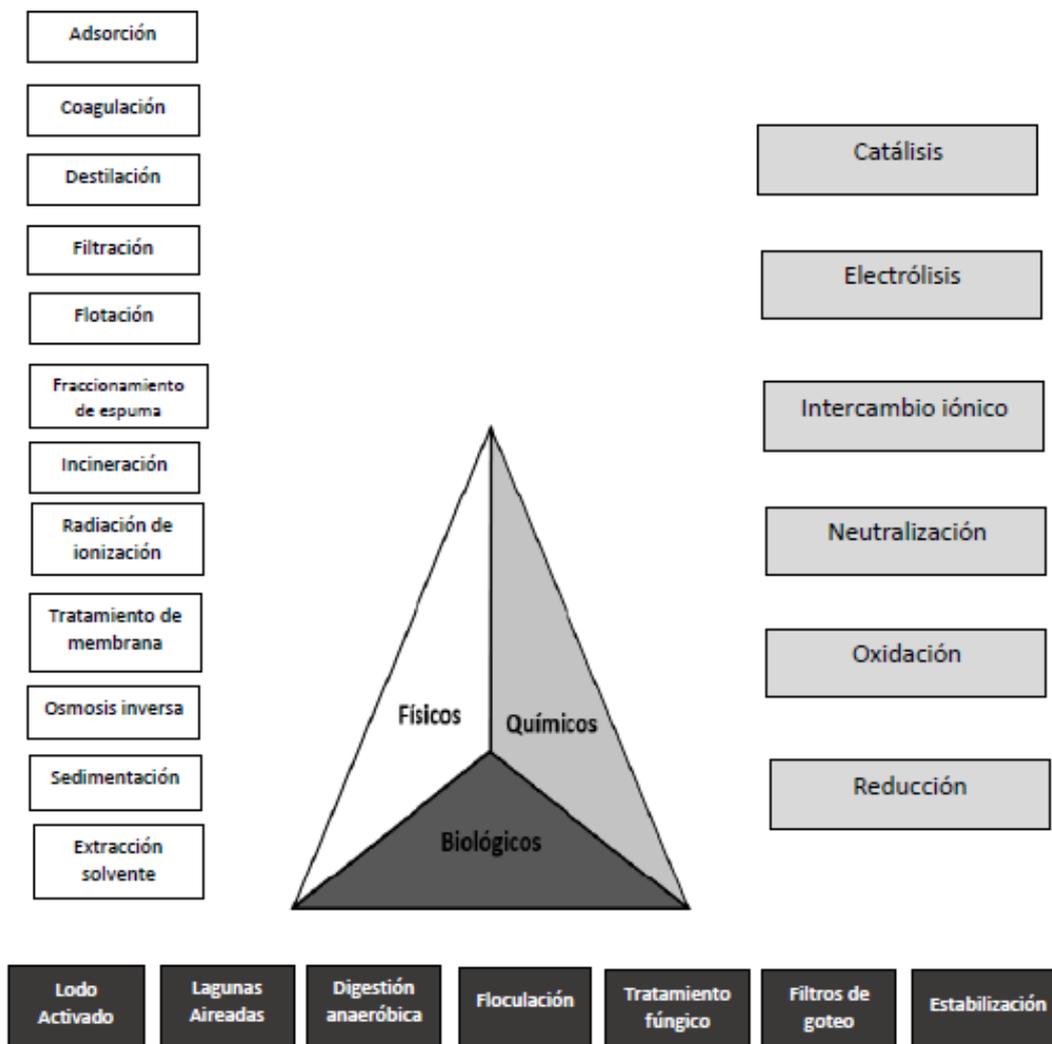


Figura 2. Clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales. Extraída de "Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment" (42).

c) Tratamiento terciario

Este tratamiento es parte de las etapas convencionales que involucra tratar aguas residuales. Generalmente se usa la microfiltración o membranas sintéticas. Los nitratos se pueden eliminar con procesos naturales en humedales o mediante desnitrificación microbiana. También se está usando ozono como oxidante y requiere un generador de ozono, el ozono elimina el contaminante, pero este tratamiento consume mucha energía. El tratamiento de aguas residuales agrícolas se puede realizar en plantas mecanizadas. Si se dispone de espacio para estanques, tanques de sedimentación y lagunas facultativas, el costo operativo es menor. Las plantas de tratar lixiviados se usan en el tratamiento de lixiviados de los vertederos. Las alternativas de tratamiento incluyen el tratamiento: biológico, mecánico por ultrafiltración, con filtros de carbón activo y ósmosis inversa. Con estos tratamientos, se transfiere el contaminante de una fase acuosa a otra, la contaminante persiste y requiere tratar los desechos sólidos y regenerar

el adsorbente, como consecuencia se incrementa el costo del proceso. También se usan la descomposición enzimática o microbiológica, biodegradación, ozonización y POA, como métodos Fenton y foto Fenton, procesos H_2O_2/UV , entre otros. Últimamente, los procesos fotocatalíticos se están utilizando para la degradación de contaminantes orgánicos en efluentes. Los POA son procesos que destruyen contaminantes emergentes y mineralizan totalmente la mayoría de los contaminantes orgánicos. (42, p. 6)

d) Tecnologías para la eliminación de colorantes del agua.

Para eliminar o degradar colorantes presentes en aguas residuales, se utilizan la adsorción, coagulación, filtración, electrocoagulación, fotólisis, sonólisis, biodegradación, tratamiento de tierras húmedas, ozonización, fotocatalisis, filtración por membrana, etc.

En función del mecanismo de eliminación del colorante, estos procesos se dividen en: métodos separativos (físicos y fisicoquímicos) y métodos degradativos (químicos y biológicos). El diagrama de los diversos métodos utilizados para la eliminación del colorante se muestra en la Figura 3. La mayoría de los métodos que se usan para la eliminación de colorantes son procesos de separación y la principal desventaja es la eliminación de lodos que contienen colorantes como en el proceso de coagulación, absorbentes con colorantes y solución de colorante concentrada como en los procesos de membrana. Al contrario de esto, en la degradación química los colorantes se degradan. Los procesos de oxidación avanzada que producen oxidantes altamente reactivos, principalmente el radical hidroxilo ($\bullet OH$), incluso llegan a mineralizar los contaminantes orgánicos y los productos finales son el dióxido de carbono, agua y varios iones inorgánicos. (43, p. 211)

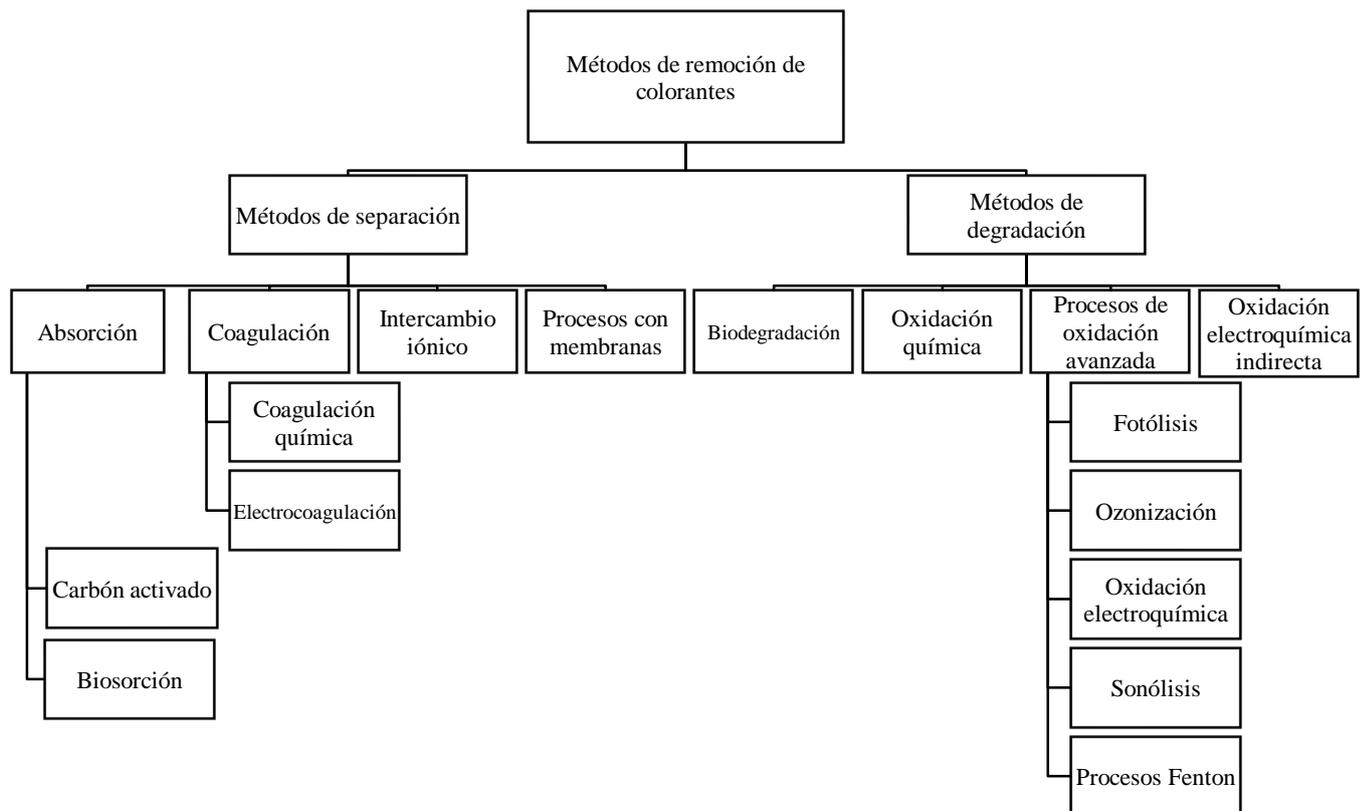
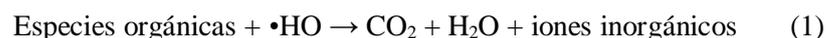


Figura 3. Métodos utilizados en la remoción de colorantes del agua.

Extraída de “An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes” (33).

2.2.3. *Proceso de oxidación avanzada.*

Los POA son tecnologías de tratamiento de aguas residuales altamente efectivas para degradar contaminantes de baja biodegradabilidad, refractarios, inhibidores o de alta estabilidad química. Lo común de los POA es que forman en el proceso oxidantes altamente reactivos, especialmente radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$). Los radicales $\bullet\text{OH}$ son muy efectivos, potentes, de naturaleza ubicua y no selectivos con un comportamiento electrofílico y un potencial redox de 2,8 V; que aceleran la oxidación, degradación y mineralización de diversos contaminantes presentes en aguas residuales. Los $\bullet\text{OH}$ son capaces de destruir e incluso mineralizar, hasta cierto punto, los contaminantes en CO_2 , H_2O y sales inorgánicas. (44, p. 6)



Los POA involucran la producción y uso de especies oxidantes transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo. Este radical se puede producir con energía solar, energía eléctrica, energía del sonido, etc. o simplemente mediante insumos químicos como H_2O_2 , ozono y otros, con o sin el uso de un catalizador

apropiado; se diferencia respecto a la forma como se producen los radicales hidroxilos. Otras especies de oxígeno activo son el radical ion superóxido, $O_2^{\bullet-}$, y su forma ácida conjugada, el radical hidropéroxilo, HO_2^{\bullet} , que también se producen en los POA, pero son mucho menos activos que el $\bullet OH$. Hoy en día, además de los radicales hidroxilos, los experimentos que utilizan otros radicales como los radicales sulfato como especies transitorias han dado excelentes resultados y se clasifican como POA.

El radical hidroxilo con un potencial de oxidación de 2,8 V es un oxidante poderoso y no selectivo que actúa velozmente sobre la mayor parte de los contaminantes orgánicos. Los productos formados en la oxidación son el agua, dióxido de carbono, oxígeno y ácidos minerales. Pero en el caso de contaminantes muy recalcitrantes, no ocurre la oxidación completa. Los resultados son la producción de moléculas simples como ácido propiónico, acetona, etc. que pueden ser tratados por otros métodos como el tratamiento biológico. Por lo tanto, los POA puede usarse como una sola tecnología de tratamiento de agua o usarse junto con otros métodos (Figura 4). El peróxido de hidrógeno es relativamente inestable liberando oxígeno por una serie de radicales libres como los radicales $\bullet OH$, $\bullet HO_2$ cuando está en contacto con superficies activas como catalizadores de área superficial alta. Por lo tanto, junto con un catalizador eficiente, el peróxido de hidrógeno exhibe una excelente reactividad y eficiencia de utilización, lo que reduce los altos costos de operación. (45, p. 2)

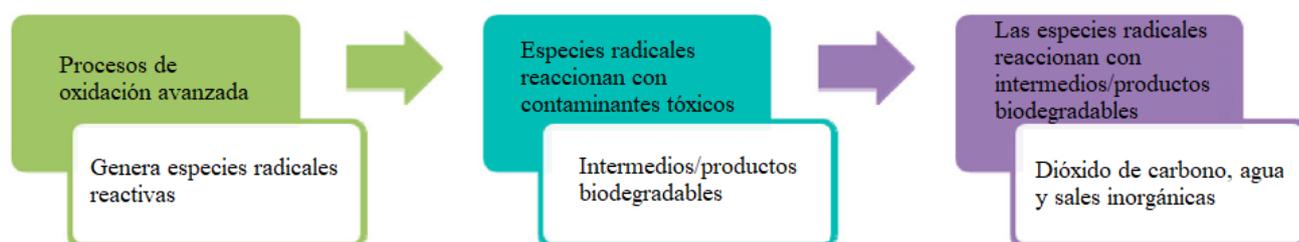


Figura 4. Diagrama esquemático que explica los procesos involucrados en los POA.

Extraída de “Advanced oxidation processes and nanomaterials -a review” (45).

Los POA se pueden aplicar en el tratamiento de agua en diversos sectores, como el tratamiento de aguas residuales industriales (residuos de destilería, agroquímicos, papel, textiles, petrolíferos y metalúrgicos) y de efluentes peligrosos (residuos de hospitales y camales, patógenos y residuos farmacéuticos y metales pesados como arsénico y cromo del agua).

Se han utilizado con éxito catalizadores homogéneos y heterogéneos en POA. Los sistemas heterogéneos tienen ventajas sobre los homogéneos, como la fácil

separación del catalizador para su reutilización del agua tratada, falta de tratamiento secundario para eliminar los metales disueltos del agua tratada y tolerancia a condiciones de operación extremas. Además, el sistema heterogéneo es efectivo en un rango de pH más amplio, incluido el pH común para agua natural y aguas residuales (pH 2-9). Los catalizadores activos, estables y eficientes juegan un papel importante en la destrucción de contaminantes en los POA. (45, p. 2)

En el campo de los POA de aguas residuales, muchos materiales pueden utilizarse como catalizadores heterogéneos. El papel de estos catalizadores es activar oxidantes y generar especies reactivas de oxígeno (ROS) para descomponer los contaminantes refractarios. (46, p. 1)

En la Figura 5, se presentan las diferentes categorías de los procesos de oxidación avanzada:

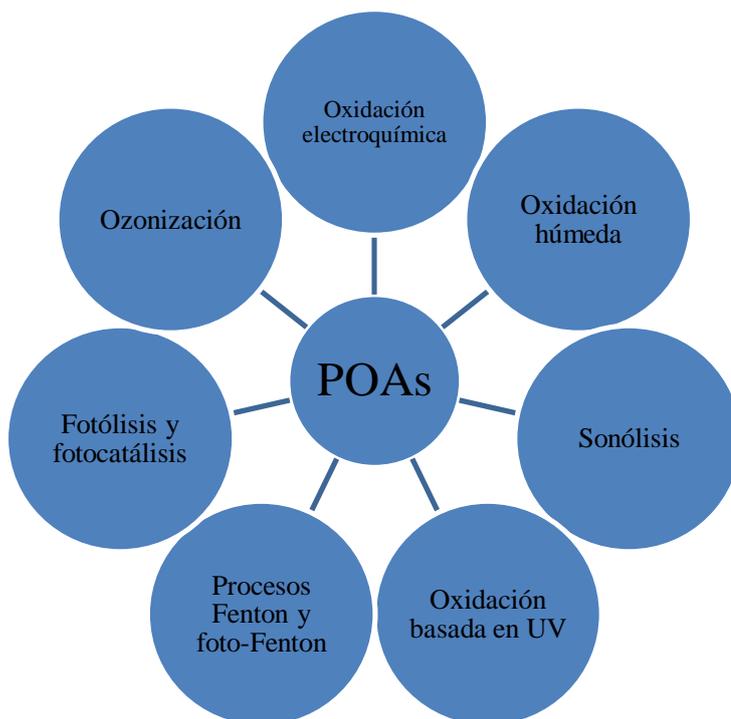


Figura 5. Diferentes categorías de procesos de oxidación avanzada (POA) utilizados para el tratamiento de aguas residuales complejas.

Extraída de “Advanced oxidation processes for complex wastewater treatment” (44).

En la Figura 6, se presenta el grado de aplicación de los POA en el tratamiento de aguas.

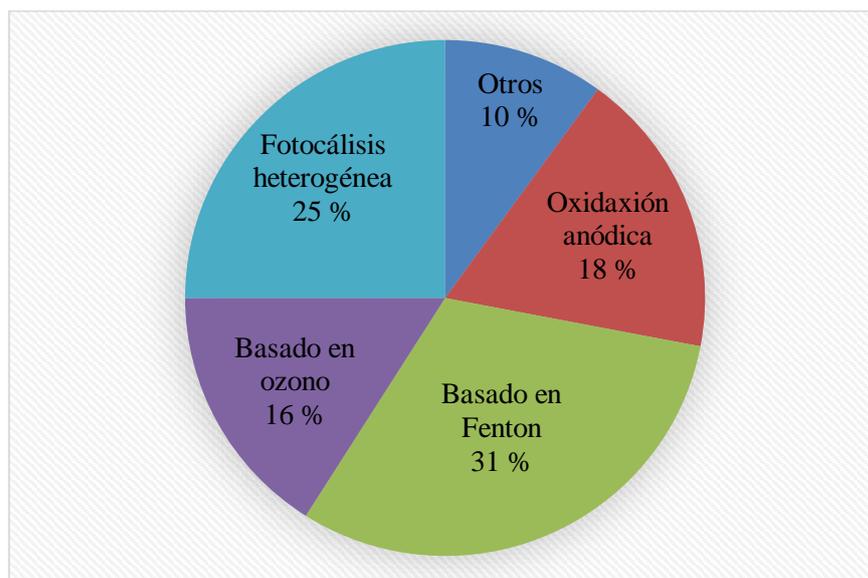


Figura 6. Aplicación de los POA en el tratamiento de aguas.

Extraída de “Advanced oxidation processes in the removal of organic substances from produced water: Potential, configurations, and research needs” (47).

a) **Procesos Fenton y foto-Fenton**

El proceso Fenton es un proceso muy eficiente y avanzado para tratar aguas residuales de destilerías y mejoran la biodegradabilidad del efluente, el Fenton reduce o elimina la DQO remanente, toxicidad y color de las aguas residuales. El reactivo Fenton es una mezcla de H_2O_2 y sales de hierro ferroso (Fe^{2+}) que producen radicales altamente reactivos, implica una serie de reacciones secuenciales complejas y finalmente conduce a la degradación de los contaminantes orgánicos de las aguas residuales. El catalizador Fe^{2+} inicia y acelera la descomposición de H_2O_2 en pH ácido, dando como resultado la producción de $\bullet\text{OH}$. Las reacciones que involucra el proceso de Fenton son: (44, pp. 7–8)



Aunque los POA que se fundamentan en la reacción Fenton son altamente efectivos para el tratamiento de diversos contaminantes orgánicos, presentan diversas desventajas como alta formación de lodos, funcionamiento a valores de pH ácidos (entre 2 y 3), uso de cantidades relativamente grandes del catalizador Fe^{2+} y H_2O_2 , ralentización de la reacción Fenton tras la transformación inicial de Fe^{2+} en Fe^{3+} (iones férricos), presencia de otros iones (fosfato, sulfato, fluoruro, bromuro y cloruro),

inactivación de iones de metales pesados en el lodo por la formación de complejos de hidróxido; y necesidad de la separación del catalizador al final del proceso. Además, otra desventaja es producción de sustancias intermedias recalcitrantes, que limitan la mineralización total de los contaminantes. A pesar de estas desventajas, los procesos de Fenton convencionales se vienen usando masivamente en el tratamiento de aguas residuales industriales a pequeña escala o en la degradación de contaminantes recalcitrantes especiales. (44, p. 8)

Generalmente al proceso de Fenton se le considera un proceso catalítico de manera un tanto incorrecta, en virtud de la regeneración cíclica de Fe^{2+} a partir de Fe^{3+} . Sin embargo, una gran cantidad de reacciones parasitarias pueden ocurrir fuera del ciclo catalítico. La reacción parasitaria más crítica es la precipitación de Fe^{3+} como hidróxido, creando lodos de hierro. Este mecanismo explica la importancia de controlar el pH durante el proceso. Por otro lado, se dispone de una comprensión adecuada del pH, relación óptima $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe(II,III)}]$ y de los iones en el proceso de Fenton aplicado para el tratamiento:

- i. La degradación del sustrato es más eficaz en condiciones de pH ácido. La disminución de la cinética por encima de este valor se debe razonablemente a la precipitación de Fe^{3+} , que impide su reciclaje a Fe^{2+} . Un pH ácido limita la cinética de precipitación de Fe^{3+} como hidróxido durante el proceso. Sin embargo, no se puede evitar la formación de lodos de hierro (hidróxidos de hierro), y este subproducto debe eliminarse al final del proceso.
- ii. La tasa de descomposición de H_2O_2 tiene un pico en función de la relación $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$; De Laat y Gallard (1999) sugirieron que a pH 3 esta relación debería estar entre 50 y 500 para maximizar la cinética. Este efecto se debe a la capacidad interconectada del Fe^{2+} y el H_2O_2 para trabajar como fuentes y eliminadores de radicales hidroxilo en la reacción de Fenton, así como a la capacidad del H_2O_2 y las especies derivadas para reducir el Fe^{3+} en Fe^{2+} . De hecho, una relación $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ meramente estequiométrica, al optimizar la reacción 1, no permitiría un reciclaje eficiente del Fe^{3+} e impediría que el proceso Fenton fuera catalítico de forma eficaz.
- iii. Los aniones inorgánicos siempre están presentes en el agua producida (PW) (TDS: 100-400000 mg/L) y pueden afectar significativamente la reacción de Fenton de varias maneras: (a) formación de complejos de Fe(II, III), que evita la interacción entre especies de hierro y H_2O_2 a través de la formación de complejos de esfera interna y limita la formación de $\bullet\text{OH}$, especialmente en presencia de sulfato; (b) reacciones de precipitación en presencia de fosfato o carbonato, que eliminan Fe(II, III) de la solución; (c) captación directa de radicales hidroxilo y

formación de radicales inorgánicos menos reactivos, especialmente en presencia de cloruro. Los aniones más problemáticos pueden ser el cloruro y sulfato. (47, p. 4)

En busca de las limitaciones del proceso clásico de Fenton, se han desarrollado otros procesos a partir del Fenton. El primer proceso fue acoplar la energía de la luz de las fuentes UV o la radiación solar, proceso denominado como foto-oxidación de Fenton. El proceso foto-Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{UV}$) forma $\bullet\text{OH}$ mediante la fotólisis de H_2O_2 en presencia de UV. En presencia de radiación ultravioleta, el Fe^{3+} producido en la ecuación (3) se transforma fotocatalíticamente en Fe^{2+} , con la formación de $\bullet\text{OH}$ adicionales a través de:



La reacción de foto-Fenton presenta mayores velocidades de reacción y porcentaje mineralización en comparación con el Fenton convencional. En este proceso puede utilizarse fotones de baja energía y también la irradiancia solar como fuente de energía.

Además, este proceso promovió incrementar la cinética y rendimiento del Fenton, también la cantidad del catalizador e incrementar decoloración de efluentes textiles. Pero el foto-Fenton no ayuda a superar las otras desventajas, particularmente la necesidad de operar en un pH ácido (alrededor de 3) y problema de los iones de metales pesados en efluente del tratamiento. La toxicidad del H_2O_2 para diversos microorganismos y utilización de concentraciones altas de H_2O_2 posiblemente pueden alterar la eficiencia de degradación en el proceso de Fenton seguido de la oxidación biológica. Aparte del pH ácido, la inevitable necesidad de separar el catalizador en la parte final de la reacción son desventajas complementarias de estos POA. Las modificaciones al proceso Fenton tienen como objetivo eliminar el pH bajo y recuperar los catalizadores usados de las aguas residuales con el uso de procesos heterogéneos de Fenton. Involucra insertar el catalizador ferroso y grupo ácido en un material portador.

Al restringir la cantidad de catalizador en el efluente del tratamiento, el proceso garantiza la formación de una mínima cantidad de lodo en la coagulación. Por otra parte, se reduce la cantidad de iones de metales pesados presentes en el lodo y efluente del tratamiento. (44, pp. 8–9)

b) Ozonización

El proceso de ozonización/ozonólisis parece ser una tecnología de tratamiento de oxidación favorable para la degradación de colorantes de aguas residuales. El O₃ generalmente se genera *in situ* por descarga eléctrica en una corriente de oxígeno (O₂) o aire, sin dejar olores ni sabores residuales. Es ampliamente utilizado para la desinfección debido a su fuerte actividad lítica celular que puede matar los microorganismos que se encuentran en las aguas residuales. El O₃ es un poderoso oxidante (E⁰=2,07 V) que es capaz de convertir contaminantes orgánicos en compuestos más sencillos como CO₂, H₂O y aniones sulfato y nitrato. Una vez que el O₃ se disuelve en H₂O, reacciona con varios compuestos orgánicos de dos maneras posibles: oxidación directa como O₃ molecular o una reacción indirecta a través de la formación de oxidantes secundarios como los radicales libres, es decir, •OH. El O₃ y •OH son agentes oxidantes fuertes y por lo cual son competentes en oxidar diversos contaminantes orgánicos, así reducir la DQO en las aguas residuales. Algunos investigadores propusieron distintas vías minuciosas para aclarar la producción de •OH, y la reacción química general que implica la generación de •OH se expresa de la siguiente manera:



En el sistema O₃/irradiación UV, se genera H₂O₂ como un oxidante primario adicional a través de la fotólisis del O₃, lo que produce la formación de •OH. El H₂O₂ genera, además, radicales •OH, como se muestra en las siguientes reacciones:



Lo anterior optimiza la aplicación de ozono y las concentraciones de •OH (E⁰=2,80 V) que se producen por la descomposición del O₃, en soluciones acuosas, producen un aumento significativo de la velocidad de degradación de los contaminantes. Además, el H₂O₂ es un ácido débil con un potencial oxidante relativamente alto (E⁰=1,77 V), que, por sí solo, no conduce a la generación de radicales hidroxilo. Las bajas velocidades de reacción hacen que el proceso sea ineficaz cuando se oxidan contaminantes más refractarios y recalcitrantes. Por lo tanto, la adición de H₂O₂ con O₃ aumenta la velocidad de oxidación del O₃ al permitir una mejora en el rendimiento cuántico de la formación de •OH.

El ozono puede atacar selectivamente los dobles enlaces (ejemplo, C=C, C≡C) y

los grupos funcionales (ejemplo, $-\text{CH}_3$, $-\text{OH}$ y $-\text{CH}_3$) en condiciones ácidas o neutras con concentraciones limitadas. Las melanoidinas, polifenoles y otros contaminantes de las aguas residuales de la destilería tienen enlaces dobles ($\text{C}=\text{C}$ y $\text{C}\equiv\text{C}$) y otros grupos funcionales en su estructura pueden ser descompuestos selectivamente por O_3 sin la oxidación extensa de la gran materia orgánica. (44, pp. 10–11)

Las matrices acuosas pueden contener contaminantes que no reaccionan con el O_3 (ejemplo, ácidos carboxílicos o compuestos que solo tienen enlaces simples $\text{C}-\text{C}$) o reaccionan mal con él, en cuyo caso aún puede ser conveniente producir O_3 y usarlo como un precursor de $\bullet\text{OH}$. Hay varias formas de generar $\bullet\text{OH}$ a partir de O_3 : basificación, fotólisis UV (la radiación UVC es especialmente adecuada para este fin), adición de H_2O_2 o cualquier combinación de estas. El principal inconveniente en el uso de O_3 para oxidación directa o como precursor de $\bullet\text{OH}$, está relacionado con la posible presencia de bromuro en la matriz del agua. En presencia de Br, el O_3 puede producir bromato cancerígeno (BrO_3) (U. von Gunten, 2003); además, el Br puede actuar como catalizador en la oxidación de precursores que contienen N en N-nitrosaminas cancerígenas. (47, p. 12)

c) **Fotocatálisis**

En la fotocatalisis sucede la fotoactivación de una reacción química a través de la absorción de un cuanto de luz de una especie (un material inorgánico u orgánico, una molécula) que permanece sin cambios al final del proceso químico (fotocatalizador). Aunque se han investigado procesos fotocatalíticos activados por materiales orgánicos o moléculas individuales para la reducción de contaminantes biorrecalcitrantes, solo la fotocatalisis con semiconductores inorgánicos (ejemplo, TiO_2 , ZnO) ha encontrado una aplicación real.

El primer paso en un proceso fotocatalítico es la absorción por parte del semiconductor de un fotón con $h\nu \geq E_g$ (E_g es la brecha de energía del semiconductor). La absorción genera un par electrón/hueco unido que puede recombinarse (y disipar energía) o disociarse para generar un electrón de banda de conducción termalizado (e^-_{cb}) y un hueco de banda de valencia (h^+_{vb}). El e^-_{cb} y h^+_{vb} pueden migrar a la superficie donde quedan atrapados en sitios superficiales localizados, pueden recombinarse o transferirse a especiesceptoras adsorbidas en la superficie o en solución. El e^-_{cb} reacciona con los aceptores de electrones (el oxidante omnipresente en la fotocatalisis es el O_2 , a menos que se elimine a propósito del sistema), mientras que h^+_{vb} reacciona con los donantes de electrones (ejemplo, el sustrato que se va a degradar).

La transferencia electrón/hueco en la superficie puede generar diversas especies reactivas, cuya concentración y naturaleza química está estrictamente relacionada al

fotocatalizador. (47, p. 11)

La degradación fotocatalítica es una tecnología de tratamiento potencial, eficiente y rentable para mejorar degradar contaminantes peligrosos y no biodegradables, como los contaminantes orgánicos recalcitrantes. El proceso de tratamiento fotocatalítico se fundamenta en la combinación de agentes oxidantes con un catalizador y/o luz. La base de la fotocatalisis es la fotoexcitación de un sólido semiconductor como resultado de la absorción de radiación electromagnética, a menudo, pero no exclusivamente, en el espectro ultravioleta cercano. Bajo irradiación UV cercana, un material semiconductor puede ser excitado por fotones que poseen energías de magnitud suficiente para producir electrones de banda de conducción (e^-) y huecos de banda de valencia (h^+). El e^- y h^+ migran desde sus respectivas bandas a la superficie del semiconductor. Reaccionan con una especie redox adecuada en el medio ambiente, lo que podría conducir a la división de H_2O (generación de H_2 y O_2) y formación de radicales $\bullet OH$ y $\bullet O_2^-$. Estos radicales pueden degradar una amplia gama de compuestos orgánicos recalcitrantes y desintoxicar iones HM (ejemplo, Cr^{6+} y As^{3+}).

El proceso de degradación fotocatalítica utilizando luz solar como fuente de irradiación mostró una aplicación potencial para la decoloración y/o reducción de la DQO de efluentes. El sistema TiO_2/H_2O_2 parece ser más eficiente en comparación al utilizar individualmente H_2O_2 y TiO_2 . (44, pp. 13–14)

d) Fotólisis

En la fotólisis directa UV, el principal mecanismo de eliminación es el proceso de degradación a través de la absorción de la radiación incidente de la luz UV. Por lo tanto, la aplicación generalmente se enfoca en los contaminantes que absorben fuertemente la radiación UV. La mayor parte de los absorbentes de luz UV contienen enlaces dobles o enlaces dobles conjugados, que incluyen átomos de carbono, nitrógeno u oxígeno. La fotólisis UV puede reducir selectivamente algunos compuestos orgánicos, pero, por sí sola, no es lo suficientemente eficiente para la eliminación de la contaminación. Sin embargo, muchos investigadores han descubierto que la fotólisis UV puede mejorar el potencial de oxidación de algunos procesos de oxidación. Cuando la fotólisis UV se combina con la ozonización (UV/ O_3), se produce más $\bullet OH$ a través de la fotólisis de H_2O_2 como intermedio de reacción y los contaminantes orgánicos se descomponen más completamente. La generación de $\bullet OH$ es fundamental para el proceso, ya que el $\bullet OH$ es en gran parte responsable del éxito de este proceso. Este proceso combina H_2O_2 y luz ultravioleta en un efecto sinérgico para degradar los contaminantes y los microorganismos patógenos en el agua contaminada. En los procesos de tratamiento de aguas residuales, la oxidación UV/ O_3 se puede utilizar como

pretratamiento para procesos biológicos en los que los contaminantes complejos se descomponen en sustancias más biodegradables. La fotodegradación UV, por otro lado, puede degradar las melanoidinas que causan el color, lo que lleva a una eliminación completa del color después de una breve duración de la irradiación. Sin embargo, el proceso UV consume mucha energía y es incapaz de reducir el TOC de manera efectiva. Durante la fotodegradación, la mineralización de los compuestos orgánicos recalcitrantes conduce a la desaparición del color. El principal inconveniente de utilizar los procesos de oxidación mencionados anteriormente es su alto costo operativo. (44, pp. 15–16)

e) **Sonicación/sonólisis**

La oxidación sonoquímica emplea el uso de ultrasonidos, lo que da como resultado el fenómeno de cavitación. Ese fenómeno se define como la formación, crecimiento y posterior colapso de microburbujas o cavidades que ocurren en intervalos de tiempo extremadamente pequeños (microsegundos) y liberan grandes magnitudes de energía en millones de tales ubicaciones en el reactor. Las reacciones sonoquímicas se inducen con la irradiación acústica de líquidos de alta intensidad a frecuencias que producen cavitación (20 a 1000 kHz). Generalmente, se cree que existen tres sitios potenciales para las reacciones químicas en los líquidos irradiados ultrasónicamente: la burbuja de cavitación misma, la región interfacial entre la burbuja y el líquido circundante, y la solución a granel. La irradiación ultrasónica destruye eficazmente los contaminantes en el agua debido a las altas concentraciones localizadas de $\bullet\text{OH}$ y H_2O_2 en la solución, así como también a las altas temperaturas y presiones localizadas. Sin embargo, la escala de tiempo y potencia disipada necesaria para obtener la mineralización total de los contaminantes en el caso de la sonólisis no son económicamente aceptables. Por lo tanto, se encuentra que el ultrasonido es más efectivo cuando se usa en combinación con otros procesos de tratamiento convencionales que como un proceso independiente. Además, la aplicación de la sonólisis en el tratamiento de efluentes complejos está limitada por los altos costos de instalación/proceso, así como por la baja remoción de DQO. (44, pp. 16–17)

Usando ondas ultrasónicas de alta frecuencia, se forman burbujas de cavitación en solución. Debido a la alta temperatura (~ 5500 K) y presión (~ 500 atm) alcanzada dentro de las burbujas, cuando estas colapsan promueven la disociación del agua en H^\bullet y $\bullet\text{OH}$ y/o la degradación directa de los contaminantes (El mecanismo de degradación dominante se ve fuertemente afectado por las propiedades hidrofílicas/hidrofóbicas de las moléculas a degradar). La reacción entre estas especies y O_2 disuelto en solución puede dar lugar a la formación de otros oxidantes, como HO_2^\bullet y H_2O_2 . El Fenton asistido

por ultrasonido produjo un mejor rendimiento que el Fenton convencional, pero fue menos activo que el tratamiento con foto-Fenton. Un inconveniente importante de la sonólisis son las concentraciones elevadas de radicales reactivos (ejemplo, $\cdot\text{OH}$, $\text{H}\cdot$, $\text{O}_2\cdot^-$) confinados en un volumen pequeño, lo que favorece la recombinación radical-radical y disipa la energía ultrasónica. Curiosamente, las altas concentraciones de aniones en el agua producida salina pueden inhibir dicha recombinación y producir radicales secundarios ($\text{CO}_3\cdot^-$, $\text{Cl}_2\cdot^-$, $\cdot\text{NO}_2$) que pueden estar implicados en la degradación de los contaminantes, aunque con el potencial de formar subproductos nocivos. Un segundo inconveniente es la dificultad de escalar los reactores desde la escala de laboratorio (o pequeña) a dimensiones más grandes (grandes flujos de aguas residuales). (47, p. 15)

f) Oxidación electroquímica

Últimamente se han desarrollado nuevos POA fundamentados en tecnología electroquímica, es decir, procesos electroquímicos de oxidación avanzada (EAOPs). Estos procesos usan electrones como reactivo principal, pero también requieren la presencia de electrolitos de apoyo. En la oxidación electroquímica, los contaminantes son destruidos por oxidación directa o indirecta. En un proceso directo, los contaminantes se adsorben primero en la superficie del ánodo y después se destruyen mediante la reacción de transferencia de electrones anódicos. En un proceso de oxidación indirecta, los oxidantes fuertes como el hipoclorito/cloro, el O_3 o el H_2O_2 se generan electroquímicamente mediante el proceso anódico o catódico. Los contaminantes orgánicos se destruyen luego en la solución por la reacción de oxidación del oxidante generado. La oxidación electroquímica ofrece varias ventajas para la prevención y la remediación, como una alta eficiencia energética, posibilidad de automatización, fácil manejo debido a la sencillez del equipo requerido y seguridad. de condiciones ácidas. (44, pp. 17–18)

La optimización de los parámetros operativos, incluido el material de los electrodos, distancia entre los electrodos, densidad de corriente, temperatura, pH, tiempo de reacción o el caudal, es de fundamental importancia para lograr buenas eficiencias de eliminación. Generalmente, el incremento de la densidad de corriente, temperatura y tiempo de reacción produce una mayor eliminación de contaminantes orgánicos. El papel del pH es más complejo: aunque las conductividades más altas se obtienen a pH bajo o alto (debido a una mayor cantidad de iones en la solución), a menudo las condiciones óptimas se obtienen alrededor de un pH neutro. (47, p. 13)

g) Oxidación por aire húmedo

La oxidación húmeda, también llamada oxidación por aire húmedo (WAO), se

refiere a la oxidación de material orgánico e inorgánico suspendido o disuelto en fase líquida con oxígeno disuelto a elevadas temperaturas (125-320 °C) y presiones (0,5-20 MPa) utilizando una fuente gaseosa de oxígeno (O₂)/aire. A temperaturas y presiones elevadas, la solubilidad del O₂ en la solución acuosa aumenta y proporciona una fuerte fuerza impulsora para la oxidación de los contaminantes. Las presiones elevadas son para mantener las soluciones acuosas en estado líquido. La WAO es una técnica de pretratamiento bien establecida para aguas residuales industriales complejas y peligrosas que están demasiado diluidas para incinerar y demasiado concentradas para el tratamiento biológico. (44, p. 18)

En la oxidación catalítica con aire húmedo (CWAO), el aire es el oxidante y se mezcla con las aguas residuales, que circulan sobre un catalizador, a menudo de naturaleza heterogénea, como óxidos metálicos o metales preciosos soportados. Las condiciones de operación requieren una temperatura superior al punto de ebullición del agua (100 °C a 1 atm) y una presión de aire entre 0,5 y 20 MPa para evitar una evaporación excesiva del agua. En la oxidación catalítica húmeda de peróxido (CWPO), se utiliza H₂O₂ como oxidante y el proceso tiene lugar en condiciones operativas suaves (temperaturas en el rango de 20-80 °C y presión atmosférica). (47, p. 15)

2.2.4. Marco normativo.

Respecto de las normas internacionales y nacionales relacionadas a la contaminación de las aguas tenemos:

- La Constitución Política del Perú (1993), en su artículo 66 señala que el recurso hídrico es patrimonio de la Nación y que el Estado es soberano en su aprovechamiento.
- Política de Estado 33 respecto a los recursos hídricos, que fue aprobada en la sesión 101 del Foro del Acuerdo Nacional, en el marco de la conmemoración de su décimo aniversario, el 14 de agosto de 2012. En ella, el Estado Peruano se compromete a cuidar el agua como patrimonio de la Nación y como derecho fundamental de la persona humana al acceso al agua potable, imprescindible para la vida y el desarrollo humano de las actuales y futuras generaciones.
- El Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), mediante el cual se define las líneas directrices y los programas de medidas de la política hídrica del Perú para los próximos 22 años (2035); lo es también coordinar la planificación de la gestión del agua y definir soluciones a problemas de interés nacional y que, por tanto, exceden el ámbito de los Planes de Gestión de Recursos Hídricos en la Cuenca (PGRHC).
- Ley N.º 28611, Ley General del Ambiente que ordena el marco normativo legal

para la gestión ambiental en el Perú. Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país.

- Ley N.º 29338, Ley de Recursos Hídricos que regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Comprende el agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a esta. Se extiende al agua marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable. Su finalidad es regular el uso y gestión integrada del agua, la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, así como en los bienes asociados a esta.
- Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. Mediante el cual se compila las disposiciones aprobadas mediante el Decreto Supremo N.º 002-2008-MINAM, el Decreto Supremo N.º 023-2009-MINAM y el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM, que aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, quedando sujetos a lo establecido en el presente Decreto Supremo y el Anexo que forma parte integrante del mismo. Esta compilación normativa modifica y elimina algunos valores, parámetros, categorías y subcategorías de los ECA, y mantiene otros, que fueron aprobados por los referidos decretos supremos.
- Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM. Mediante el cual se aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de Plantas de Tratamiento de Agua Residuales Domésticas o Municipales (PTAR).

- Decreto Supremo N.º 002-2008-MINAM. Mediante el cual se aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para Agua, se establece el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente.

2.3. Definición de términos básicos

Agua

Compuesto aparentemente básico que consta de dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno y es absolutamente necesario para la supervivencia de todas las formas de vida en la Tierra. (48, p. 70)

Contaminación del agua

Es la presencia de componentes o factores químicos, físicos o biológicos que producen el deterioro de una determinada masa de agua con respecto de algún uso beneficioso. (49, p. 261)

Agua residual textil

Son aguas residuales que contienen productos químicos biodegradables y no biodegradables, como colorantes, dispersantes, etc. (50, p. 225)

Procesos de oxidación avanzada

Son procesos que se basan en la generación *in situ* de oxidantes fuertes, es decir, radicales hidroxilos y radicales sulfatos, para la oxidación de contaminantes orgánicos. (51, pp. 3–4)

Proceso Fenton

Es aquel proceso que se basa en la oxidación de contaminantes orgánicos por radicales hidroxilos producidos por el peróxido de hidrógeno como oxidante e iones de hierro (Fe^{2+}) como catalizador de la reacción. (52, p. 233)

Proceso foto Fenton

Es la combinación de peróxido de hidrógeno y radiación UV con un ion Fe^{2+} o Fe^{3+} donde producen más radicales hidroxilos y, a su vez, aumentan la tasa de degradación de los contaminantes orgánicos. (53, p. 51)

Proceso foto Fenton a pH neutro

Es el proceso donde se combina el Foto Fenton y un agente quelante con la finalidad de “extender el rango de pH sobre el cual el hierro es soluble porque el ligando quelante compite favorablemente con el ion hidróxido por la coordinación y los complejos quelados son típicamente solubles. (54, p. 233)

Colorante

El colorante es básicamente un químico que se une al sustrato y le da color. (55, p. 3)

Agente quelante

Son sustancias capaces de solubilizar el hierro en un rango de pH más amplio para formar especies fotoactivas. (54, p. 233).

EDTA

El ácido etilendiaminotetraacético ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$) tiene dos donantes de N terciario y cuatro grupos de donantes de O- carboxílicos, es un ligando hexadentado capaz de producir complejos estables (M-L) con muchos iones metálicos en una proporción de 1:1 en un amplio rango de pH. (56, p. 2)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de la investigación.

El método de la investigación es el Método Científico porque consiste en la aplicación de tres pasos importantes en orden de tiempo: Problema-hipótesis-contrastación. El primer paso para realizar una investigación es la identificación del problema para luego plantear una hipótesis y contrastarla (57, pp. 3–4).

Se observó el problema de la contaminación que genera la descarga de las aguas residuales textiles generadas por una empresa textil del distrito de Hualhuas, se planteó la posible solución, se aplicó el tratamiento propuesto y, a partir de los resultados, se realizaron el análisis, la discusión y la prueba de hipótesis.

3.1.2. Alcance de la investigación.

El alcance de la investigación es explicativo porque se identificarán los factores del proceso foto Fenton con agente quelante y luz solar que influyen en el tratamiento de aguas residuales textiles y analizará los efectos del proceso foto Fenton con agente quelante y luz solar en el tratamiento de aguas residuales textiles, para que, finalmente, determinar la factibilidad del proceso foto Fenton con agente quelante y luz solar en el tratamiento de aguas residuales textiles. Es explicativo porque se manipuló variables independientes o factores y se evaluó el efecto en la variable dependiente y el investigador formula preguntas acerca de las causas de los fenómenos en estudio, tratando de identificar relaciones de causalidad (58, p. 80).

La investigación es del tipo aplicada porque está orientada a determinar, a través del conocimiento científico, los medios (metodologías, protocolos y tecnologías) por los cuales se puede cubrir una necesidad reconocida y específica (59, p. 5). En la investigación, se aplicó el proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles, la cual involucró la manipulación de la dosis del agente quelante y H_2O_2 , para mitigar la contaminación generada por la descarga del efluente.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental, diseño factorial, debido a que se manipuló dos o más variables independientes e incluyen dos o más niveles o modalidades de presencia en cada una de las variables independientes. (60, p. 148).

Específicamente, se utilizó el diseño factorial de bloques aleatorizados 3^2 , el cual

tiene dos factores, cada uno con tres niveles. Las combinaciones de tratamientos de este diseño se muestran en la Figura 7.

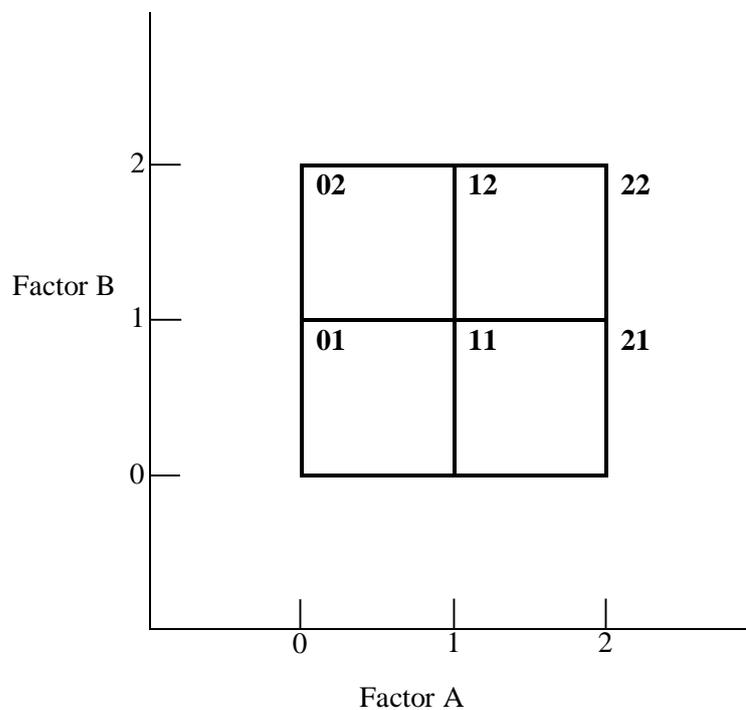


Figura 7. Combinaciones de tratamientos en el diseño 3^2 .

Extraída de “Diseño y Análisis de Experimentos” (61).

Se realizaron dos repeticiones, con lo cual el número de experimentos fue 18.

En la Tabla 3, se presentan los valores reales de las variables independientes con sus niveles codificados:

Tabla 3.

Valores reales de las variables independientes con sus niveles codificados

Variable independiente	Niveles		
	0	1	2
Dosis del agente quelante (mM)	1,125	1,350	1,575
Dosis de H ₂ O ₂ (ppm)	500	750	1000

En la siguiente figura, se muestran imágenes del tratamiento que se realizó:



Figura 8. Tratamiento de las aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población.

La población “es un conjunto infinito o finito de sujetos con características similares o comunes entre sí” (57, p. 113). La población de la investigación son las aguas residuales generadas por las empresas textiles que se encuentran en el distrito de Hualhuas, provincia de Huancayo, departamento de Junín. El volumen de la población varía de acuerdo a la demanda de las prendas de vestir, mantos, frazadas y/o tapices de lana de oveja, alpaca y algodón.

3.3.2. Muestra.

“La muestra es un subgrupo considerado como una parte representativa de la población o el universo” (57, p. 118). La muestra es 18 L de las aguas residuales del teñido de una empresa textil del distrito de Hualhuas, provincia de Huancayo, departamento de Junín, al cual se realizará el tratamiento con el proceso foto Fenton con quelante.

La técnica de muestreo no probabilístico que se utilizó es por conveniencia, mediante el cual se selecciona aquellos casos accesibles que acepten ser incluidos. Esto, fundamentado en la conveniente accesibilidad y proximidad de los sujetos para el investigador (62, p. 230). Debido a que la empresa textil del distrito de Hualhuas, a diferencia de otras empresas, aceptó la participación del proceso de teñido y el muestreo de las aguas residuales textiles.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos.

La técnica de recolección de datos que se usó es el experimento, en la investigación cuantitativa es una de las técnicas utilizadas. (63, p. 192)

En el experimento se realizó, a nivel laboratorio, el tratamiento de aguas residuales textiles con el proceso foto Fenton con agente quelante, se manipularon los factores o variables independientes dosis del agente quelante (EDTA) y H_2O_2 y se midió el color del efluente para determinar el efecto en la variable dependiente decoloración de las aguas residuales textiles. En este proceso, se utilizaron instrumentos de medición como colorímetro, pHmetro y balanza analítica digital.

3.4.2. Materiales.

Se utilizaron los siguientes materiales:

- 02 vasos de precipitación de 1 L.
- 03 vasos de precipitación de 250 mL.
- 02 pipetas de 1, 2 y 5 mL.
- 01 propipeta.
- 04 lunas de reloj.
- 01 espátula.
- 01 piseta.
- 02 varillas de vidrio.
- 02 magnetos.
- Viales para muestras.

3.4.3. Reactivos.

Los reactivos son:

- Ácido etilendiaminotetraacético (EDTA).
- Cloruro férrico hexahidratado ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$).

- Solución de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30%.
- Solución de hidróxido de sodio (NaOH) de 0.5 M.
- Solución de ácido clorhídrico (HCl) de 0.2 M.
- Agua destilada.

3.4.4. Equipos e instrumentos.

Los equipos e instrumentos que se utilizaron son:

- Colorímetro. Marca Hanna y serie HI727. Resolución 5 UCP. Última fecha de calibración: 25/08/2022.
- Balanza analítica de capacidad de 210 g y legibilidad: 0,0001 g.
- Medidor pH y EC digital portátil. Marca Hanna y modelo Waterproof HI98129.
- Agitador magnético con placa calefactora. Marca DLAB y modelo MS-H280-Pro. Rango de 0 a 280 °C y RPM de 0 a 1500.
- Cronómetro digital.

3.4.5. Procedimiento.

El procedimiento de la investigación consistió en:

a. Muestreo

Primero, se contactó con la representante de la empresa textil que se encuentra en el distrito de Hualhuas para participar en el proceso de teñido y al final muestrear las aguas residuales según el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA), antes de que sean vertidos al alcantarillado.

La empresa textil realiza el teñido en un ambiente que se ubica según las coordenadas geográficas: Latitud: -11,98537 y longitud: -75.26036; o coordenadas UTM: 471655.95E 86750503675N 18L. Pero sus productos los venden en un ambiente que se ubica en la Carretera Central en el distrito de Hualhuas, departamento de Junín.

La imagen del local se presenta en lo siguiente:



Figura 9. Lugar de venta de los productos de la empresa textil.

En la Figura 10, se muestran imágenes de la participación del proceso de teñido.



Figura 10. Proceso de teñido de lana de oveja.

En la Figura 11, se presenta la medición de algunos parámetros de las aguas residuales textiles.



Figura 11. Medición de parámetros físicos de las muestras de las aguas residuales textiles.

b. Determinación de la dosis del agente quelante y H_2O_2 en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton

Para determinar los mejores valores de la dosis del agente quelante y H_2O_2 en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton, se:

- Muestreo las aguas residuales textiles de una empresa que se encuentra en el distrito de Hualhuas, provincia de Huancayo, departamento de Junín
- Pesó los reactivos.
- Lavó y enjuagó un vaso de precipitación de 1 L con agua destilada.
- Agregó 1 L de la muestra de las aguas residuales textiles al vaso de precipitación.
- En un ambiente donde no incida la irradiancia solar, se colocó el vaso en el agitador magnético.
- Añadió 0,378; 0,393 o 0,459 g de EDTA (1,125; 1,350 o 1,575 mM), en función al diseño experimental.
- Encendió el agitador y se fijó en 20 °C y 1300 rpm.
- Agitó la muestra.
- Agregó 0,243 g de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (50.2 mg de Fe^{3+} equivale a 0,9 mM de Fe^{3+})
- Agitó 30 minutos.
- Fijó el pH en 7 agregando la solución de HCl o NaOH, según correspondía.

- Trasladó el sistema (agitador y vaso de precipitación con muestra y reactivos) a un lugar donde incida los rayos solares.
- Agregó 1,67; 2,50 o 3.33 mL de la solución de peróxido de hidrógeno al 30% (500, 750 o 1000 ppm), en función al diseño experimental.
- Después de una hora, se muestreó 40 mL de las aguas residuales textiles en tratamiento con proceso foto Fenton para la determinación del color con el colorímetro. Las muestras se rotularon y transportadas a la empresa Grupo JHACC Laboratorio de Análisis Ambientales (los respectivos certificados se presentan en el Anexo A).

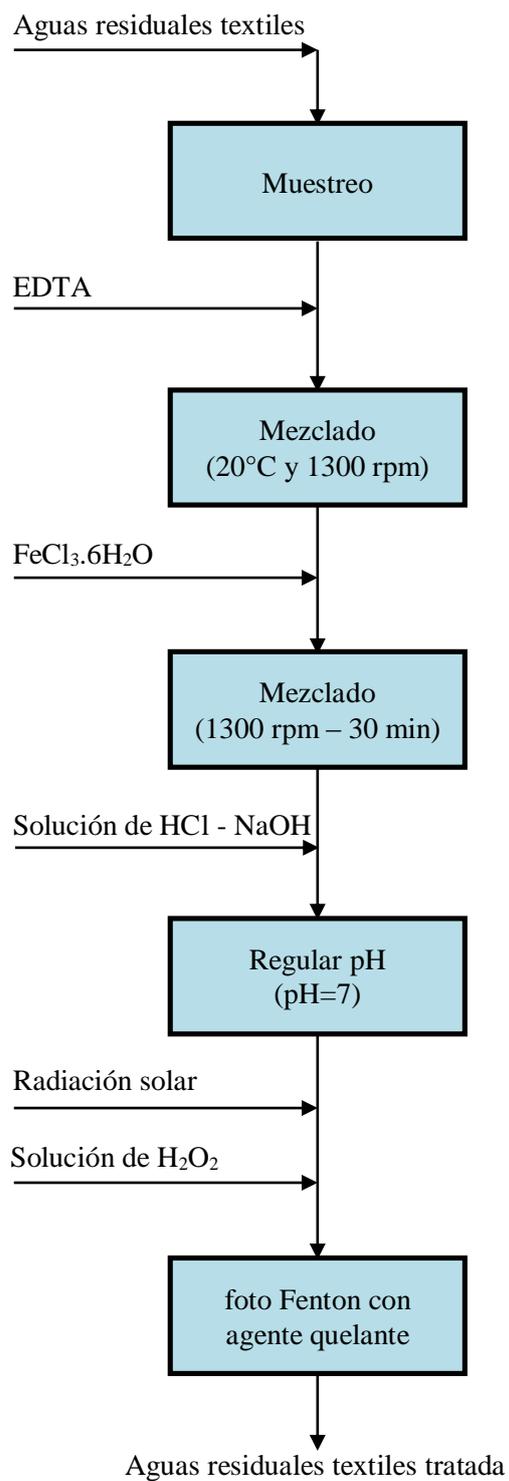


Figura 12. Diagrama del proceso del experimento.



Ácido etilendiaminotetraacético (EDTA)



Cloruro férrico hexahidratado
($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).



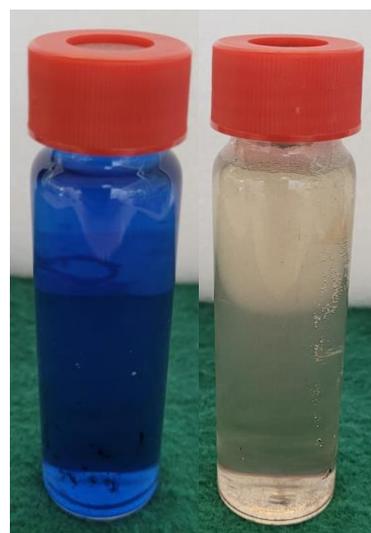
Medición de pH



Adición de H_2O_2



Agua residual textil tratada



Muestras para análisis (inicial y final)

Figura 13. Desarrollo de los experimentos

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.1.1. Determinación de la dosis del agente quelante y de H₂O₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton.

a. Caracterización de las aguas residuales textiles

Para los experimentos, se muestrearon dos días diferentes las aguas residuales textiles generados en el teñido de lana de oveja de color azul, los parámetros medidos en el lugar se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 4.

Caracterización de las aguas residuales textiles

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2
Color (PCU)	1050	1090
pH	4.58	4.62
Temperatura (°C)	51,2	52.3
Total de sólidos disueltos (ppm)	307	325
Conductividad (μS)	611	625

PCU=Unidades Platino-Cobalto.

b. Medidas estadísticas descriptivas de las variables

En la Tabla 4, se presentan las principales medidas estadísticas descriptivas del porcentaje de decoloración en función de los niveles de las variables independientes dosis del agente quelante y de H₂O₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton

Tabla 5.*Estadísticos descriptivos del tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton*

Estadístico	Dosis del agente quelante (mM)			Dosis de H ₂ O ₂ (ppm)		
	1,125	1,350	1,575	500	750	1000
Media	42,367	54,982	70,842	46,642	64,713	56,835
Error estándar	6,714	1,270	3,310	6,159	3,504	7,485
Mediana	35,970	56,075	74,525	51,175	63,085	57,695
Varianza	270,458	9,671	65,738	227,625	73,648	336,173
Desviación estándar	16,446	3,110	8,108	15,087	8,582	18,335
Mínimo	27,520	50,920	58,570	27,520	55,960	35,240
Máximo	63,330	58,720	78,440	62,840	76,150	78,440

Para la variable dosis de H₂O₂, se utilizó como unidad de concentración ppm (mg/L) porque es común en las investigaciones de fotocatalisis (proceso Fenton y otros) y se usó como reactivo una solución de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30% p/v.

c. Color de las aguas residuales textiles después del tratamiento por el proceso foto Fenton

Considerando el diseño experimental con las respectivas variables independientes, en la Tabla 6 se presenta el color de las aguas residuales textiles después del tratamiento por el proceso foto Fenton.

Tabla 6.

Color en función de las dosis del agente quelante y de H₂O₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton

N.º	Dosis del agente quelante (mM)	Dosis de H ₂ O ₂ (ppm)	Color (PCU)		
			I	II	Promedio
1	1.125	500	750	790	770,00
2	1.125	750	385	405	395,00
3	1.125	1000	680	690	685,00
4	1.350	500	510	535	522,50
5	1.350	750	460	480	470,00
6	1.350	1000	455	450	452,50
7	1,575	500	435	405	420,00
8	1,575	750	275	260	267,50
9	1,575	1000	260	235	247,50

PCU=Unidades Platino-Cobalto.

4.1.2. Análisis de los efectos del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales por el proceso foto Fenton.

Para determinar la magnitud y la importancia de los efectos de los factores o las variables independientes dosis del agente quelante y de H₂O₂ en la respuesta porcentaje de decoloración, se muestra el respectivo diagrama de Pareto en la Figura 14.

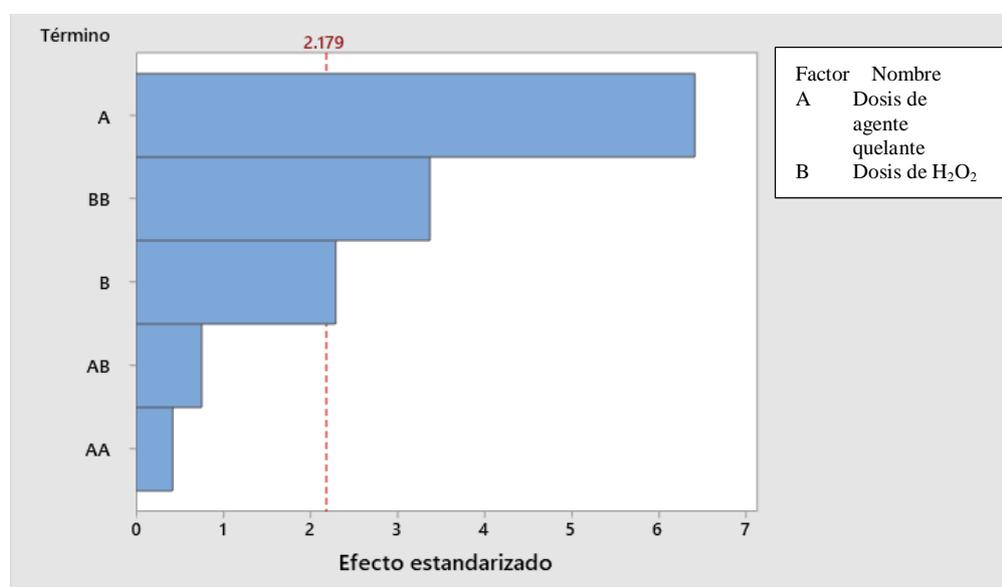


Figura 14. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Como las barras de los factores dosis de agente quelante (A), [dosis de H₂O₂]²

(BB) y dosis de H_2O_2 (B) cruzan la línea de referencia, son estadísticamente significativas, quiere decir que son estadísticamente significativos sobre el porcentaje de decoloración en el nivel de 0,05 con los términos actuales del modelo. La interacción de los factores (AB) ni el factor [dosis de agente quelante]² (AA) no son significativas estadísticamente.

Los mismos resultados se evidencian en la gráfica de efectos principales que se presenta a continuación:

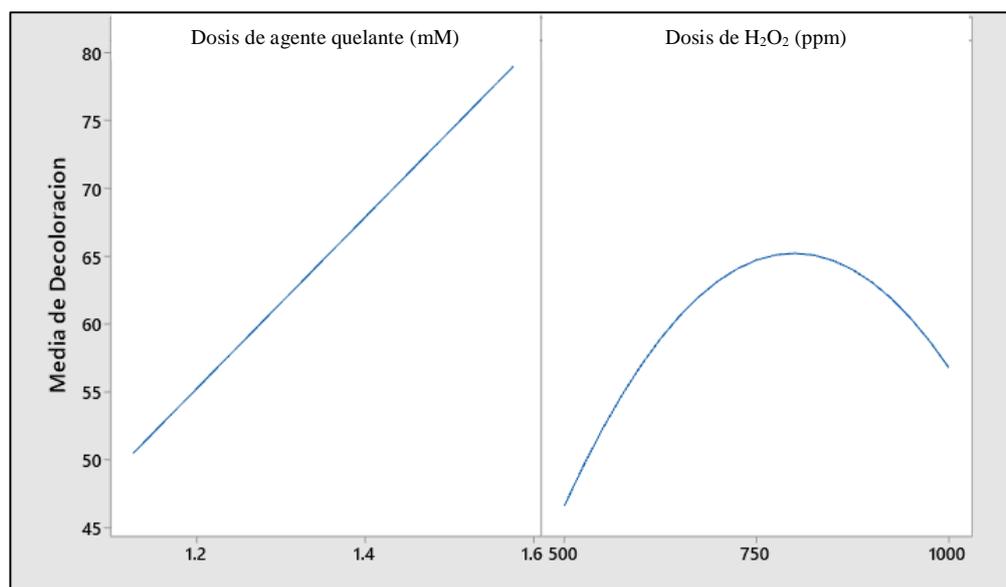


Figura 15. Gráfica de efectos principales para el porcentaje de decoloración.

De la Figura 15, el factor dosis de agente quelante afecta el porcentaje de decoloración, la relación es directa, a mayor dosis la decoloración se incrementa en el intervalo considerado de 1,125 a 1,575 mM. Respecto del factor dosis de H_2O_2 el efecto es cuadrático, debido a que la decoloración es máxima para un valor de 818 ppm, antes y después los valores de decoloración son menores. Entre los dos factores estudiados, la dosis de agente quelante presenta un efecto mayor que la dosis de H_2O_2 .

4.1.3. Evaluación de la eficiencia del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles.

En la tabla siguiente, se presenta el porcentaje de decoloración que se logró en los diferentes experimentos del tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton, el cual mide la eficiencia de este proceso en el tratamiento de este efluente.

Tabla 7.

Decoloración en función de las dosis del agente quelante y de H₂O₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton

N.º	Dosis del agente quelante (mM)	Dosis de H ₂ O ₂ (ppm)	Decoloración (%)		
			I	II	Promedio
1	1.125	500	28,57	27,52	28,05
2	1.125	750	63,33	62,84	63,09
3	1.125	1000	35,24	36,70	35,97
4	1.350	500	51,43	50,92	51,17
5	1.350	750	56,19	55,96	56,08
6	1.350	1000	56,67	58,72	57,69
7	1,575	500	58,57	62,84	60,71
8	1,575	750	73,81	76,15	74,98
9	1,575	1000	75,24	78,44	76,84

a. Determinación de la dosis de agente quelante y dosis de H₂O₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton

A partir del diseño experimental de 3², se realizó la optimización aplicando el método de superficie. El resumen del modelo se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 8.

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7,69521	82,97%	75,87%	63,34%

A partir del valor de “R-cuad.”, el 82,97 % de los datos están representados por el modelo matemático. El estadístico “R-cuad. (ajustado)” señala que el modelo ajustado explica el 75,87 % de la variabilidad en el porcentaje de decoloración.

El modelo matemático del porcentaje de decoloración que es función de los factores o las variables independientes dosis de agente quelante y dosis de H₂O₂ es:

$$\text{Decoloración} = -58 - 51 \times \text{AQ} + 0,283 \times \text{H}_2\text{O}_2 + 32,1 \times \text{AQ} \times \text{AQ} - 0,000208 \times \text{H}_2\text{O}_2 \times \text{H}_2\text{O}_2 + 0,0365 \times \text{AQ} \times \text{H}_2\text{O}_2$$

Nota:

AQ=Dosis de agente quelante.

H₂O₂= Dosis de H₂O₂.

Ahora se presenta la gráfica de superficie, de contorno y de optimización. La última gráfica muestra los valores óptimos de los factores: dosis de agente quelante y dosis de H_2O_2 en la que se logra una mayor decoloración de las aguas residuales textiles por el tratamiento con el proceso foto Fenton.

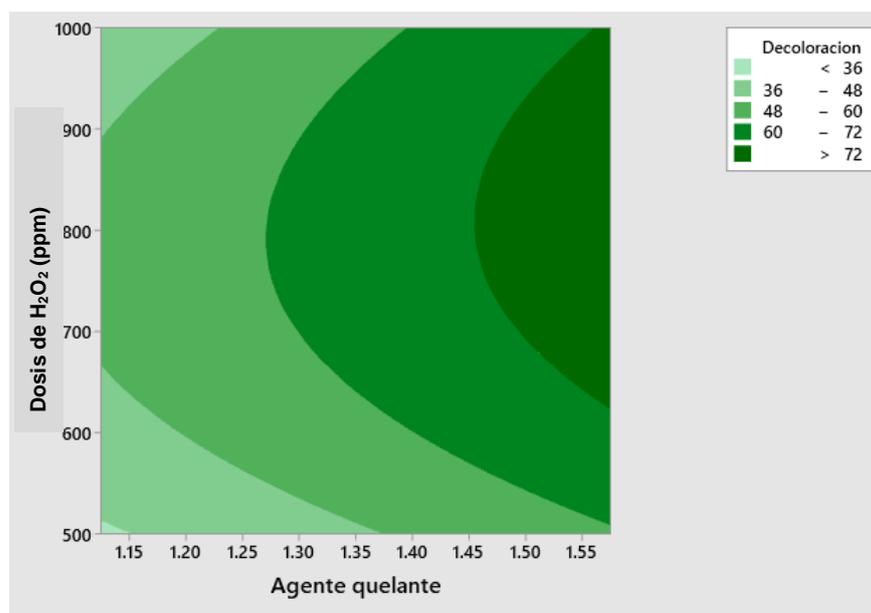


Figura 16. Gráfica de contorno del porcentaje de decoloración vs dosis de agente quelante y dosis de H_2O_2 .

El porcentaje de decoloración es mayor al 72 % cuando la dosis de H_2O_2 es entre aproximadamente 600 a 1000 ppm y dosis de agente quelante mayor a 1.450 mM. Mientras que es menor a 36 % para la dosis de H_2O_2 menor a 500 ppm y mayor a 900 ppm y dosis de agente quelante menor a 1.200 mM.

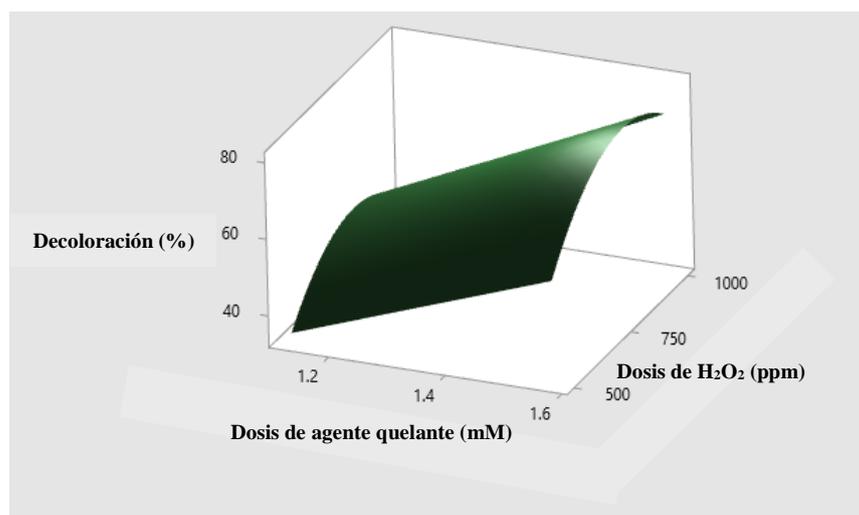


Figura 17. Gráfica de superficie del porcentaje de decoloración vs dosis de agente quelante y dosis de H_2O_2 .

Se observa que el porcentaje de decoloración tiene un comportamiento cuadrático para el factor dosis de H₂O₂ y lineal para dosis de agente quelante.

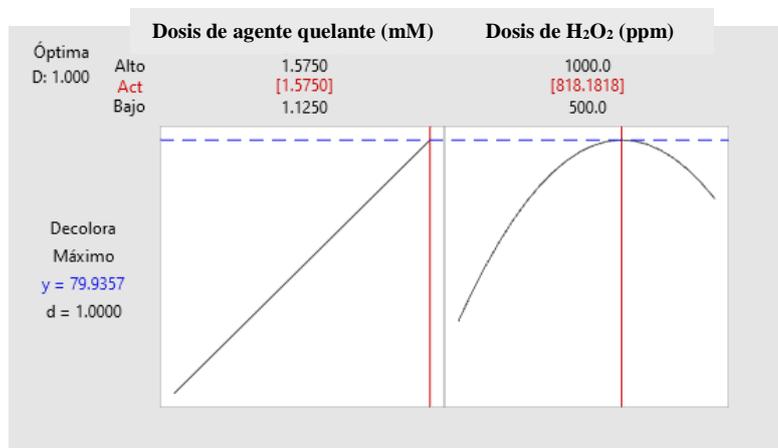


Figura 18. Valores óptimos de la dosis de agente quelante y dosis de H₂O₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton

De la optimización, los valores óptimos de los factores son:

- Dosis de agente quelante: 1,570 mM
- Dosis de H₂O₂: 818,18 ppm

A estas condiciones, el máximo porcentaje de decoloración de las aguas residuales textiles es 79,94 % en el tratamiento por el proceso foto Fenton con una desviación de 1,00.

4.1.4. Determinación de la factibilidad del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.

De los resultados, el mayor porcentaje de decoloración que se logró es de 76,84 % a una dosis del agente quelante y dosis de H₂O₂ de 1,575 mM y 1000 ppm, respectivamente. A estas condiciones, el color del efluente del tratamiento de las aguas residuales tiene un color promedio de 247,50 PCU, considerando solo el parámetro color puede ser utilizado como agua para ser potabilizada con tratamiento convencional o avanzado (Categoría 1: Poblacional y Recreacional. Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable). Por otra parte, el efluente no puede ser utilizado directamente para la extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales (Categoría 2), ni para el riego de vegetales ni para la bebida de animales (Categoría 3) debido a que el requerido es menor a 100 PCU.

4.2 Prueba de hipótesis

En este apartado, se determinó el efecto de dosis de agente quelante y dosis de H₂O₂ en la decoloración de las aguas residuales textiles en tratamiento por el proceso foto Fenton, para ello se utilizó un diseño factorial de 3². El planteamiento de la hipótesis consiste en:

H₀=Los efectos de interacción no están presentes.

H₁=Los efectos de interacción están presentes.

En la Tabla 9, se presentan los resultados del análisis de varianza:

Tabla 9.
Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	3461,66	692,33	11,69	0,000
Lineal	2	2743,79	1371,90	23,17	0,000
Dosis de agente quelante	1	2432,28	2432,28	41,07	0,000
Dosis de H ₂ O ₂	1	311,51	311,51	5,26	0,041
Cuadrado	2	684,16	342,08	5,78	0,017
(Dosis de agente quelante)×(Dosis de agente quelante)	1	10,56	10,56	0,18	0,680
(Dosis de H ₂ O ₂)×(Dosis de H ₂ O ₂)	1	673,60	673,60	11,38	0,006
Interacción de 2 factores	1	33,71	33,71	0,57	0,465
(Dosis de agente quelante)×(Dosis de H ₂ O ₂)	1	33,71	33,71	0,57	0,465
Error	12	710,60	59,22		
Falta de ajuste	3	689,62	229,87	98,63	0,000
Error puro	9	20,98	2,33		
Total	17	4172,26			

Interpretación: Se acepta la hipótesis alternativa debido a que la significación es menor que 0,05 para el factor dosis de agente quelante, dosis de H₂O₂ y [Dosis de H₂O₂]² por lo cual se concluye que hay diferencias significativas en el porcentaje de decoloración de las aguas residuales textiles en tratamiento por el proceso foto Fenton. Por lo contrario, para el factor [Dosis de H₂O₂]² e interacción Dosis de agente quelante×Dosis de H₂O₂, se rechaza la hipótesis alternativa y no influye significativamente en el grado de decoloración.

4.3 Discusión de resultados

El porcentaje de decoloración en el tratamiento de aguas residuales por el proceso foto Fenton que utiliza un agente quelante como el EDTA varía con la correcta quelación de metales (depende del estado oxidativo de los iones de hierro), pH de la solución de quelato de hierro y relación molar quelante-Fe (64, p. 233); los otros factores que influyen son la dosis del H_2O_2 , concentración inicial del contaminante y tiempo de tratamiento. Una de las ventajas de este método es que genera una mayor cantidad de radicales hidroxilos que el foto Fenton convencional, estos radicales son fuertes oxidantes que se caracterizan por atacar al contaminante (molécula orgánica) que se encuentra en las aguas residuales y capta el hidrógeno de la molécula o proporciona hidrógeno al doble enlace presente (65), la consecuencia de ello es la producción de nuevos compuestos intermedios oxidados de menor peso molecular o dióxido de carbono y agua cuando se produce la mineralización del contaminante.

La estructura química del quelante determina la relación molar correcta para alcanzar una alta eficiencia en el tratamiento con el foto Fenton con quelante. Por otra parte, el EDTA al ser un compuesto aminopolicarboxilatos, puede quelar casi todo el hierro presente en el agua residual o solución con una relación molar de quelante-Fe de 1:1 (64, p. 233). Pero esta relación tiene que ser determinada experimentalmente debido a que la relación 1:1 generalmente no es suficiente. En la relación molar, lo que se varía son las moles del quelante (EDTA) y las moles del Fe^{3+} se mantiene constante, por ello, en la investigación se evaluó la dosis del quelante de 1,125; 1,350 y 1,575 mM que corresponden a la relación molar quelante-Fe de 1,25; 1,50:1 y 1,75:1. No se consideraron mayores valores de la relación, porque en la literatura sugieren que sea menor a 2,00:1 cuando se desea tratar aguas residuales que contienen colorantes. Todo lo que se detalló se evidenció en los resultados, la relación de 1:1 no fue suficiente, para la relación 1,25:1; 1,50:1 y 1,75:1 los porcentajes de decoloración promedio fue 42,367 %; 54,982 % y 70,842 %, respectivamente. Significa que se necesita más quelante para asegurar una buena quelación y con ello una mejor decoloración. En los antecedentes se encuentran diferentes valores para la relación porque utilizaron otro quelante como el etilendiamina- N,N' -disuccínica y ácido oxálico; por ejemplo en la investigación (8) del 2020 y (11) del 2019 determinaron la relación de 1:1; mientras que en la investigación (14) del 2015 y (17) del 2014 utilizaron relaciones diferentes.

En los procesos Fenton, foto Fenton y otros que utilizan el H_2O_2 como agente oxidante, su dosis tiene que ser determinado experimentalmente, así como las dosis del agente quelante, porque la cantidad es función principalmente de la naturaleza y concentración del contaminante y que el método Fenton con agente quelante requiere mayores cantidades. El H_2O_2 mejora la decoloración de las aguas residuales o degradación del contaminante hasta cierto límite por la formación adicional de radicales

hidroxilo; pero en cantidades excesivas produce la eliminación de los radicales por H_2O_2 (66). Considerando el aspecto económico por el costo de la solución de H_2O_2 , también es necesario determinar la dosis exacta para maximizar la eficiencia del tratamiento y minimizar el costo por este reactivo.

En la investigación, el tiempo de tratamiento fue de una hora, debido a que en el tratamiento de aguas residuales textiles con foto Fenton con agente quelante según los antecedentes, la mayor eficiencia se da en los tiempos iniciales y luego no se incrementa significativamente (67), la razón es que al inicio es rápida la descomposición del H_2O_2 y se forman rápidamente radicales hidroxilo (68). De los experimentos, entre los 30 y 40 minutos, se produce la mayor decoloración de las aguas residuales en tratamiento, antes y después es mínima y no es significativa, por lo cual no justifica mayores tiempos para la decoloración. El tiempo de tratamiento varía según el método que se utiliza, si las aguas residuales son reales o sintéticas y las características del contaminante.

El mayor porcentaje de decoloración de 76,84 % en el tratamiento de aguas residuales por el proceso foto Fenton con agente quelante fue a las dosis de EDTA y dosis de H_2O_2 de 1,575 mM (relación molar de 1,75:1) y 1000 ppm, respectivamente. Mientras que los valores óptimos estimados por el método de superficie son 1,575 mM y 818,18 ppm, respectivamente. En los antecedentes, no se tiene un estudio similar al que se realizó, existen investigaciones que aplican el método que se utilizó en la tesis, pero a otras aguas residuales, otros aplicaron el Fenton y foto Fenton al tratamiento de una solución con un colorante específico, por ello, los porcentajes de decoloración son totalmente diferentes en cada uno de los estudios por las mismas condiciones del tratamiento. En la investigación (8) realizada el 2020, trataron aguas residuales municipales, eliminaron los contaminantes en un 60 % en 20 minutos y utilizaron como quelante al etilendiamina-N,N'-disuccínica en una relación molar de 1:1. En el estudio (11) desarrollado el 2019, removieron contaminantes de una estación depuradora de aguas residuales, también la relación molar fue de 1:1 y la eliminación fue del 70 %. En la investigación (4) de 2015, trataron aguas residuales de tintura acrílica simulado y lograron una mineralización del 87 %. En la investigación (14) desarrollada el 2015, degradaron aguas residuales de teñido textil de algodón sintético y mineralizaron la mayor parte de los contaminantes.

El estudio (17) de 2014, evaluaron la eficiencia de los quelatos de hierro en el proceso foto Fenton para eliminar el sulfametoxazol del agua, entre los quelantes que utilizaron tenemos a ácido etilendiaminotetraacético, ácido nitrilotriacético, ácido oxálico y ácido tartárico. El proceso de foto Fenton con quelante que se utilizó en la tesis es viable por las siguientes razones:

1. No es necesario utilizar ácidos porque el tratamiento se realiza a pH neutro del tratamiento.
2. El complejo que forma el hierro con el quelante EDTA requiere menor energía (región visible y cerca del UV) para producir la degradación de los contaminantes porque presentan una mayor absorción, por lo cual es atractivo el uso de la radiación solar y no fuentes artificiales de UV, el cual es común en el proceso foto Fenton.

El pH de las aguas residuales textiles es aproximadamente 4,5; si se desea realizar el tratamiento con el método Fenton y foto Fenton, se requiere utilizar ácidos como el HCl o H₂SO₄ para alcanzar el pH de 3 o menos y, luego, utilizar bases o álcalis para neutralizar el efluente y descargar al ambiente o alcantarillado. El foto Fenton con agente quelante no requiere un pH ácido como los que se mencionó, la presencia del quelante para la formación de los complejos de hierro evita la precipitación del ion Fe³⁺ como hidróxido férrico (Fe(OH)₃), creando lodos de hierro. En la investigación, se neutralizó las aguas residuales antes del tratamiento y no se observó una variación significativa del pH durante la decoloración, por lo cual el efluente tiene un pH próximo al neutro.

La concentración inicial del contaminante presenta un efecto inverso en el porcentaje de decoloración, la razón es sencilla: al existir más moléculas del contaminante, hay una cantidad insuficiente de radicales hidroxilos (69); por lógica, si se desea compensar la diferencia existente, se tiene que agregar moles de Fe³⁺ y H₂O₂ para generar más radicales, hasta cierto grado se produce este efecto, pero a niveles muy altos presenta un efecto negativo, debido a que se limita la penetración de los fotones por el aumento de absorción UV por parte de la solución (67) o aguas residuales.

CONCLUSIONES

1. Es factible aplicar el proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junin. Para un menor color del efluente del tratamiento, se debe evaluar mayores dosis del agente quelante u otro quelante, de tal manera que se puedan alcanzar los niveles requeridos para ser utilizados para la extracción, el cultivo y otras actividades marino costeras y continentales (Categoría 2) o para el riego de vegetales y bebida de animales (Categoría 3). Las aguas residuales textiles tratadas obtenidas pueden ser utilizadas para ser potabilizadas con tratamiento convencional o con tratamiento avanzado (Categoría 1).
2. La dosis del agente quelante y de H_2O_2 en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton es 1,575 mM (relación molar de 1,75:1) y 1000 ppm, respectivamente, mientras que los valores óptimos estimados por el método de superficie son 1,575 mM y 818,18 ppm, respectivamente.
3. La dosis del agente quelante influye directamente en el porcentaje de decoloración: a mayor dosis, la decoloración se incrementa en el intervalo considerado de 1,125 a 1,575 mM. Mientras que el efecto de la dosis de H_2O_2 es cuadrático, la decoloración máxima estimada es de 818 ppm, antes y después los valores de decoloración son menores. Entre ambos dos factores, la dosis de agente quelante presenta un efecto mayor que la dosis de H_2O_2 .
4. La mayor decoloración que se logró fue del 76,84 % a una dosis del agente quelante y de H_2O_2 de 1,575 mM y 1000 ppm, respectivamente. A tales condiciones, el color del efluente del tratamiento de las aguas residuales tiene un color promedio de 247,50 PCU. A las condiciones óptimas estimadas, el porcentaje de decoloración que se lograría es del 79,94 %.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar la dosis de Fe^{3+} en el tratamiento de las aguas residuales textiles con el proceso foto Fenton. En la investigación fue un parámetro y únicamente se manipuló la dosis del agente quelante.
2. Investigar el tratamiento de efluentes textiles con el proceso foto Fenton considerando como factor a la temperatura del efluente, debido que, al momento de su descarga, tiene el valor de 50 °C y se conoce que la velocidad de decoloración es mayor.
3. Evaluar la dosis del agente quelante mayor a 1,575 mM (relación molar de 1,75:1) en el tratamiento de efluentes textiles por el proceso foto Fenton.
4. Realizar el tratamiento de efluentes textiles usando el proceso foto Fenton con otros agentes quelantes, como el ácido nitrilotriacético, ácido oxálico, ácido tartárico y otros.
5. Investigar otros POA en el tratamiento de efluentes textiles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RATHOUR, Rohit, KALOLA, Vidhi, JOHNSON, Jenny, JAIN, Kunal, MADAMWAR, Datta, & DESAI, Chirayu. Treatment of various types of wastewaters using microbial fuel cell systems. En: *Microbial Electrochemical Technology*. Online. Elsevier B.V., 2019. pp. 665–692. ISBN 9780444640529.
2. DE LUCA, Antonella, DANTAS, Renato F., & ESPLUGAS, Santiago. Assessment of iron chelates efficiency for photo-Fenton at neutral pH. *Water Research*. Online. 2014. Vol. 61, pp. 232–242. DOI 10.1016/j.watres.2014.05.033.
3. LALNUNHLIMI, Sylvine, & VEENAGAYATHRI, Krishnaswamy. Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium. *Brazilian Journal of Microbiology*. Online. 2016. Vol. 47, pp. 39–46. DOI 10.1016/j.bjm.2015.11.013.
4. SOARES, Petrick A., BATALHA, Mauro, SOUZA, Selene M.A.Guelli U., BOAVENTURA, Rui A.R., & VILAR, Vítor J.P. Enhancement of a solar photo-Fenton reaction with ferric-organic ligands for the treatment of acrylic-textile dyeing wastewater. *Journal of Environmental Management*. Online. 2015. Vol. 152, pp. 120–131. DOI 10.1016/j.jenvman.2015.01.032.
5. AY, Filiz, CATALKAYA, Ebru Cokay, & KARGI, Fikret. Advanced oxidation of direct red (DR 28) by fenton treatment. *Environmental Engineering Science*. 2008. Vol. 25, pp. 1455–1462. DOI 10.1089/ees.2007.0218.
6. CORTAZAR MARTÍNEZ, Adriana, GONZÁLEZ RAMÍREZ, César Abelardo, CASTRO ROSAS, Javier, CORONEL OLIVARES, Claudia, ESCALANTE LOZADA, Adelfo José, & VILLAGÓMEZ IBARRA, Roberto José. Decoloración de aguas residuales provenientes de la industria textil. En: *Avances en Impacto, Tecnología y Toxicología Ambiental*. 2011, pp. 115–125.
7. CAI, Q.Q., JOTHINATHAN, L., DENG, S.H., ONG, S.L., NG, H.Y., & HU, J.Y. Fenton- and ozone-based AOP processes for industrial effluent treatment. En: *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants*. 2021, pp. 199–254. ISBN 9780128210116.
8. ARZATE, S., CAMPOS-MAÑAS, M. C., MIRALLES-CUEVAS, S., AGÜERA, A., GARCÍA SÁNCHEZ, J. L., & SÁNCHEZ PÉREZ, J. A. Removal of contaminants of emerging concern by continuous flow solar photo-Fenton process at neutral pH in open reactors. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 261, pp. 1–8. DOI 10.1016/j.jenvman.2020.110265.

9. SÁNCHEZ PÉREZ, J. A., ARZATE, S., SORIANO-MOLINA, P., GARCÍA SÁNCHEZ, J. L., CASAS LÓPEZ, J. L., & PLAZA-BOLAÑOS, P. Neutral or acidic pH for the removal of contaminants of emerging concern in wastewater by solar photo-Fenton: A techno-economic assessment of continuous raceway pond reactors. *Science of the Total Environment*. 20 de setiembre de 2020. Vol. 736, pp. 1–12. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.139681.
10. MASOUMEH SHEIKH, Hosseini Lori, MOHAMMAD MEHDI, Amin, MOHAMMAD, Kamranifar, ALI, Fatehizadeh, MOHAMMAD REZA, Zare, MOHAMMAD, Ghasemian, & ENSIYEH, Taheri. Application of fenton and photo-fenton process for decolorization of direct red 80 dye from synthetic wastewater. *Desalination and Water Treatment*. 2020. Vol. 204, pp. 155–163. DOI 10.5004/dwt.2020.26258.
11. SORIANO-MOLINA, P., GARCÍA SÁNCHEZ, J. L., MALATO, S., PLAZA-BOLAÑOS, P., AGÜERA, A., & SÁNCHEZ PÉREZ, J. A. On the design and operation of solar photo-Fenton open reactors for the removal of contaminants of emerging concern from WWTP effluents at neutral pH. *Applied Catalysis B: Environmental*. 5 de noviembre de 2019. Vol. 256, pp. 1–9. DOI 10.1016/j.apcatb.2019.117801.
12. LIU, Yucan, ZHANG, Guangming, FANG, Shunyan, CHONG, Shan, & ZHU, Jia. Degradation of aniline by heterogeneous Fenton's reaction using a Ni-Fe oxalate complex catalyst. *Journal of Environmental Management*. Online. 2016. Vol. 182, pp. 367–373. DOI 10.1016/j.jenvman.2016.07.084.
13. DEHGHANI, Mansooreh, MOSLEHEYAN, Maryam, KARIMIYAN, Samaneh, FARAMARZI, Zahra, ANSARI, Marziye, SHAMSEDINI, Narges, JAVAHERI, Mohammad Reza, & SHAHSAVANI, Samaneh. Efficiency of the photo Fenton process for decolorization of Direct Red 81 Dye from the aqueous solution. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 2016. Vol. 8, N.º 4. DOI 10.17795/jjhs-34951.
14. DOUMIC, Lucila I., SOARES, Petrick A., AYUDE, María A., CASSANELLO, Miryan, BOAVENTURA, Rui A.R., & VILAR, Vítor J.P. Enhancement of a solar photo-Fenton reaction by using ferrioxalate complexes for the treatment of a synthetic cotton-textile dyeing wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 277, pp. 86–96. DOI 10.1016/j.cej.2015.04.074.
15. AZIZI, Esmail, GHAYEBZADEH, Mehdi, BEIKMOHAMMADI, Masoumeh, & SHARAFI, Kiomars. Oxidation of aniline with photo-Fenton advanced oxidation process from aqueous solutions in batch reactor. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 5, N.º 2, pp. 12–16.
16. AYODELE, Olumide Bolarinwa, & TOGUNWA, Olayinka S. Catalytic activity of copper modified bentonite supported ferrioxalate on the aqueous degradation and

- kinetics of mineralization of Direct Blue 71, Acid Green 25 and Reactive Blue 4 in photo-Fenton process. *Applied Catalysis A: General*. Online. 2014. Vol. 470, pp. 285–293. DOI 10.1016/j.apcata.2013.11.013.
17. DE LUCA, Antonella, DANTAS, Renato F., & ESPLUGAS, Santiago. Assessment of iron chelates efficiency for photo-Fenton at neutral pH. *Water Research*. 2014. Vol. 61, pp. 232–242. DOI 10.1016/j.watres.2014.05.033.
 18. HUAMÁN MARAVI, Kevin Brandom. Decoloración del agua residual proveniente de la industria textil artesanal por foto Fenton. *Tesis de maestría*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2021.
 19. ÁLVAREZ VENTURA, Araceli Vanesa, & BAIS LA CRUZ, Jaqueline Diana. Aplicación del proceso solar-foto Fenton para la decoloración de aguas contaminadas con el colorante azul directo 71, Arequipa-2021. *Tesis de título*. Arequipa: Universidad Privada Autónoma del Sur, 2021.
 20. CHICO PACHAS, Hugo Gian Pool, & LÓPEZ VERA, Jorge André. Desarrollo de un sistema de degradación de aguas residuales de la industria textil de pantalones de vaquero utilizando la técnica de Foto-Fenton. *Tesis de título*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2021.
 21. GUTIÉRREZ, César, & PILCO, Alex. Optimización de la remoción de compuestos orgánicos persistentes mediante el proceso foto-Fenton. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 2020. Vol. 86, N.º 1, pp. 1–12.
 22. ANAYA MELÉNDEZ, Fernando. Tratamiento de aguas residuales con colorantes reactivos mediante proceso de oxidación avanzada Fenton y variantes. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*. 27 de mayo de 2019. Vol. 3, N.º 1, p. 55. DOI 10.25127/aps.20191.483.
 23. CALDERÓN RODRÍGUEZ, Fabiola Susan, & OLÓRTICO SOTO, Deyse Stefany. Proceso foto-Fenton para la degradación de color del efluente de la industria textil. *Tesis de título*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019. Huancayo 2019.
 24. ALEGRE ZORRILLA, Yessira Valeria, & ROSALES ASENCIÓN, Karen Shessira. Influencia del tipo de fotocátalisis y tiempo en el tratamiento de aguas residuales textiles. *Tesis de título*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017.
 25. ENFOQUE, Ute. Dosificación mínima del reactivo Fenton para la remediación de agua contaminada con colorantes. Online. 2015. Vol. 3, pp. 65–80. Disponible en: <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>.
 26. TINOCO GÓMEZ, Oscar Rafael, MEDINA ESCUDERO, Ana María, & ZAPATA GAMARRA, Hernán. Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*. 2011. Vol. 14, N.º 2, pp. 9–15.

27. SALAS, G. Tratamiento por oxidación avanzada (reacción Fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Rev. Per. Quím. Ing. Quím.* 2010. Vol. 13, N.º 1, pp. 30–38.
28. MOHAMMAD, Shahadat, AHMAD, Akil, BUSHRA, Rani, ISMAIL, Suzylawati, ZIAUDDIN AHAMMAD, Shaikh, WAZED ALI, S., & RAFATULLAH, Mohd. Recent advancement in wastewater decontamination technology. En: *Modern Age Waste Water Problems*. 2020. pp. 1–364.
29. PAVITHRA, K. Grace, P., Senthil Kumar, JAIKUMAR, V., & P., Sundar Rajan. Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2019. Vol. 75, pp. 1–19. DOI 10.1016/j.jiec.2019.02.011.
30. SAMSAMI, Shakiba, MOHAMADI, Maryam, SARRAFZADEH, Mohammad Hossein, RENE, Eldon R., & FIROOZBAHR, Meysam. Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*. Online. 2020. Vol. 143, pp. 138–163. DOI 10.1016/j.psep.2020.05.034.
31. AMIN, Nevine Kamal. Removal of direct blue-106 dye from aqueous solution using new activated carbons developed from pomegranate peel: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 165, pp. 52–62. DOI 10.1016/j.jhazmat.2008.09.067.
32. SINGH, Garima, & DWIVEDI, S. K. Decolorization and degradation of Direct Blue-1 (Azo dye) by newly isolated fungus *Aspergillus terreus* GS28, from sludge of carpet industry. *Environmental Technology and Innovation*. 2020. Vol. 18, pp. 1–39. DOI 10.1016/j.eti.2020.100751.
33. NIDHEESH, P. v., ZHOU, Minghua, & OTURAN, Mehmet A. An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*. 2018. Vol. 197, pp. 210–227. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.12.195.
34. HASSAAN, Mohamed A., EL NEMR, Ahmed, & MADKOUR, Fedekar F. Testing the advanced oxidation processes on the degradation of Direct Blue 86 dye in wastewater. *Egyptian Journal of Aquatic Research*. 2017. Vol. 43, pp. 11–19. DOI 10.1016/j.ejar.2016.09.006.
35. HOSSAIN, Laila, KANTI SARKER, Sumit, & SAMAD KHAN, Mohidus. Evaluation of present and future wastewater impacts of textile dyeing industries in Bangladesh. *Environmental Development*. 2018. Vol. 26, pp. 23–33. DOI 10.1016/j.envdev.2018.03.005.
36. COLIN, Nicole, MACEDA-VEIGA, Alberto, FLOR-ARNAU, Núria, MORA, Josep,

- FORTUÑO, Pau, VIEIRA, Cristiana, PRAT, Narcís, CAMBRA, Jaume, & DE SOSTOA, Adolfo. Ecological impact and recovery of a Mediterranean river after receiving the effluent from a textile dyeing industry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1 de octubre de 2016. Vol. 132, pp. 295–303. DOI 10.1016/j.ecoenv.2016.06.017.
37. MAHFUZA, S., SHAHIDUL, Islam, RATNAJIT, Saha, & AL- MANSUR, M. A. Impact of the effluents of textile dyeing industries on the surfacewater quality inside D.N.D Embankment, Narayanganj. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*. 2009. Vol. 44, N.º 1, pp. 65–80.
 38. YUSUFF, R. O., & SONIBARE, J. A. Characterization of textile industries' effluents in Kaduna, Nigeria and pollution implications. *Global Nest: the Int. J.* 2004. Vol. 6, N.º 3, pp. 212–221.
 39. ROMÁN OVIEDO, Gina. Estudio del tratamiento electroquímico de las aguas residuales de la industria textil del área de lavado de lanas de la empresa Pitata S.A.C. con fines de reutilización. *Tesis de título*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2019.
 40. BRAÑEZ SÁNCHEZ, Marco, GUTIERREZ, Rómulo, PEREZ, Ronald, URIBE, Carmen, & VALLE, Pamela. Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Revista de la Escuela Universitaria de Posgrado UNFV*. 2018. Vol. 23, pp. 129–143. DOI <http://doi.org/10.24265/cmpus.2018.v23n26.03>.
 41. HURTADO MAYO, José Alberto, & SANTIAGO GALLO, Evelyn Rossy. Remoción del color en las aguas residuales del proceso de teñido de la Cooperativa Industrial Manufacturas del Centro Ltda. a nivel laboratorio mediante electrocoagulación. *Tesis de título*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2008.
 42. AMETA, Suresh C. Introduction. En: *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment*. Elsevier Inc., 2018. pp. 1–12. ISBN 9780128105252.
 43. AMETA, Suresh C. An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*. 1 de abril de 2018. Vol. 197, pp. 210–227. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.12.195.
 44. KUMAR, Vineet, & SHAH, Maulin P. Advanced oxidation processes for complex wastewater treatment. En: *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants*. Elsevier, 2021. pp. 1–31.
 45. KURIAN, Manju. Advanced oxidation processes and nanomaterials -a review. 1 de junio de 2021. Elsevier Ltd.
 46. JI, Ruicheng, CHEN, Jiabin, LIU, Tongcai, ZHOU, Xuefei, & ZHANG, Yalei. Critical review of perovskites-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: Operational parameters, reaction mechanisms, and prospects. 1 de febrero de 2022.

- Elsevier B.V.
47. COHA, Marco, FARINELLI, Giulio, TIRAFERRI, Alberto, MINELLA, Marco, & VIONE, Davide. Advanced oxidation processes in the removal of organic substances from produced water: Potential, configurations, and research needs. 15 de junio de 2021. Elsevier B.V.
 48. ANAND, Aljo, RAJCHAKIT, Urawadee, & SAROJINI, Vijayalekshmi. Detection and removal of biological contaminants in water: The role of nanotechnology. En: *Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants*. Elsevier Inc., 2020. pp. 69–110. ISBN 9780128184899.
 49. SCHWEITZER, Linda, & NOBLET, James. Water Contamination and Pollution. En: TÖRÖK, Béla, & DRANSFIELD, Timothy (eds.), *Green Chemistry: An Inclusive Approach*. 2018. pp. 261–290. ISBN 9780128095492.
 50. SINGH, Rajat Pratap, SINGH, Pradeep Kumar, GUPTA, Rasna, & SINGH, Ram Lakhan. Treatment and Recycling of Wastewater from Textile Industry. En: SINGH, Ram Lakhan, & SINGH, Rajat Pratap (eds.), *Advances in Biological Treatment of Industrial Waste Water and their Recycling for a Sustainable Future*. 2019. pp. 225–266.
 51. GHIME, Damodhar, & GHOSH, Prabir. Advanced Oxidation Processes: A Powerful Treatment Option for the Removal of Recalcitrant Organic Compounds. En: BUSTILLO-LECOMPTE, Ciro (ed.), *Advanced Oxidation Processes - Applications, Trends, and Prospects*. 2020. pp. 3–14.
 52. HODAIFA, Gassan, PALADINO, Ombretta, MALVIS, Ana, SEYEDSALEHI, Mahdi, & NEVIANI, Matteo. Green techniques for wastewaters. En: KYZAS, George, & MITROPOULOS, Athanasios (eds.), *Advanced Low-Cost Separation Techniques in Interface Science*. 2019. pp. 217–240. ISBN 9780128141786.
 53. AMETA, Rakshit, CHOHADIA, Anil K., JAIN, Abhilasha, & PUNJABI, Pinki B. Fenton and Photo-Fenton Processes. En: AMETA, Suresh C., & AMETA, Rakshit (eds.), *Advanced Oxidation Processes For Wastewater Treatment*. 2018. pp. 49–87.
 54. DE LUCA, Antonella, DANTAS, Renato F., & ESPLUGAS, Santiago. Assessment of iron chelates efficiency for photo-Fenton at neutral pH. *Water Research*. 2014. Vol. 61, pp. 232–242. DOI 10.1016/j.watres.2014.05.033.
 55. VARJANI, Sunita, RAKHOLIYA, Parita, SHINDHAL, Toral, SHAH, Anil V., & NGO, Huu Hao. Trends in dye industry effluent treatment and recovery of value added products. *Journal of Water Process Engineering*. 1 de febrero de 2020, pp. 1–11. DOI 10.1016/j.jwpe.2020.101734.
 56. PRETE, Prisco, FIORENTINO, Antonino, RIZZO, Luigi, PROTO, Antonio, &

- CUCCINIELLO, Raffaele. Review of aminopolycarboxylic acids–based metal complexes application to water and wastewater treatment by (photo-) Fenton process at neutral pH. 1 de abril de 2021. Elsevier B.V.
57. ARIAS GONZÁLES, José Luis, & COVINOS GALLARDO, Mitsuo. Diseño y metodología de la investigación. Online. Primera. Enfoques Consulting EIRL, 2021. ISBN 9786124844423. Disponible en: <https://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/2260/1/Arias-Covinos->.
 58. SÁNCHEZ CARLESSI, Hugo, REYES ROMERO, Carlos, & MEJÍA SÁENZ, Katia. Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística. Online. Universidad Ricardo Palma, 2018. ISBN 9786124735141. Disponible en: <http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/1480/libro-manual-de-terminos-en-investigacion.pdf?sequence=1&isAllowed=>.
 59. CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA, Tecnología e Innovación Tecnológica. Guía Práctica para la Formulación y Ejecución de Proyectos de Investigación y Desarrollo (I+D). 2020.
 60. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos, & BAPTISTA LUCIO, Pilar. Metodología de la Investigación. Sexta Edición. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A., 2014.
 61. MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. Segunda edición. México, D.F.: Limusa Wiley, 2004.
 62. OTZEN, Tamara, & MANTEROLA, Carlos. Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *Int. J. Morphol.* 2017. Vol. 35, N.º 1, pp. 227–232.
 63. BERNAL TORRES, César Augusto. Metodología de la investigación. Administración, economía, humanidades y ciencias sociales. Tercera edición. Prentice Hall, 2010.
 64. DE LUCA, Antonella, DANTAS, Renato F., & ESPLUGAS, Santiago. Assessment of iron chelates efficiency for photo-Fenton at neutral pH. *Water Research.* 2014. Vol. 61, pp. 232–242. DOI 10.1016/j.watres.2014.05.033.
 65. JOGANI, Rutvi, BHERVIA, Hardik, KAPOOR, Shivam, & SINGH, Anantha. Optimization of Different Variables Used in Fenton Reagent Process for Removal of Direct Red 80 Dye. *International Journal of Advances in Agricultural and Environmental Engineering.* 2017. Vol. 4, N.º 1, p. 230.
 66. AY, Filiz, CATALKAYA, Ebru Cokay, & KARGI, Fikret. Advanced oxidation of direct red (DR 28) by fenton treatment. *Environmental Engineering Science.* 2008. Vol. 25, N.º 10, pp. 1455–1462. DOI 10.1089/ees.2007.0218.
 67. DEHGHANI, Mansooreh, MOSLEHEYAN, Maryam, KARIMIYAN, Samaneh, FARAMARZI, Zahra, ANSARI, Marziye, SHAMSEDINI, Narges, JAVAHERI, Mohammad Reza, & SHAHSAVANI, Samaneh. Efficiency of the Photo Fenton Process

- for Decolorization of Direct Red 81 Dye From the Aqueous Solution. Jundishapur Journal of Health Sciences. 2016. Vol. 8, N.° 4. DOI 10.17795/jjhs-34951.
68. REZA MORADI, & AMIN GANJALI. Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles and Their Application in Photo-Fenton Degradation of Direct Red 23 Dye in Aqueous Solutions. Russian Journal of Physical Chemistry A. 2019. Vol. 93, N.° 13, pp. 2789–2797. DOI 10.1134/S0036024419130211.
69. HARICHANDRAN, G., & PRASAD, S. SonoFenton degradation of an azo dye, Direct Red. Ultrasonics Sonochemistry. 2016. Vol. 29, pp. 178–185. DOI 10.1016/j.ultsonch.2015.09.005.

ANEXOS

ANEXO A. Certificado de los análisis de laboratorio



LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES

INFORME DE ENSAYO N° 1-0119/22

Pág. 1/1

Solicitante : Andy David Ayala Alvino
Domicilio legal : Psj. Arica S/N - Hualahoyo - El Tambo
Proyecto : Evaluación del proceso foto-fenton con agente quelante en el tratamiento de aguas residuales en el distrito de Hualhuas, Junin 2022
Muestra(s) Declarada(s) : Agua residual de la industria textil / Agua residual tratada
Procedencia de la Muestra : ---
Lugar de Muestreo : ---
Cantidad de muestras para el Ensayo : 10 muestras x 100 mL
Forma de Presentación : 10 Frascos de Plástico
Fecha de Recepción : 19/09/22
Fecha de Inicio del Ensayo : 19/09/22
Fecha de Término del Ensayo : 20/09/22
Fecha de Emisión de Informe : 21/09/22
N° de Cotización de Servicio : ---



Código del cliente	Color (PCU)
A00	1050
A01	750
A02	385
A03	680
A04	510
A05	460
A06	455
A07	435
A08	275
A09	260

- Lugar y condiciones ambientales del muestreo: Indicado por el cliente
- El cliente renuncia al derecho de la dirimencia

Método de Análisis:

Color: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2120 B, 23rd Ed. 2017. Método de comparación visual

Huancayo, 21 de Septiembre de 2022

GRUPO JHACC S.A.C

Ing. Henry R. Ochoa León
 CIP N° 134232
 JEFE DE LABORATORIO

*El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC

*Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

LAA-GJ

Rev: 01

Jr. Santa Rosa N° 1361 - El Tambo, Huancayo - Perú Celular: 971 718825 - 954 416149 - 956 988682
 Correo: proyectos@grupojhacc.com / administracion@grupojhacc.com
 www.grupojhacc.com

INFORME DE ENSAYO N° 1-0121/22

Pág. 1/1

Solicitante : Andy David Ayala Alvino
 Domicilio legal : Psj. Arica S/N - Hualahoyo - El Tambo
 Proyecto : Evaluación del proceso foto-fenton con agente quelante en el tratamiento de aguas residuales en el distrito de Hualhuas, Junín 2022
 Muestra(s) Declarada(s) : Agua residual de la industria textil / Agua residual tratada
 Procedencia de la Muestra : ---
 Lugar de Muestreo : ---
 Cantidad de muestras para el Ensayo : 10 muestras x 100 mL
 Forma de Presentación : 10 Frascos de Plástico
 Fecha de Recepción : 21/09/22
 Fecha de Inicio del Ensayo : 21/09/22
 Fecha de Término del Ensayo : 22/09/22
 Fecha de Emisión de Informe : 22/09/22
 N° de Cotización de Servicio : ---



Código del cliente	Color (PCU)
A00	1090
A01	790
A02	405
A03	690
A04	535
A05	480
A06	450
A07	405
A08	260
A09	235

- Lugar y condiciones ambientales del muestreo: Indicado por el cliente
- El cliente renuncia al derecho de la dimensión

Método de Análisis:

Color: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2120 B, 23rd Ed.2017. Método de comparación visual

Huancayo, 23 de Septiembre de 2022


GRUPO JHACC S.A.C.
Ing. Henry R. Ochoa León
 CIP N° 124232
 JEFE DE LABORATORIO

*El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC

*Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

LAA-GJ

Rev: 01

Jr. Santa Rosa N° 1361 - El Tambo, Huancayo - Perú Celular: 971 718825 - 954 416149 - 956 988682
 Correo: proyectos@grupojhacc.com / administracion@grupojhacc.com
 www.grupojhacc.com

ANEXO B. Panel fotográfico



Agitador magnético con calentamiento



Formación del complejo



Pesado del EDTA



Pesado del EDTA



Tratamiento de aguas residuales por el
proceso foto Fenton



Tratamiento de aguas residuales por el
proceso foto Fenton

ANEXO C. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Metodología	
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente		Método	Alcance
¿Es factible el proceso foto Fenton con agente quelante para decolorar las aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín, y ser utilizado para el riego de vegetales y bebida de animales?	Determinar la factibilidad del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.	Hi: En el proceso foto Fenton con agente quelante es significativa el efecto de la dosis de agente quelante y dosis de H ₂ O ₂ en la decoloración de las aguas residuales textiles. Ho: En el proceso foto Fenton con agente quelante no es significativa el efecto de la dosis de agente quelante y dosis de H ₂ O ₂ en la decoloración de las aguas residuales textiles.	Color. Decoloración.	Unidades de color (PCU). Porcentaje de decoloración (%).	Método Científico. En la investigación se aplicaron tres pasos: Problema-hipótesis-contrastación.	Nivel: Explicativo, se manipuló variables independientes y se evaluó el efecto en la variable dependiente. Tipo: Aplicada, a través del conocimiento se mitiga la contaminación generada por la descarga del efluente.
Problemas específicos	Objetivos específicos		Variable independiente		Diseño de la investigación	
¿Cuál es la dosis del agente quelante y H ₂ O ₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton en el distrito de Hualhuas, Junín?	Determinar la dosis del agente quelante y H ₂ O ₂ en el tratamiento de aguas residuales textiles por el proceso foto Fenton en el distrito de Hualhuas, Junín.		Proceso foto Fenton con agente quelante	Dosis de EDTA. Dosis de H ₂ O ₂ .	Experimental, diseño factorial, específicamente se utilizó el diseño factorial de bloques aleatorizados 3 ² .	
¿Cuáles son los efectos del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?	Analizar los efectos del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.				Población	Muestra
¿Cuál es la eficiencia del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?	Evaluar la eficiencia del proceso foto Fenton con agente quelante para el tratamiento de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.				Aguas residuales generadas por las empresas textiles que se encuentran en el distrito de Hualhuas, provincia de Huancayo, departamento de Junín. El volumen de la población varía de acuerdo con la demanda de las prendas.	18 L de las aguas residuales del teñido de una empresa textil del distrito de Hualhuas, provincia de Huancayo, departamento de Junín. Técnica de muestreo: no probabilístico, por conveniencia.
					Técnica de recolección de datos	Análisis e interpretación de los resultados
					Experimento, en el cual se utilizaron instrumentos de medición: colorímetro, pHmetro y balanza analítica digital.	Estadística descriptiva. En la prueba de hipótesis se utilizará el análisis de la varianza de dos variables y tres niveles.