



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

“Optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera Ambiental

AUTOR:

Valeria Elizabeth Diaz Justiniano (ORCID: 0000-0001-9893-1257)

Kiara Estefanny Ñaupari Berlanga (ORCID: 0000-0001-6048-1369)

ASESOR:

Dr. Lorgio Gilberto Valdiviezo Gonzales (ORCID: 0000-0002-8200-4640)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2019

Dedicatoria

La presente Tesis es dedicada principalmente a Dios, por ser nuestro creador y por permitirnos haber llegado hasta este momento que es de suma importancia para nuestra formación profesional. A nuestros padres y a toda persona que ayudó positivamente en el trayecto de nuestra formación académica, ya que fueron testigos del trabajo constante para obtener un nuevo éxito en nuestras vidas profesionales.

Agradecimiento

A la Universidad César Vallejo, por abrir este espacio de formación académica de suma importancia, a los distintos docentes que nos ayudaron con el desarrollo de la investigación. A nuestros familiares por el apoyo inquebrantable y por incentivarlos al trabajo permanente.

Página del Jurado

Página del jurado

Declaratoria de Autenticidad

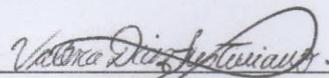
Declaración de Autenticidad

Nosotras, Valeria Elizabeth Díaz Justiniano con DNI N° 73178077 y Kiara Estefanny Ñaupari Berlanga con DNI N° 74733532, a efecto de cumplir con los requisitos vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental.

Asimismo, exponemos también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Lima, 10 de Diciembre del 2019.



Valeria Elizabeth Díaz Justiniano

DNI N°: 73178077



Kiara Estefanny Ñaupari Berlanga

DNI N°: 74733532

Presentación

Señores miembros del Jurado, se presenta ante ustedes la Tesis con nombre de “Optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019” en cumplimiento a lo solicitado por el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, la cual sometemos a vuestra consideración y esperamos que cumpla con los requisitos para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	II
Agradecimiento.....	III
Página del Jurado	IV
Declaratoria de Autenticidad.....	V
Presentacion.....	VII
Resumen.....	11
Abstract.....	12
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MÉTODO	26
2.1. Tipo y diseño de investigación	26
2.2. Operacionalización de variables.....	27
2.3. Población, muestra y muestreo	29
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	30
2.5. Procedimientos	33
2.6. Método de análisis de datos.....	37
2.7. Aspectos éticos	38
III. RESULTADOS	39
3.2 Ensayos preliminares.....	39
3.3 Ensayos experimentales.....	40
3.4 Matriz del diseño Box - Behnken.....	41
3.5 Efecto del tiempo de reacción	47
3.6 Ensayos del hierro residual	48
IV. DISCUSIÓN..	50
V. CONCLUSIONES	52
VI. RECOMENDACIONES	53
VII. REFERENCIAS.....	54
VIII. ANEXOS.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales industriales.	16
Figura 2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (POA).....	17
Figura 3. Puntos de Monitoreo de efluente.....	30
Figura 4. Esquema de la metodología utilizada en la investigación.	34
Figura 5. Superficie de respuesta para el% de remoción del DQO por el proceso Fenton: $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, H_2O_2 y pH	44
Figura 6. Superficie de respuesta para la eliminación del A&G de efluente pesquero por el proceso Fenton: $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, H_2O_2 y pH.....	45
Figura 7. Superficie de respuesta para la eliminación del SST de efluente pesquero por el proceso Fenton: $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, H_2O_2 y pH.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicación del Proceso Fenton en el tratamiento de diversos efluentes industriales. ..	15
Tabla 2. Procesos oxidativos avanzados (incluyendo H_2O_2) en el tratamiento de efluentes industriales.....	16
Tabla 3. Escala del potencial de oxidación de los agentes oxidantes.....	18
Tabla 4. Aspectos positivos y negativos.	18
Tabla 5. Ventajas y desventajas del proceso Fenton.	19
Tabla 6. Nomenclatura de los componentes químicos utilizados en las ecuaciones.	21
Tabla 7. Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.	23
Tabla 8. Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.	23
Tabla 9. Codificación de los parámetros para evaluar el efecto de la optimización.	26
Tabla 10. Matriz de experimentación Box Behnken para la aplicación de la optimización del proceso Fenton.....	27
Tabla 11. Matriz de operacionalización de las variables.	28
Tabla 12. Validez de las marcas y modelos de los equipos de laboratorio.	33
Tabla 13. Resultados de la caracterización del efluente en relación al A&G y DQO.....	39
Tabla 14. Resultados de los ensayos del proceso Fenton.	40
Tabla 15. Resultados de los resultados actuales y resultados predichos.....	41
Tabla 16. Análisis de varianza para la Remoción del DQO.....	43
Tabla 17. Análisis de varianza para la Remoción de A&G.	44
Tabla 18. Análisis de varianza para la Remoción de SST.	46
Tabla 19. Efecto del tiempo de reacción.....	47
Tabla 20. Resultados de los ensayos del hierro residual.....	48

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Vista satelital de la ubicación del establecimiento industrial pesquero Conservas Ricofres S.R.L.....	29
---	----

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Autorización de la empresa.....	63
Anexo 2. Cadena de custodia para el registro de muestreo.....	64
Anexo 3. Reporte de resultados de la caracterización fisicoquímica del efluente.....	64

<i>Anexo 4. Ficha de variables.....</i>	<i>65</i>
<i>Anexo 5. Cálculos de los reactivos y resultados de ensayos.....</i>	<i>67</i>
<i>Anexo 6. Caracterización del efluente.</i>	<i>70</i>
<i>Anexo 7. Caracterización del efluente.</i>	<i>71</i>
<i>Anexo 8. Corrida experimental del proceso Fenton.</i>	<i>73</i>
<i>Anexo 9. Determinación de los parámetros después del proceso Fenton.....</i>	<i>75</i>
<i>Anexo 10. Determinación del hierro residual.....</i>	<i>75</i>
<i>Anexo 11. Modelo estadístico sin ajuste para % de remoción de los DQO, en el diseño factorial de Box-Behnken.</i>	<i>76</i>
<i>Anexo 12. Gráfico de Pareto estandarizado para % de remoción de los DQO, A&G y SST en el diseño factorial de Box-Behnken.....</i>	<i>77</i>

RESUMEN

En este estudio, se aplicó el enfoque de la metodología de superficie de respuesta utilizando el diseño Box – Behnken para desarrollar un modelo matemático y optimizar las condiciones de operación de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_2O_2 y pH para la remoción de DQO, A&G y SST mediante el proceso Fenton. El análisis de varianza (ANOVA) se utilizó para analizar los parámetros e interacción de los mismos, así como la significancia de los modelos, utilizando el programa Minitab (Versión 19). Las máximas remociones obtenidas para DQO, A&G y SST fueron 89.2 %, 99.1 % y 91.9 % respectivamente. Asimismo, se determinó que las condiciones óptimas para la remoción de DQO fueron: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 200 \text{ mg/L}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 1000 \text{ mg/L}$ y $\text{pH} = 3.0$, para A&G fueron: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 300 \text{ mg/L}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 1000 \text{ mg/L}$ y $\text{pH} = 3.5$ y para SST fueron: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 300 \text{ mg/L}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 1200 \text{ mg/L}$ y $\text{pH} = 3.0$, todos los ensayos en un tiempo de reacción de 35 minutos. Los resultados respecto al efecto del tiempo indican que fueron necesarios 25 minutos para alcanzar 90.85 % de remoción de SST y 35 minutos para alcanzar 87.6 % de remoción de DQO. Los valores de R^2 ajustado del modelo para DQO, A&G y SST fueron 70.64 %, 22.47 % y 94.46 % respectivamente, por lo que el modelo obtenido resultó bueno para la remoción de DQO y SST, pero no para A&G. Así mismo, para la concentración del hierro residual con los valores de 0.972 mg/L (200 mg/L), 0.581 mg/L (250 mg/L) y 0.894 mg/L (300 mg/L), indicando concentraciones inferiores al ECA de 5 mg/L (ECA agua: Categoría 1, Subcategoría A₃). Finalmente, se determinó que el proceso Fenton es una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales pesqueras y en este estudio se pueden aplicar antes del tratamiento secundario.

Palabras Claves: Fenton Homogéneo, Box Behnken, Superficie de Respuesta, DQO, A&G, SST.

ABSTRACT

In this study, the response surface methodology approach was applied using the Box-Behnken design to develop a mathematical model and optimize the operating conditions of FeSO₄ 7H₂O, H₂O₂ and pH for the removal of COD, A&G and TSS by the Fenton process. Analysis of variance (ANOVA) was used to analyze the parameters and their interaction, as well as the significance of the models, using the Minitab program (Version 19). The maximum removals obtained for COD, A&G and TSS were 89.2 %, 99.1 % and 91.9 % respectively. Likewise, it was determined that the optimal conditions for the removal of COD were: FeSO₄ 7H₂O = 200 mg/L, H₂O₂ = 1000 mg/L and pH = 3.0, for A&G were: FeSO₄ 7H₂O = 300 mg/L, H₂O₂ = 1000 mg/L and pH = 3.5 and for TSS were: FeSO₄ 7H₂O = 300 mg/L, H₂O₂ = 1200 mg/L and pH = 3.0, all tests in a reaction time of 35 minutes. The results regarding the time effect indicate that it took 25 minutes to reach 90.85 % TSS removal and 35 minutes to reach 87.6 % COD removal. The adjusted R² values of the model for COD, A&G and TSS were 70.64 %, 22.47 % and 94.46 % respectively, so the model obtained was good for COD and TSS removal, but not for A&G. Likewise, for the concentration of residual iron with values of 0.972 mg/L (200 mg/L), 0.581 mg/L (250 mg/L) and 0.894 mg/L (300 mg/L), indicating concentrations lower than the ECA of 5 mg/L (ECA water: Category 1, Subcategory A3). Finally, it was determined that the Fenton process is an efficient alternative for the treatment of fish waste water and in this study they can be applied before secondary treatment.

Keywords: Fenton Homogeneous, Box Behnken, Response Surface, COD, A&G, TSS.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en el Perú se viene generando un promedio de 2, 217 946 m³/día de agua residual, las cuales son vertidas a la red de alcantarillado, de estos el 68% no recibe tratamiento alguno (OEFA, 2014). Estas aguas residuales traen consigo una gran cantidad de contaminantes, convirtiéndose en un problema al ser arrojadas al cuerpo receptor (OMS, 2016).

Dentro de estas se encuentran los efluentes pesqueros que la mayoría vierten sus aguas tratadas a la red alcantarillado, llevando consigo contaminantes como cargas orgánicas, ya sea en forma disuelta o de partículas y restos de grasas (Tech, 2018). Cabe mencionar que el país cuenta con un aproximado de 402 empresas pesqueras siendo el recurso más importante la caballa para la producción de conservas de pescado (Republica, 2017).

Asimismo, las industrias pesqueras requieren una gran cantidad de agua (Nwaigwe, 2017 pág. 2), debido a que generan aguas residuales de acuerdo a dos temporadas que existen: temporada alta y baja, en relación con el abastecimiento de la materia prima, generando un aproximado de 2m³ de aguas contaminadas por 1 tonelada de pescado por día en la temporada alta, incrementándose las aguas residuales pesqueras un 94.6 % al haber mayor producción (Terry Calderón, y otros, 2018 pág. 2).

Hoy en día las industrias pesqueras aplican una variedad de sistemas de tratamientos como el de coagulación química / floculación a base de cloruro férrico, cal, alumbre, etc. (A. Fahim, y otros, 2001), pero también existe el tratamiento biológico que incluye procesos aeróbicos y anaeróbicos con lodo activado, lagunas, filtro de goteo, etc. (Parvathy, y otros, 2017).

En el Perú se cuenta con normativas respecto a los efluentes de diversos sectores industriales, entre ellos tenemos a las empresas industriales pesqueras que descargan sus aguas residuales no domésticas tratadas al sistema de alcantarillado, esto se encuentra en el Decreto Supremo N° 010 - 2019 – VIVIENDA, donde se aprueba los Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario (Ministerio de Vivienda, 2019).

Sin embargo, en la empresa pesquera Conservas Ricofres S.R.L., cuya actividad productiva es la elaboración de conservas de pescado, vierten sus aguas tratadas a la red de alcantarillado pasando por el siguiente sistema de tratamiento que consta de 3 etapas: pre - tratamiento (tratamiento de canaletas y rejillas), tratamiento primario (filtración por tamiz rotativo) y tratamiento secundario (trampa de grasa o IAF- físico), por lo que estos tratamientos no terminan de ser eficientes, al no alcanzar los Valores Máximos Admisibles

(VMA) en el parámetro de Demanda Química de Oxígeno (DQO) con un valor de 3 145.60 mg/L sobrepasando el VMA de 1000 mg/L (Ministerio de Vivienda, 2019 pág. 27).

Motivo por el cual se busca ofrecer una alternativa con un tratamiento natural, utilizando agentes químicos como el sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), para la remoción de la carga orgánica mediante la aplicación del proceso Fenton, perteneciente a los procesos oxidativos avanzados (POAs). (Iglesias, 2013 pág. 18). Estos métodos de tratamiento de aguas residuales para la remoción de agentes contaminantes basan en la formación de radicales hidroxilos (OH^\bullet), actuando como un poderoso oxidante encargado de degradar compuestos orgánicos. Además, los reactivos usados son de fácil manipulación en este tipo de proceso y generan menor impacto al ambiente (Sindhi, et al., 2014 p. 2).

A continuación, en la Tabla 1 se ha reportado algunos antecedentes relacionados a la aplicación del proceso Fenton, en el tratamiento de efluentes de diversas industrias, considerando las mejores condiciones de operación y las eficiencias obtenidas, tales como Agreda, otros, (2018) reportó remoción de DQO de 99 % en la industria cartonera, mientras que las menores remociones de DQO de 42% fueron obtenidas en el tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. Asimismo, Cristovao et al, (2014) reportó una remoción de DQO de 64.4 % en la industria pesquera.

PROCESO DE OXIDACIÓN	TIPO DE EFLUENTE	CONDICIÓN DE OPERACIÓN	RESULTADOS	REFERENCIA
Proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$)	Industria pesquera	pH = 3.2, Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) = 1558 mg/L al 30%, Ion ferroso (Fe^{2+}) = 363 mg/L, Tiempo = 1 h.	* DQO = 63%	(Cristovao, et al., 2014)
Proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$)	Industria de curtiembres	pH = 6.5, Sulfato ferroso (FeSO_4) = 0.75 y 1.25 mM, Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) = 3, 5 y 7ml/L al 30%, Tiempo = 60 min.	*DBO ₅ = 99%	(Agreda, y otros, 2018)
Proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$)	Efluente domestico mezclada con lixiviado e industrial	pH = 3, Ion ferroso (Fe^{2+}) = 10 y 20 mg/L, Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) = 10 y 20 mg/L al 30%, Tiempo = 100 min.	*DBO ₅ = 12.44% *DQO = 44.4%	(Sánchez, y otros, 2018)
Proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$)	Industria cartonera	pH = 4, Ion ferroso (Fe^{2+}) = 2.5 mg/L, Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) = al 33.3 mg/L al 50%, Tiempo = 5 min.	*DQO = 99% Color = 98.16% Turbidez = 99.75%	(Figeroa , y otros, 2018)
Proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} +$	Lixiviado de	Época de lluvia: pH = 3.19,	*DQO = 42%	(Medina

H₂O₂)	relleno sanitario	Sulfato ferroso (FeSO ₄) = 1645.55 mg/L, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 1096.55 mg/L al 30%, Tiempo = 20 min.		Valderrama, y otros, 2016)
Proceso Fenton (Fe²⁺ + H₂O₂)	Industria agroquímica	pH = 3.1, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 1080 mg/L al 30%, Ion ferroso (Fe ²⁺) = 5 mg/L, Tiempo = 60 min.	*DQO = 96.53%	(Barliza, y otros, 2018)
Proceso Fenton (Fe²⁺ + H₂O₂)	Industria cafetera	pH = 3.73, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 6000 mg/L al 30%, Ion ferroso (Fe ²⁺) = 500 mg/L, Tiempo = 180 min.	*DQO = 80.5% Color = 85.3%.	(Ibarra Taquez, y otros, 2018)
Proceso Fenton (Fe²⁺ + H₂O₂)	Industria láctea	pH = 3, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 30,84 g al 30%, Ion ferroso (Fe ²⁺) = 3.65 g, Tiempo = 43.84 min.	*DQO = 78.93%	(Menéndez Escarcena, 2018)
Proceso Fenton (Fe²⁺ + H₂O₂)	Industria minera	pH = 4, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 200 mg/L al 30%, Ion ferroso (Fe ²⁺) = 327 mg/L, Tiempo = 120 min.	*DQO = 70%	(Xiangsong, y otros, 2019)
Proceso Fenton (Fe²⁺ + H₂O₂)	Industria automotriz	pH = 3, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 1200 mg/L al 30%, Ion ferroso (Fe ²⁺) = 400 mg/L, Tiempo = 60 min.	*DQO = 79%	(Jun, y otros, 2019)

Tabla 1. Aplicación del Proceso Fenton en el tratamiento de diversos efluentes industriales.

Fuente propia.

Asimismo, la literatura reportó la combinación de los POAs tales como Fenton, UV, O₃ y catalizadores como el TiO₂ en el tratamiento de efluentes. En la Tabla 2 se presentan algunos de ellos.

PROCESO DE OXIDACIÓN	TIPO DE EFLUENTE	CONDICIÓN DE OPERACIÓN	RESULTADOS	REFERENCIA
Procesos de oxidación avanzada (POAs) como son H₂O₂/UV, Foto -Fenton (Fe²⁺/H₂O₂/UV) + fotocatalisis heterogénea (TiO₂/H₂O₂/UV)	Industria textil	pH = 3, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 0.25, 0.5, 1. 2 y 5 g/L al 50 %, Ion ferroso (Fe ²⁺) = 40 y 200 mg/L, Tiempo = 2 horas.	Color = 94% *DQO = 86%	(López, 2016)
Procesos de oxidación basados en H₂O₂. Fenton Fe²⁺/H₂O₂ + H₂O₂/UV, Photo - Fenton	Industria farmacéutica	Fe ²⁺ /H ₂ O ₂ : Ion ferroso (Fe ²⁺) = 180 mg/L, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 3600 mg/L al 30%, Tiempo= 30 min.	*DQO = 70%	(Collivignarelli, et al., 2017)
Proceso basado en el empleo de ozono (O₃ + H₂O₂)	Industria química	pH = 7.9, 8, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 10 ml al 50%, O ₃ = 0.2 g/min, Tiempo = 5, 10, 15, 20 min.	*DQO = 1650 mg/L *A&G = 140 mg/L *SST = 80 mg/L	(Farfán Acosta, 2017)
Proceso Electro - Fenton	Agua residual	Peróxido de hidrógeno	*DBO ₅ = 75%, *DQO	(Ocampo Tello, y

	doméstica	(H ₂ O ₂) = 1 y 2.5 ml al 0.88 M de 30%, Tiempo = 5 y 30 min.	= 62.60%	otros, 2018)
Oxidación Fotocatalítica de Mentol (TiO₂/H₂O₂), Foto - Fenton (TiO₂/H₂O₂/UV), (TiO₂/H₂O₂/UV/O₃), Foto - Fenton (TiO₂/Fe²⁺/H₂O₂), (TiO₂/Fe²⁺/H₂O₂/UV) y (TiO₂/Fe²⁺/H₂O₂/UV/O₃)	Industrial textil	pH = 5.2, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 4, 4.5, 5, 5.5 y 6.0 mg/L al 30%, Ion ferroso (Fe ²⁺) = 0.217 g/L, Tiempo = 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 min.	*DQO = 70.77 %	(Delgado, y otros, 2017)
Fotocatálisis Heterogénea (TiO₂/H₂O₂/UV)	Industria alimentaria	pH = 3.22, DQO = 323 mg/L, DBO ₅ = 266.31 mg/L, O. D = 3,65 mg/L, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) = 0.5 g/L al 30%, TiO ₂ = 0.25 g/L, *UV artificial = 300, Tiempo = 2 horas.	*O. D = 3,65 mg/l *DBO ₅ = 73.3% *DQO = 67.19%	(Neyra A., y otros, 2018)

*DQO: Demanda química de oxígeno, DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno, A&G: Aceites y grasas, SST: Sólidos suspendidos totales, UV: Radicación ultravioleta. O. D: Oxígeno disuelto.

Tabla 2. Procesos oxidativos avanzados (incluyendo H₂O₂) en el tratamiento de efluentes industriales.

Fuente propia.

Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales industriales han ido incorporando aplicaciones en la remoción de una gran variedad de agentes contaminantes (López, 2014 pág. 35). A continuación, en la Figura 1 se muestra la clasificación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales industriales:

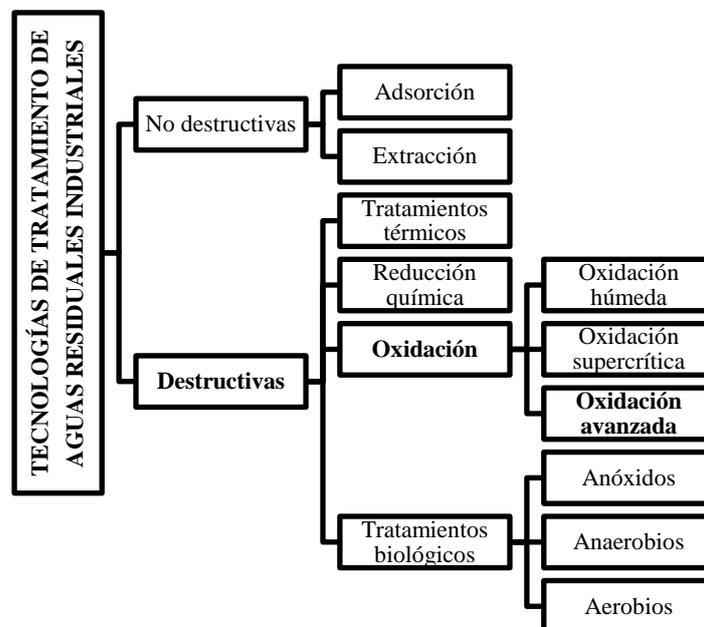


Figura 1. Clasificación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales industriales.

Adaptado de: (López, 2014 pág. 36).

Los POAs son un conjunto de métodos de tratamiento de aguas residuales para la remoción de agentes contaminantes (Pelayo, 2018 pág. 18). Asimismo, estos tratamientos se basan en la formación de radicales hidroxilos (OH^\bullet), por lo que contienen un elevado poder de oxidación (Heponiemi, 2012 pág. 6). A continuación, en la Figura 2 se muestra la clasificación de los tipos de POA:

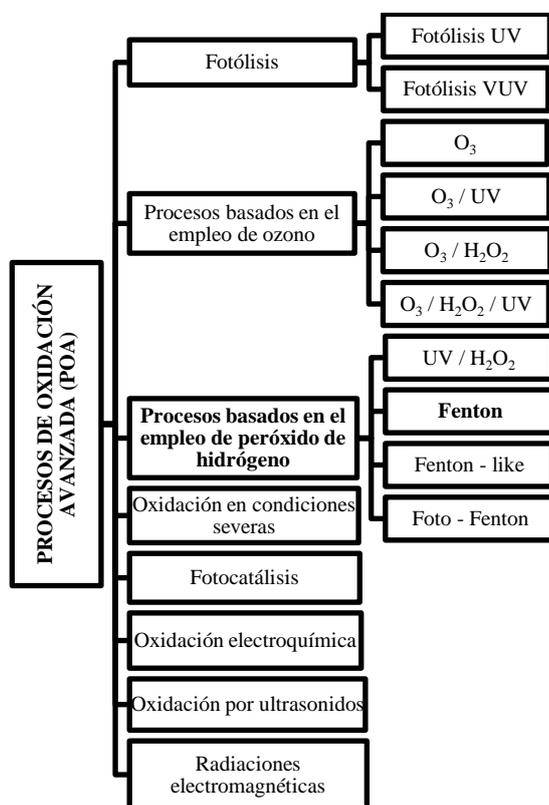


Figura 2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (POA).

Adaptado de: (Farfán, 2017 pág. 25).

El potencial de oxidación de los agentes oxidantes va a depender de cada agente oxidante. (Dheea, y otros, 2018 pág. 2). Se llega a un alto potencial de oxidación tenemos al flúor y radical hidroxilo, mientras que con un bajo potencial de oxidación al dióxido de cloro y el cloro. (LENNTECH, 2019 pág. 1). A continuación, en la Tabla 3 se muestra la escala del potencial de oxidación de los agentes oxidantes:

AGENTE OXIDANTE	POTENCIAL DE OXIDACIÓN (V)
Flúor	3.00
Radical hidroxilo	2.80
Ozono	2.10

Peróxido de hidrógeno	1.80
Permanganato de potasio	1.70
Dióxido de cloro	1.50
Cloro	1.40

Tabla 3. Escala del potencial de oxidación de los agentes oxidantes.

Fuente. (LENNTECH, 2019 pág. 1).

Los POAs han demostrado tener un potencial considerable en el tratamiento de efluentes. Sin embargo, existen algunos aspectos positivos y negativos a considerar (Punzi, 2015 pág.

7). A continuación, en la Tabla 4 se muestra los aspectos positivos y negativos del POA:

ASPECTOS POSITIVOS	ASPECTOS NEGATIVOS
No transfieren de fase los contaminantes, pero si transforman químicamente los compuestos.	Pueden formar subproductos de reacciones indeseables en algunos casos.
Poseen potencial para transformar productos refractarios en compuestos biodegradables.	Necesitan en algunos procesos, de tiempos de reacción grandes.
En algunos casos, consumen menos energía que otros métodos.	Los costos de inversión y operación pueden ser elevados.

Tabla 4. Aspectos positivos y negativos.

Fuente. (Rodríguez, y otros, 2008 pág. 4).

El proceso Fenton consiste en la adición de Fe^{2+} en presencia de H_2O_2 , en un medio ácido (Miller, et al., 2016 p. 2). Asimismo, la reacción Fenton es muy útil para degradar contaminantes, ya que es muy efectiva en la generación de (OH^\bullet) (Terán, 2016 pág. 27). A continuación, se muestra la ecuación (1) del proceso Fenton (Sánchez, y otros, 2018 pág. 5):



Los reactivos que se utilizaron en el proceso Fenton fueron los siguientes:

- **El sulfato ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$):** es un buen catalizador y a su vez es el más soluble en el agua. Además, puede ser eliminado aumentando el pH de la solución

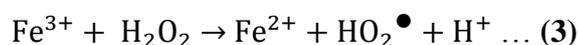
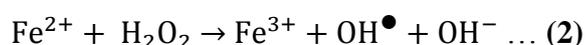
si su concentración después del tratamiento excede a un nivel no permitido. Tiene una densidad de 2.84 g/cm³ (Rubio, y otros, 2014 pág. 8).

- **El peróxido de hidrógeno (H₂O₂):** es un poderoso oxidante muy superior al KMnO₄, ClO₂ y Cl (Ver Tabla 3). Además, tiene la capacidad de generar OH[•], ya sea en presencia o ausencia de radiación. Asimismo, los OH[•] son especies con mayor energía para degradar compuestos. Tiene una densidad de 1.11 g/cm³ (Castillo Hilario, 2015 pág. 36).

La clasificación del proceso Fenton se muestra a continuación:

- **El proceso Fenton Homogéneo:** consiste en la adición de Fe²⁺ en un medio ácido (pH ≤ 3.5) para iniciar la descomposición oxidativa del H₂O₂ en radicales hidroxilos (OH[•]), los cuales son capaces de oxidar la materia orgánica que se encuentra presente en el agua residual (García Herrera, 2014 pág. 14).

La velocidad de reacción de la ecuación (2) es mayor que la de la ecuación (3), ya que el Fe³⁺ consume el H₂O₂, siendo esto no beneficioso para el proceso (Zhang, et al., 2019 p. 3). A continuación, se muestran las siguientes reacciones:



Las principales ventajas y desventajas del proceso Fenton Homogéneo se muestra a continuación, en la Tabla 5:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Operación simple y flexible.	Riesgos y altos costos asociados al almacenamiento y transporte del peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂).
Manejo sencillo de los compuestos químicos utilizados.	Utilización de cantidades elevadas de agentes químicos utilizados para acidificar el pH.
El ión férrico (Fe ³⁺) formado en la ecuación (2) es mucho más rápida que la ecuación (3).	El precipitado del Ion ferroso (Fe ²⁺) conlleva a una producción de iones férricos residuales (lodos).

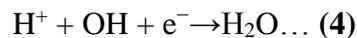
Tabla 5. Ventajas y desventajas del proceso Fenton.

Adaptado de: (García, 2014 pág. 15)

- **El proceso Fenton Heterogéneo:** es muy útil para el tratamiento de distintos contaminantes orgánicos en un medio acuoso. Sin embargo, para que sea eficiente la tasa de degradación de contaminantes, es necesario incorporar radiación para acelerar la reacción, proceso conocido como Foto Fenton Heterogéneo (Escalante, 2014 pág. 7).

Las principales condiciones de operación que influyen en el proceso Fenton se muestran a continuación:

- **pH:** es una de las características principales que influye en el método Fenton, por lo que investigaciones han demostrado que sólo es efectivo para un rango de pH que oscila entre 2.5 – 3.5. Siendo, el pH 3.0 óptimo para la formación de radicales hidroxilos (OH^\bullet) a partir de la descomposición del H_2O_2 en presencia de Fe^{2+} (Matavos, et al., 2017 p. 4). Sin embargo, si los valores son más bajos de 3.0, el efecto negativo de la generación de OH^\bullet por H^+ (Ec. 4) se hace más fuerte disminuyendo la eficiencia de remoción de SST (Zhang, et al., 2019 p. 8).



- **Ion ferroso:** se usa para catalizar la reacción, ya que la presencia del Ion ferroso es esencial para la generación de radicales hidroxilos (OH^\bullet). Asimismo, estudios han demostrado que la dosis de Fe^{2+} aumenta la eficiencia del proceso Fenton y acelera hasta que se alcanza un punto donde más adición de Fe^{2+} se convierte en una ineficiencia del proceso (Bhawana, et al., 2018 p. 3). Además, se debe utilizar dosis entre 200 - 400 mg/L de Fe^{2+} (Sindhi, et al., 2017 p. 4). Por lo que, si se le añade altas concentraciones de Fe^{2+} disminuye el efecto de OH^\bullet (Ec. 5). El Fe^{2+} no puede añadirse sin ninguna limitación, ya que el exceso de este no solo incrementa los costes de operación, sino también presenta la generación de lodos de hierro, obteniéndose un efecto negativo sobre la degradación de los contaminantes orgánicos (Zhang, et al., 2019 p. 8):



- **Peróxido de hidrógeno:** cabe destacar que el H_2O_2 , requiere de grandes cantidades de Fe^{2+} para su descomposición en radicales hidroxilos (OH^\bullet). Es de esperar que la velocidad de degradación de las moléculas orgánicas sea mayor a medida que aumenta la concentración del oxidante y del catalizador” (Rubio, y otros, 2014 pág.

6). Por ello, la adición de peróxido de hidrógeno debe optimizarse entre 1 000 – 1 500 mg/L para que se utilice de manera eficiente (García, 2017 pág. 38).

- **Tiempo de reacción:** el tiempo necesario para completar una reacción Fenton está en un rango de 20 – 65 min, ya que se ha demostrado que con bajos períodos de reacción, se consiguen buenos niveles de degradación de agentes contaminantes (Abad, 2013 pág. 33).

La nomenclatura de los componentes químicos utilizados en las siguientes ecuaciones se muestra a continuación, en la Tabla 6:

NOMENCLATURA	
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno
Fe ²⁺	Ion ferroso
Fe ³⁺	Ion férrico
RH	Sustrato orgánico
R [•]	Radical orgánico
OH ⁻	Hidróxido
OH [•]	Radical hidroxilo

Tabla 6. Nomenclatura de los componentes químicos utilizados en las ecuaciones.

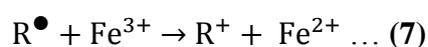
Fuente propia.

La remoción de la materia orgánica del efluente mediante el proceso Fenton, se explica a continuación:

- El proceso Fenton es potencialmente útil para destruir los contaminantes, ya que es muy efectivo para la generación de los radicales hidroxilos (OH[•]) (Ec. 2). Asimismo, estos radicales pueden oxidar los compuestos orgánicos (RH), mediante la abstracción de protones produciendo compuestos orgánicos (RH) en los radicales orgánicos (R[•]), y pueden oxidarse aún más (Neyens, et al., 2003 p. 4).



Por su parte, los iones férricos resultantes (Fe³⁺) (Ec. 2) pueden reaccionar con el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), lo cual conduce a la regeneración del Ion ferroso (Fe²⁺) (Ec. 3) (Rubio, y otros, 2014 pág. 4).



Además de formarse radicales hidroxilos (OH[•]), se generan radicales perhidroxilo (HO₂[•]) los cuales inician una reacción de oxidación en cadena para eliminar la

materia oxidable. Sin embargo, un exceso de Ion ferroso (Fe^{2+}) y/o peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al inicio del proceso, respecto a la cantidad de contaminante a tratar, limita la eficiencia del mismo (Neyens, et al., 2003 p. 4).



El diseño experimental orientado a la optimización del proceso Fenton para la remoción de la carga orgánica es el siguiente:

- **El diseño Box – Behnken:** es el que contempla 3 factores y 3 niveles, asimismo los diseños resultantes suelen ser más eficientes en términos del número de corridas requerido (Medina Valderrama, y otros, 2016 pág. 3). También en el diseño los 3 puntos centrales son para determinar el efecto de los factores operacionales seleccionados y sus interacciones sobre el porcentaje de remoción de la carga orgánica. Además, la metodología de superficie de respuesta se usa para determinar las condiciones de operación que maximicen o minimicen la variable respuesta de interés (Gil Pavas, y otros, 2018 pág. 4).

El marco legal, se muestra a continuación:

- **Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario:** Según el D.S. N° 010 - 2019 – VIVIENDA, en el Artículo 1.- Aprobación: Apruébese el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario y sus Anexos, los cuales forman parte integrante del presente Decreto Supremo (Ministerio de Vivienda, 2019 pág. 18).

Anexo 1:

PARÁMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	mg/L	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	1000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	500
Aceites y Grasas (A&G)	mg/L	100

Tabla 7. Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

Fuente. (Ministerio de Vivienda, 2019 pág. 27)

Anexo 2:

PARÁMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES
Aluminio (Al)	mg/L	10
Arsénico (As)	mg/L	0.5
Boro (B)	mg/L	4
Cadmio (Cd)	mg/L	0.2
Cobre (Cu)	mg/L	3
Cromo Total	mg/L	10
Manganeso (Mn)	mg/L	4
Mercurio (Hg)	mg/L	0.02
Níquel (Ni)	mg/L	4
Plomo (Pb)	mg/L	0.5
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	mg/L	1000
Zinc (Zn)	mg/L	10
Potencial Hidrógeno (pH)	Unidad	6 – 9
Sólidos Sedimentables (SS)	ml/L/h	8.5
Temperatura (T)	°C	<35

Tabla 8. Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

Fuente. (Ministerio de Vivienda, 2019 pág. 27)

- **Resolución Ministerial que aprueba los parámetros para las actividades que según la Clasificación Industrial Internacional Uniforme – CIIU, serán de cumplimiento obligatorio por parte de los usuarios no domésticos:** Según el D.S. N° 116 - 2012 – VIVIENDA.- Los parámetros que se establecen de acuerdo a la actividad industrial de la empresa “Conserva Ricofres S.R.L.” se encuentra en el anexo ítem 1, código CIIU N° 1020: Elaboración de conservación de pescado, crustáceos y moluscos (Ministerio de Vivienda, 2012).
- **Resolución Ministerial que aprueba el “Protocolo que se usara para monitorear efluentes de industrias pesqueras:** Según la Resolución Ministerial N° 061 – 2016 – PRODUCE.- Plantas de Consumo Humano Directo: La toma de muestra deberá realizarse después de la descarga de la materia prima luego del

tratamiento correspondiente hacia el emisario o red de alcantarillado según corresponda (Ministerio de la Producción, 2016).

A continuación, se muestra la formulación del problema:

- **PG:** ¿Cuánto es la máxima reducción de la carga orgánica mediante la optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$) en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019?
- **PE1:** ¿Qué dosis de Fe^{2+} , dosis de H_2O_2 , pH y efecto tiempo de reacción es el más óptimo de la reacción que se utilizó en la optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019?
- **PE2:** ¿Cuánto es la concentración del hierro residual en la optimización del proceso Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{2+}$) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019?

A continuación, se muestra la justificación:

- Las industrias pesqueras utilizan diferentes procesos en sus etapas de tratamiento de efluentes, por lo que no logran satisfacer la demanda total debido a que es sumamente costoso (Rueda, et al., 2015 p. 2). En este estudio, la empresa Conservas Ricofres S.R.L. utiliza un tratamiento convencional, pero no es un método efectivo para tratar los efluentes de las industrias pesqueras, debido a que no están cumpliendo con lo establecido en el D.S. 010 - 2019 – VIVIENDA. Sin embargo, uno de los tratamientos más efectivos es el POA mediante el proceso Fenton, teniendo como finalidad alcanzar los VMA (Ministerio de Vivienda, 2019 pág. 27). Asimismo, es importante desarrollar prácticas de nuevas tecnologías que no generen daño a la salud ni al medio ambiente, como el proceso Fenton mediante el Fe^{2+} y el H_2O_2 , ya que es más accesible económicamente para las industrias al tratar sus efluentes (Anam Asghar, y otros, 2015 pág. 3).

A continuación, se muestra la hipótesis:

- **HG:** La reducción de la carga orgánica mediante la optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$) es un 90% en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019.
- **HE₁:** La dosis 300 mg/L de Fe^{2+} , dosis 1400 ml/L de H_2O_2 , pH de 2.5 y el efecto de tiempo de reacción de 25 minutos son los más óptimos que se utilizaron en la optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019.
- **HE₂:** La concentración del hierro residual es 5 mg Fe/L en la optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}$) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019.

A continuación, se muestra los objetivos:

- **OG:** Evaluar la máxima reducción de la carga orgánica mediante la optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}$) en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019.
- **OE₁:** Determinar la dosis de Fe^{2+} , dosis de H_2O_2 , pH y el efecto del tiempo de reacción más óptimo que se utilizó en la optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}$) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019.
- **OE₂:** Determinar la concentración del hierro residual en la optimización del proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}$) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019.

II. MÉTODO

2.1. Tipo y diseño de investigación

- **Tipo de investigación:** Aplicativa.

La investigación es de tipo aplicativo, dado que se manipularon las variables basados en los conocimientos teóricos ya establecidos (Hernandez, 2014 pág. 42).

- **Nivel de investigación:** Explicativa - Predictiva.

La investigación es de nivel explicativa, dado que son válidos para responder las causas de los eventos y fenómenos. Asimismo, da explicaciones del por qué se suscita un fenómeno y bajo qué condiciones se manifiesta (Metzier, 2015 p. 240). También, es de nivel predictiva, dado que tiene como propósito anticipar situaciones futuras a partir del conocimiento de las condiciones previas. Además, predice la dirección futura de los eventos investigados (Sanca, 2011 pág. 4).

- **Diseño de investigación:** Experimental.

El estudio es de diseño experimental, dado que se obtuvieron resultados mediante un proceso empírico (Suárez, y otros, 2016 pág. 12). Además, el diseño que se utilizó para este estudio es el diseño de Box – Behnken y la metodología de Superficies de Respuesta, que trata de un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas para modelar y estudiar las dificultades de como la variable de interés puede ser afectada (Ait-Amir, et al., 2015).

A continuación, en la Tabla 9 se muestra la codificación de los parámetros para evaluar el efecto de la dosis óptima de los reactivos del proceso Fenton:

Condiciones de Operación	Unidades	Símbolo	Código de Niveles		
			-	0	+
FeSO ₄ 7H ₂ O	mg/L	A ₁	200	250	300
H ₂ O ₂	mg/L	A ₂	1000	1200	1400
pH	0-14	A ₃	2.5	3.0	3.5

Tabla 9. Codificación de los parámetros para evaluar el efecto de la optimización.

Fuente propia.

A continuación, en la Tabla 10 se muestra la matriz experimental Box - Behnken para la aplicación del proceso Fenton:

N° de Experimento	A ₁	A ₂	A ₃	Plan de Experimentación		
				FeSO ₄ 7H ₂ O (mg/L)	H ₂ O ₂ (mg/L)	pH
1	0	-	-	250	1000	2.5
2	0	-	+	250	1000	3.5
3	0	+	-	250	1400	2.5
4	0	+	+	250	1400	3.5
5	-	0	-	200	1200	2.5
6	-	0	+	200	1200	3.5
7	+	0	-	300	1200	2.5
8	+	0	+	300	1200	3.5
9	-	-	0	200	1000	3.0
10	-	+	0	200	1400	3.0
11	+	-	0	300	1000	3.0
12	+	+	0	300	1400	3.0
13	0	0	0	250	1200	3.0
14	0	0	0	250	1200	3.0
15	0	0	0	250	1200	3.0

Tabla 10. Matriz de experimentación Box Behnken para la aplicación de la optimización del proceso Fenton.

Fuente propia.

2.2. Operacionalización de variables

- **Variable 1:** Variable Independiente

VI: Optimización del proceso Fenton (Fe²⁺/ H₂O₂).

- **Variable 2:** Variable Dependiente

VD: Reducción de la carga orgánica del efluente.

A continuación, en la Tabla 11 se muestra la matriz de operacionalización de variables de la investigación:

“Optimización del proceso Fenton (H ₂ O ₂ / Fe ²⁺) para la reducción de la carga orgánica en el tratamiento de efluentes de la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L., 2019”					
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDICIÓN
Variable Independiente: Optimización del proceso Fenton (H ₂ O ₂ /Fe ²⁺)	El proceso Fenton para aguas residuales industriales se centra en la generación de radicales hidroxilos en un medio ácido añadiendo el peróxido hidrógeno y el sulfato de hierro, estos ayudarán en la reducción de los niveles de materia orgánica. (Vrushali, et al., 2015).	Para la reducción de la carga orgánica del efluente de la industria pesquera se tomó en cuenta la siguiente metodología: Se recolectó 45 L del efluente; con ello se hizo 36 experimentos cada uno de 0.5 L, a estos se les llevó a pH ácidos. Asimismo, se procedió a llevar los ensayos a un Floculador donde se le agregó el Fe ²⁺ en el cual se homogenizó por 3 minutos a 100 rpm y se disminuyó por 3 minutos a 30rpm, se dejó reposar por 10 minutos y luego se añadió el H ₂ O ₂ donde se agitaron los experimentos por 35 minutos a 30 rpm. Se pasó a elevar el pH a 7 con NaOH y se detendrá la reacción del método Fenton con MnO ₂ . Además, se dejó reposar para la sedimentación por 10 minutos y se procedió a filtrar. Finalmente, se evaluó los indicadores de tiempo, dosis y pH para verificar los niveles de reducción de contaminantes durante el método.	Dosis óptima de Fe ²⁺	200	mg/L
				250	mg/L
				300	mg/L
			Dosis óptima de H ₂ O ₂	1000	mg/L
				1200	mg/L
				1400	mg/L
			pH óptimo	2.5	0 - 14
				3.0	0 - 14
				3.5	0 - 14
			Tiempo de reacción óptimo	25	min
				35	min
				45	min
55	min				
65	min				
Variable Dependiente: Reducción de la carga orgánica del efluente	La materia orgánica son residuos líquidos combinados con sólidos que proceden de la mezcla de los servicios, oficinas, del proceso productivo y limpieza de equipos originados en la industria. (STRUCPLAN, 2016).	Para la caracterización de los parámetros relacionados con la carga orgánica del efluente de la industria pesquera se tomó en cuenta la siguiente metodología: Se recolectó 4 L del efluente que fueron tomados terminando el tratamiento secundario (IAF – físico) para medir los indicadores de DQO, A&G, SST y 2 L para la caracterización del efluente crudo. Finalmente, se evaluó los parámetros fisicoquímicos después del tratamiento de aguas residuales industriales de una empresa industrial pesquera.	Parámetros relacionados con la carga orgánica del efluente	DQO	mg/L
				A&G	mg/L
				SST	mg/L

Tabla 11. Matriz de operacionalización de las variables.

Fuente propia.

2.3. Población, muestra y muestreo

- **Población:** Esta investigación posee de población la totalidad de $2\text{m}^3/\text{día}$ por 1 tonelada de materia prima de efluente producido que genera la industria pesquera Conservas Ricofres S.R.L.
- **Unidad de análisis:** Muestra de efluente.

A continuación, en la Imagen 1 se observa la ubicación de la empresa Conservas Ricofres S.R.L que se encuentra en la Av. Roosevelt S/N Zona Industrial, Chancay - Huaral, Lima.



Imagen 1. Vista satelital de la ubicación del establecimiento industrial pesquero

Conservas Ricofres S.R.L

Fuente. Google Earth.

- **Muestra:** La muestra para este estudio es de 51 L de efluente generado del proceso productivo, fue recolectado antes y después del tratamiento secundario, de ello se utilizará 6 L para la caracterización de los parámetros fisicoquímicos y 45 L para realizar el proceso Fenton.

- **Tipo de muestreo:** Muestreo puntual.

A continuación, en la Figura 3 se muestra los puntos de muestreo para el desarrollo de la parte experimental del presente proyecto de investigación:

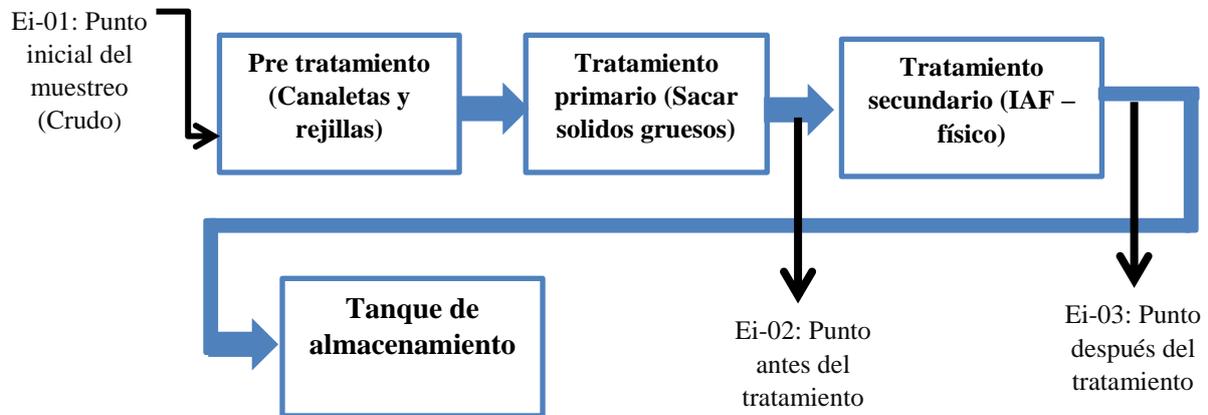


Figura 3. Puntos de Monitoreo de efluente.

Fuente propia.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

- **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Técnica: Observación.

Instrumentos de recolección de datos: Fichas técnicas.

- Ficha de cadena de custodia para el registro de muestreo (Ver anexo N° 3).
- Ficha del reporte de resultados de la caracterización fisicoquímica del efluente (Ver anexo N° 3).
- Ficha de variables (Ver anexo N° 4).

- **Validez del instrumento:** Para cumplir con los requisitos de validación del instrumento, se utilizó equipos previamente hechos el mantenimiento cada uno con su estándar de calibración de acuerdo al equipo. A continuación, en la Tabla 12 se muestra la validez del instrumento con las marcas y modelos de los equipos de laboratorio:

EQUIPOS		MARCA	MODELO
<p>➤ pH metro, se usó para medir el potencial de hidrógeno (pH).</p>		HANNA	HI 8424
<p>Para la calibración del equipo se realizará con al menos dos soluciones tampón estándar que abarcan el rango de valores de pH a medir los cuales son apropiados tampones a pH 4,00 y pH 10,00. Este tiene un control de calibración para establecer la lectura del medidor igual al valor del primer amortiguador estándar y un segundo control que se usa para ajustar la lectura del medidor al valor del segundo amortiguador y un tercer control permite ajustar la temperatura (LABORATORIO QUIMICO, 2018 pág. 1).</p>	<p>El pH metro antes del uso se debe de verificar que la membrana de vidrio este limpia ya que si está con grasa o agua afectará a la medida de solución y para evitar daños en el electrodo, debe de mantenerse húmedo. Por ello cada vez de su uso se deberá ser enjuagado con agua destilada (Admin, 2018).</p>		
<p>➤ Colorímetro, se determinará el DQO.</p>		HACH	DR/890
<p>Con este equipo hará la lectura del consumo de dicromato mediante el cambio en la absorbancia de la muestra debido al color de cromo trivalente (Cr^{3+}) y el cromo hexavalente (Cr^{+6}) después de la digestión, para así correlacionar con la concentración de DQO, estos se basan en filtros para medir la luz en una longitud de onda específica el color violeta (430nm), azul (470nm), verde (565nm), y rojo (635nm) (HANNA Intruments, 2018 pág. 1).</p>	<p>El colorimétrico de acuerdo al valor numérico y color podemos ver su clasificación en la escala de colores, este es común para estimar el DQO, es necesario usar un color diferente de luz; una solución de sulfato de cobre ($CuSO_4$), use el diodo emisor de luz rojo (635nm) para obtener un buen resultado. Los valores deben estar en los rangos: Transmitancia: 10% – 90% Absorbancia: 0.05 – 1.0 (Burgos Galeano, y otros, 2018 pág. 3).</p>		
<p>➤ Reactor digital, se utilizó para mantener un control de temperatura en la determinación de DQO.</p>		HACH	DRB 200
<p>El reactor digital se usará para las digestiones estándar y para mantener un sistema de control de temperatura muy preciso: 150+ 2°C o 100+ 2°C según lo demandan los métodos estándar (HUALIX, 2017 pág. 1).</p>	<p>El reactor digital usará para determinar digestiones en análisis de muestras biológicas. Su control de temperaturas en el reactor 37 a 165 °C en incrementos de 1 °C (HACH, 2019 pág. 1).</p>		
<p>➤ Estufa de secado, se determinó SST y A&G.</p>		DAIHAN Scientific	43 LT
<p>La estufa de secado se usará para secar recipientes de vidrio, quitará toda la humedad del recipiente de metal o vidrio (LABORATORIO QUIMICO, 2018 pág. 1).</p>	<p>La estufa de secado es un equipo que se utiliza para esterilizar recipientes de vidrio y metal en el laboratorio. Las estufas operan, por lo general, entre la temperatura ambiente y los 350°C (López Galindo, 2012 pág. 9).</p>		

<p>➤ Balanza analítica, se utilizó para pesar diferentes reactivos.</p>			
<p>La balanza analítica nos permitirá medir la masa de los diferentes reactivos a utilizar en la parte experimental del proyecto dependen de este básicamente todos los resultados analíticos, ya que estas balanzas nos ofrecen valores de precisión de lectura de 0,1 µg a 0,1 mg (LABORATORIO QUIMICO, 2018 pág. 1).</p>	<p>La balanza analítica nos ayudará para análisis cuantitativos, a su vez son capaces de ofrecer valores de precisión de lectura de 0,1 µg a 0,1 mg (SOLVITINTAS, 2018 pág. 2).</p>	KEYI	658745
<p>➤ Floculador (Test de Jarra), se usó para la agitación rpm.</p>			
<p>El floculador nos ayudara agitar los ensayos a realizarse en el método Fenton a diferentes tiempos ya que cuenta con un agitador de palas normalizado alternando velocidades de mezclado rápido o lento y cumple con el propósito de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento (Otiniano Aguilar, 2016 pág. 16).</p>	<p>El floculador es un equipo que se utiliza en rangos de 3000 a 5000 segundos. Este dispone además de un controlador de tiempos y una pantalla iluminada por la parte posterior para observar bien el aspecto de las muestras tratadas (Rivera Ñacari, 2017 pág. 39).</p>	VELP	JLT6
<p>➤ Espectrofotómetro de absorción atómica, se usó para determinar el Ion ferroso residual.</p>			
<p>Este equipo sirve para una técnica empleada cuando se requieren mediciones cuantitativas y análisis de espectros de luz específicos. Tiene complejas composiciones químicas y físicas que normalmente varían con la fuente del petróleo crudo. Su composición se basa en aproximadamente 84% C, 10% H₂, 1% O₂ y 5% trazas de elementos como S, Ni, V y Fe. (Hidalgo Porras, 2017 pág. 2)</p>	<p>La espectrofotometría es posible detectar la absorbancia de determinados elementos cromóforos en el rango de longitudes de onda comprendido entre 190 y 700 nm, es decir, desde el cercano UV (190 a 400 nm) hasta todo el espectro visible (400 a 700 nm) inclusive. Esta técnica se basa en la capacidad de las moléculas en solución de absorber la radiación incidente, ya sea en forma total o parcial. (Camelino, y otros, 2018)</p>	PGINSTRUMENTS	AA500
<p>➤ Conductímetro, se usó para determinar las sales de la muestra.</p>			
<p>La escala para medir aquellas soluciones (acuosas) se inicia con el agua ultrapura, por medio de una conductividad de 0.05 µS/cm (25 °C), sigue el agua natural; por ejemplo, el agua potable o el agua superficial se encuentra en el rango de 100 – 1000 µS/cm aproximadamente y en el extremo de la parte superior de la escala</p>	<p>Para la calibración del equipo se realiza lo siguiente: patrones: 147 µS/cm, 1413 µS/cm, 12.88 mS/cm y 111.8 mS/cm. Con 1, 2 ó 3 patrones a seleccionar dentro de la gama. Tiempo de validez programable entre 0 y 99 días. Aviso automático de</p>	CRISON	BASIC 30

permanecen algunas bases y ácidos. (OZPerú, 2019 pág. 1)	recalibración. (EC-Meter, 2019 pág. 1)		
➤ Turbidímetro , se usó para determinar el grado de transparencia que pierde el agua.		HANNA	LP 2000-11 Turbidity Meter
Miden la turbidez de 0 a 50 NTU con la resolución de 0.01 y de 50 a 1000 NTU. La calibración es automática, simple y rápida. El microprocesador reconoce automáticamente los dos valores fijos de 0 y 10 NTU para poder así efectuar una calibración precisa. (HUALIX, 2019 pág. 1)	La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de turbidez, o Nephelometric Turbidity Unit (NTU). El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua. (SLU, 2016 pág. 1)		

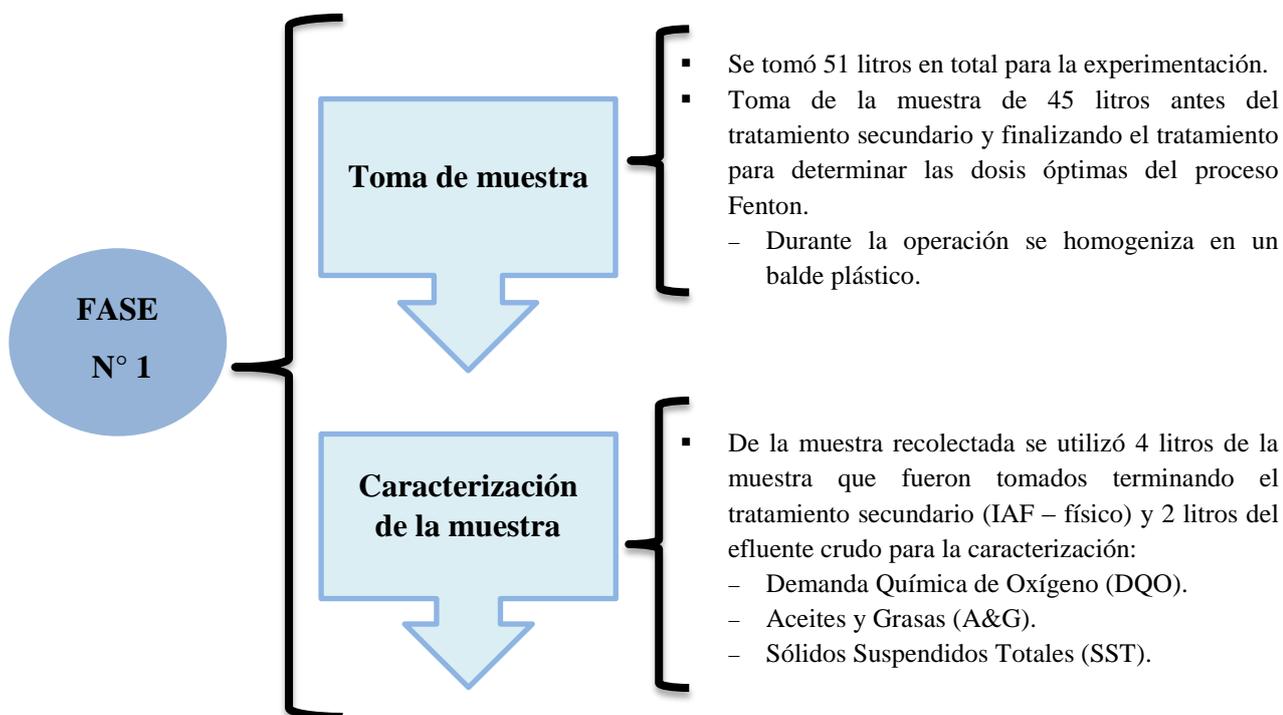
Tabla 12. Validez de las marcas y modelos de los equipos de laboratorio.

Fuente propia.

- **Confiabilidad:** Para cumplir con los requisitos de confiabilidad, se trabajará con todos los instrumentos calibrados previamente a su uso.

2.5. Procedimientos

A continuación, en la Figura 5 detalla las fases de la metodología en la investigación:



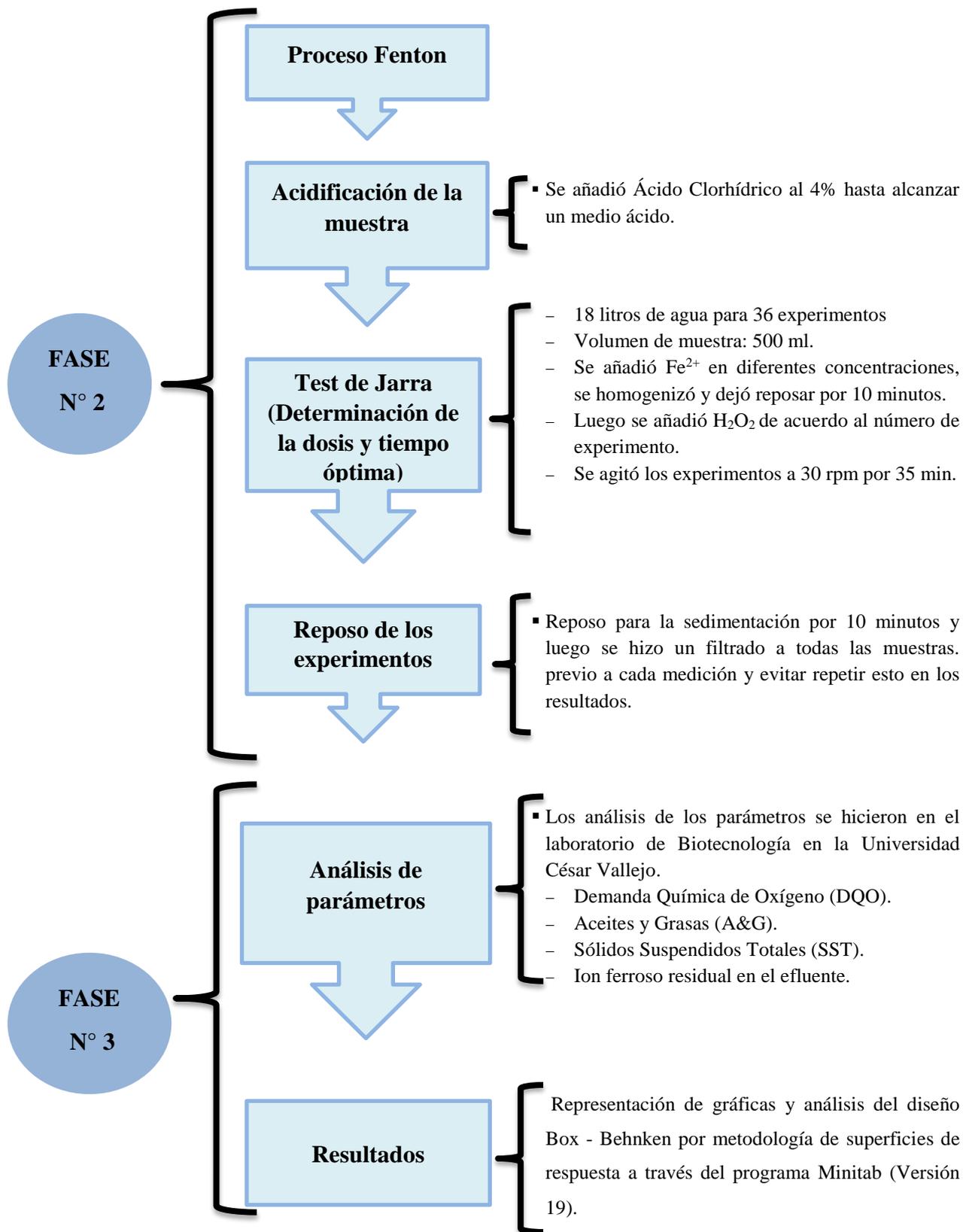


Figura 4. Esquema de la metodología utilizada en la investigación.
Fuente propia.

- **Determinación de parámetros relacionados con la carga orgánica del efluente:** Análisis de los parámetros en laboratorio se realizará siguiendo los métodos para lo establecido por el Standar Methods (Ministerio de Vivienda, 2019).

A. Potencial de Hidrógeno (pH): APHA-AWWA-WEF Part 4500-H + B. 22nd Ed. 2012: Para la determinación del pH se hará previamente el calibrado del pH metro con soluciones buffer, se tomará la muestra en un recipiente, se esperará que el agua este sin movimiento y se tomará el valor (APHA-AWWA-WEF., 2012).

B. Demanda Química de Oxígeno (DQO): APHA-AWWA-WEF Part 5220-D 22nd Ed. 2012. Método Reflujo Cerrado Colorimétrico: Ensayo donde una gran parte de la materia orgánica resultará oxidada (APHA-AWWA-WEF., 2012).

1) Preparación de Viales

- a) Muestra de agua residual 2.5 ml
- b) Solución de digestión 1.5 ml
- c) Reactivo H₂SO₄ 3.5 ml

- **Muestra en Blanco**

- a) Agua destilada 2.5 ml
- b) Solución de digestión 1.5 ml
- c) Reactivo H₂SO₄ 3.5 ml

- **Muestra Estándar**

- a) Dicromato de potasio-500mg/l (2.5 ml)
- b) Solución de digestión 1.5 ml
- c) Reactivo H₂SO₄ 3.5 ml

2) Llevar los viales al Reactor digital a una temperatura de 150 °C durante 120 min.

3) Enfriar y medir en el colorímetro la concentración.

C. Sólidos Totales en Suspensión (S.S.T): APHA-AWWA-WEF Part 2540-D 22nd Ed. 2012. Total suspended solids dried at 103 – 105 °C. Método Gravimétrico de Filtración: Se tomará 100 ml de muestra, se pasará por un filtro, se pesará al inicio y final después del secado en la estufa a 105°C (APHA-AWWA-WEF., 2012).

A continuación, en la ecuación (10) muestra cómo se determinará los SST (Farfán, 2017):

$$\text{SST} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{W_f - W_i}{V} \dots (10)$$

D. Aceites y Grasas (A&G): J. Bouquiaux, a. Mertens, Tribune Du C.B.E.D.E 1960. Método Gravimétrico de Evaporación: Ensayo donde la fase con el solvente (grasa) resultará seca (Mertens, 1960).

- 1) Se rotulará los vasos de precipitados de 50 ml y serán llevados a secar a la estufa por un tiempo de 30 min a 105°C. Se retirará a enfriar en el desecador por 30 min.
- 2) Luego se pesará los vasos y se llevará al desecador hasta su uso.
- 3) Pasaremos a medir un volumen de muestra de 100 ml y añadirá 5 ml de ácido clorhídrico.
- 4) Se llevará la muestra a una pera de decantación y añadirá 15 ml de hexano.
- 5) Agitaremos manualmente la pera de decantación conteniendo la muestra y el solvente por 10 min.
- 6) Se dejará decantar la muestra por 30 min, hasta la separación de dos fases.
- 7) Luego se desechará la fase acuosa y se vertirá la fase con el solvente en el vaso de precipitado pesado previamente.
- 8) Se llevará la muestra a la estufa por 20 min a una temperatura de 80 °C.
- 9) Finalmente se retirará la muestra de la estufa y se dejará enfriar en el desecador por 30 minutos y se toma el peso final de la muestra.

A continuación, en la ecuación (11) muestra cómo se determinará la concentración de A&G (Farfán, 2017):

$$\text{A\&G} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{W_f - W_i}{V} \dots (11)$$

E. Determinación del Ion ferroso residual: Se añadirá a las muestras de ensayo del proceso Fenton diferentes concentraciones de Ion ferroso 200, 250 y 300 mg/L a la muestra de efluente para reducir la carga orgánica. Finalmente se determinará cuánto de exceso de iones ferroso residual en el efluente (Ministerio del Ambiente, 2017).

2.6. Método de análisis de datos

Para demostrar la eficiencia del proceso Fenton en donde se usó el diseño Behnken, que incluye tres replicas en el punto central, se realizó con el fin de analizar la influencia de los factores: concentraciones de Fe^{+2} , concentraciones de H_2O_2 , pH y tiempo. Este diseño se basa en 3 factores y 3 niveles, con el fin de definir las condiciones óptimas. Cada variable independiente se codificó en tres niveles entre - (bajo), 0 (punto medio) y + (alto). La codificación de las variables se realizó mediante la ecuación (12) (Cristovao, et al., 2014):

$$x_i = \frac{X_i - X_z}{\Delta X_i}, i = 1, 2, 3, \dots, k \dots (12)$$

Dónde:

x_i = Valor adimensional de una variable independiente.

X_i = Valor real de una variable independiente.

X_z = Valor real de una variable independiente en el punto central

ΔX_i = Cambio de paso del valor real de la variable i correspondiente a una variación de una unidad para el valor adimensional de la variable i.

Los niveles de cada factor se muestran en la Tabla 9 y en la Tabla 10 de la matriz del diseño experimental.

El diseño experimental de Box – Behnken y superficie de respuesta se llevará a cabo utilizando el software Minitab versión 19. En la ecuación (13) describe el modelo de regresión del sistema actual, que incluye los términos de interacción del ANOVA (Cristovao, et al., 2014):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 \dots (13)$$

Dónde:

Y = Respuesta predicha, es decir, la eliminación de contaminantes; x_1 , x_2 y x_3 son los niveles codificados de los factores independientes (concentración de H_2O_2 , concentración de Fe^{2+} y pH). Los coeficientes de regresión son:

β_0 = Término de intercepción.

β_1 , β_2 y β_3 = Coeficientes lineales.

β_{12} , β_{13} , β_{23} = Coeficientes de interacción.

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ = Coeficientes cuadráticos.

Este modelo evaluará el efecto de cada factor independiente en la superficie de respuesta.

2.7. Aspectos éticos

Se llevaron a cabo manteniendo la aprobación de la información proporcionada por la empresa “Conservas Ricofres S.R.L.”, de donde se recolectó las muestras del efluente industrial pesquero. Asimismo, se mantiene los aspectos éticos de veracidad en los datos obtenidos, a fin de brindar información real en el desarrollo del proyecto.

III. RESULTADOS

Análisis Iniciales

Los resultados obtenidos en los análisis iniciales de la muestra respecto a de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Aceites & Grasas (A&G) y Sólidos Suspendedos Totales (SST) en 3 distintos puntos del proceso (Ei-01, Ei-02 y Ei-03) son presentados en la tabla 13:

Muestra	DQO (mg/L)	A&G (mg/L)	SST (mg/L)	Turbidez (NTU)	Conductividad (μS/cm)
Ei-01 = Inicio del muestreo (Crudo)	12200	5131	610	581	892000
Ei-02 = Antes del tratamiento secundario	5600	2516	284	198	198000
Ei-03 = Después del tratamiento secundario	3145.60	184	175	14.36	14360

VMA par A&G, DQO y SST= 100 mg/L, 1000 mg/L y 500 (Ministerio de Vivienda, 2019).

Tabla 13. Resultados de la caracterización del efluente en relación al A&G y DQO.

Fuente propia.

Con respecto al VMA para DQO, A&G y SST es 1000 mg/L, 100 mg/L y 500 mg/L respectivamente (Ministerio de Vivienda, 2019 pág. 18), sin embargo, los resultados presentados demuestran el no cumplimiento de los parámetros justificando la realización de este estudio.

3.2 Ensayos preliminares

Se realizaron 29 ensayos preliminares utilizando muestras recolectadas en el punto Ei-03. Dando como resultado que el ensayo más eficiente fue el N° 9 con las siguientes condiciones de operación: pH = 2.5, Fe₂SO₄ 7H₂O = 300 mg/L y H₂O₂ = 1400 mg/L, llevándose a realizar la determinación del DQO obteniendo un valor de 615 mg/L estando por debajo de los 1000 mg/L establecidos en el VMA. Estas pruebas fueron para determinar la eficiencia y de acuerdo a los resultados podemos decir que el proceso Fenton resultó eficiente, por ello se procedió a aplicarlo al punto de muestro Ei-02 (Ver Anexo 5), a fin de compararlo con el tratamiento secundario de la empresa.

3.3 Ensayos experimentales

Luego que se verificó las altas remociones del proceso Fenton en el punto Ei-03, se decidió realizar el tratamiento de las muestras en el punto Ei-02. Los resultados obtenidos de los 15 ensayos de la matriz Box – Behnken en la optimización del proceso Fenton de las muestras recolectadas en el punto Ei-02 fueron los siguientes (Tabla 14):

N° Muestra	A ₁	A ₂	A ₃	DQO (mg/L)	A&G (mg/L)	SST (mg/L)
1	0	-	-	749.8	1377	134
2	0	-	+	737.8	42	124
3	0	+	-	769.8	182	241
4	0	+	+	623.8	97	217
5	-	0	-	759.8	110	140
6	-	0	+	733.8	98	98
7	+	0	-	623.8	45	127
8	+	0	+	777.8	127	200
9	-	-	0	751.8	22	23
10	-	+	0	625.8	1357	96
11	+	-	0	759.8	74	105
12	+	+	0	779.8	97	92
13	0	0	0	623.8	97	217
14	0	0	0	731.8	92	68
15	0	0	0	797.8	102	102

VMA para DQO, A&G y SST es 1000 mg/L, 100 mg/L y 500 mg/L respectivamente (Ministerio de Vivienda, 2019).

Tabla 14. Resultados de los ensayos del proceso Fenton.

Fuente propia.

En la Tabla 14, se presentan los resultados de los parámetros de DQO, A&G y SST del efluente pesquero antes del tratamiento secundario (Ei-02), dando como resultado que en el parámetro de DQO todos los ensayos se encuentran dentro de lo establecido en la norma con valores menores a 1000 mg/L, pero con respecto al parámetro de A&G se puede observar que la mayoría de los ensayos cumplen con lo establecido en la norma con valores menores a 100 mg/L excepto algunos ensayos (Muestra N° 1, 3, 5, 8, 10 y 15) y en el parámetro de SST todos los ensayos se encuentran dentro de lo establecido en la norma con valores menores de 500 mg/L. Señalándose así que el tratamiento del efluente de la industria pesquera en el punto Ei-02, llega a reducir de manera eficiente la carga orgánica que lleva consigo mediante el proceso Fenton.

3.4 Matriz del diseño Box - Behnken

Los resultados obtenidos en la matriz del diseño Box - Behnken sobre los valores actuales vs. los valores predichos en el % Remoción de acuerdo al análisis estadístico ANOVA, se presentan en la Tabla 15:

N° Muestra	A1	A2	A3	% Remoción			
				Valores Actuales (%)		Valores Predichos (%)	
				DQO	SST	DQO	SST
1	0	-	-	86.8	56.3	86.3	54.9
2	0	-	+	86.1	50.4	86.3	51.9
3	0	+	-	86.1	29.6	86.3	26.5
4	0	+	+	85.8	65.1	86.3	64.9
5	-	0	-	88.9	23.6	88.5	25
6	-	0	+	87	69	88.5	67.3
7	+	0	-	86.9	65.5	86.4	65.6
8	+	0	+	86.4	61.6	86.4	58.7
9	-	-	0	88.8	66.2	88.5	64.2
10	-	+	0	89.2	44	88.5	43.2
11	+	-	0	86.1	67.6	86.4	66.8
12	+	+	0	86.2	72.2	86.4	72.6
13	0	0	0	86.9	76.1	86.3	70.1
14	0	0	0	86.5	69.4	86.3	70.1
15	0	0	0	86.4	67.3	86.3	70.1

Tabla 15. Resultados de los resultados actuales y resultados predichos.

Fuente propia.

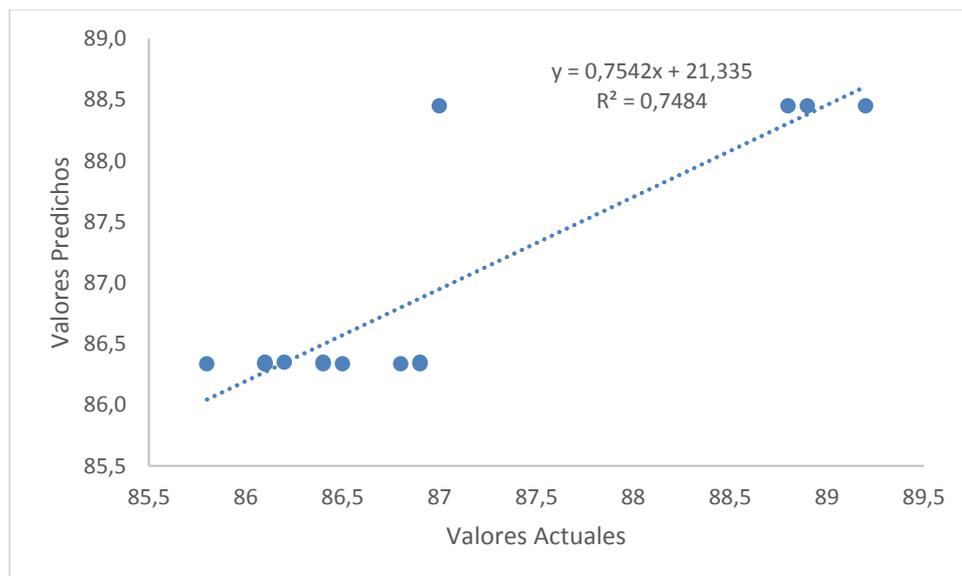


Figura 5. Valores actuales vs. Valores predichos para DQO.

Fuente propia.

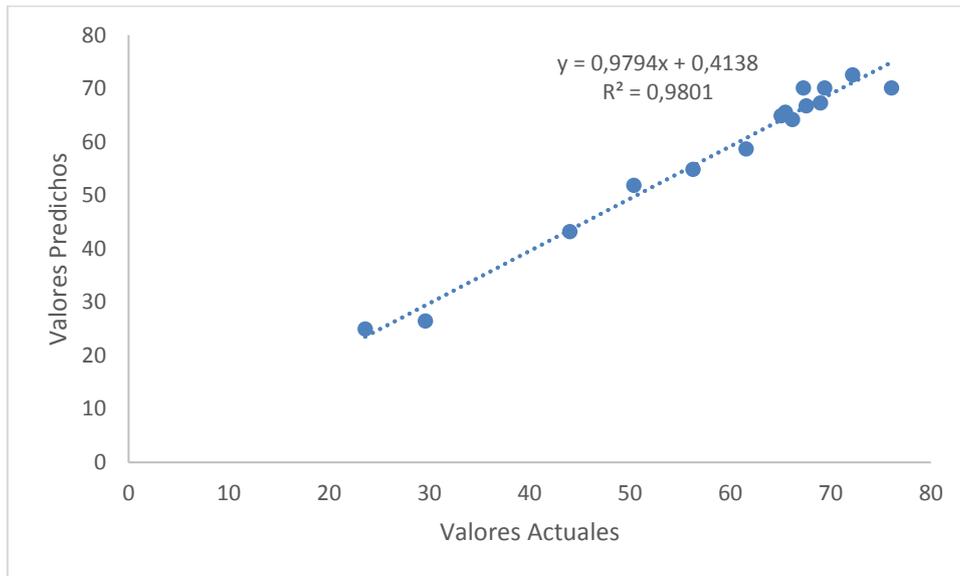


Figura 6. Valores actuales vs. Valores predichos para SST.

Fuente propia.

En la Figura 5 y 6, se muestran los valores actuales vs. los valores predichos, con respecto al DQO se obtuvo un $R^2 = 0.7484$ y para SST se obtuvo un $R^2 = 0.9801$, por lo que coincide con el modelo cuadrático del análisis de varianza (ANOVA) mediante el programa Minitab (Versión 19), en donde arrojó que ambos parámetros fueron significativos.

Aplicando los datos experimentales en el análisis estadístico ANOVA, el modelo de regresión de segundo orden de la superficie de respuesta, se ajustó a las ecuaciones 12, 13 y 14:

$$\begin{aligned} \% \text{ Remoción del DQO} &= 118.21 - 0.2340 \text{ Sulfato ferroso} \\ &+ 0.000426 \text{ Sulfato ferroso} * \text{Sulfato ferroso} \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Remoción del A\&G} &= -500 - 159 \text{ pH} + 0.744 \text{ Peróxido de hidrógeno} \\ &+ 2.86 \text{ Sulfato ferroso} + 24.9 \text{ pH} * \text{pH} - \\ &0.000172 \text{ Peróxido de hidrógeno} * \text{Peróxido de hidrógeno} - \\ &0.00253 \text{ Sulfato ferroso} * \text{Sulfato ferroso} + 0.0043 \text{ pH} * \text{Peróxido de hidrógeno} \\ &+ 0.017 \text{ pH} * \text{Sulfato ferroso} - \\ &0.001268 \text{ Peróxido de hidrógeno} * \text{Sulfato ferroso} \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Remoción del SST} &= -586 + 354.7 \text{ pH} - 0.106 \text{ Peróxido de hidrógeno} \\ &+ 1.221 \text{ Sulfato ferroso} - 56.32 \text{ pH} * \text{pH} - \\ &0.000163 \text{ Peróxido de hidrógeno} * \text{Peróxido de hidrógeno} - \\ &0.000772 \text{ Sulfato ferroso} * \text{Sulfato ferroso} + 0.1035 \text{ pH} * \text{Peróxido de hidrógeno} - \\ &0.4930 \text{ pH} * \text{Sulfato ferroso} \\ &+ 0.000670 \text{ Peróxido de hidrógeno} * \text{Sulfato ferroso} \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	12.8542	6.42711	17.85	0.000
Lineal	1	8.6112	8.61125	23.91	0.000
Sulfato ferroso	1	8.6112	8.61125	23.91	0.000
Cuadrado	1	4.2430	4.24296	11.78	0.005
Sulfato ferroso*Sulfato ferroso	1	4.2430	4.24296	11.78	0.005
Error	12	4.3218	0.36015		
Falta de ajuste	10	4.1818	0.41818	5.97	0.152
Error puro	2	0.1400	0.07000		
Total	14	17.1760			

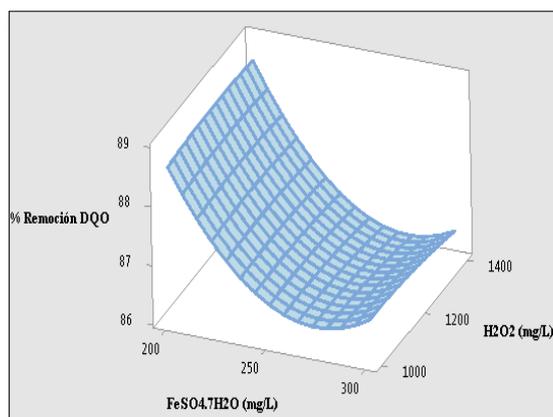
Nota: $R^2 = 74.84\%$; R^2 (ajustado) = 70.64 %, R^2 (pred.) = 57.58 %.

Tabla 16. Análisis de varianza para la Remoción del DQO.

Fuente propia.

El análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático ajustado en la optimización del proceso Fenton para el % de Remoción del DQO se considera estadísticamente significativo, ya que el valor-p es inferior a 0.05, con un intervalo de confianza del 95%, siendo este modelo ajustado. El gráfico de Pareto muestra el efecto estadísticamente relevante, además de acuerdo a los resultados de ANOVA (Tabla 16) y para el gráfico de Pareto (Ver Anexo 11), es posible observar que los términos lineales y cuadráticos de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (C) y (CC) es el factor que más afecta en la remoción del DQO. Sin embargo, las concentraciones de H_2O_2 y el pH no influyen significativamente en el proceso.

Gráficas de superficie de respuesta para DQO



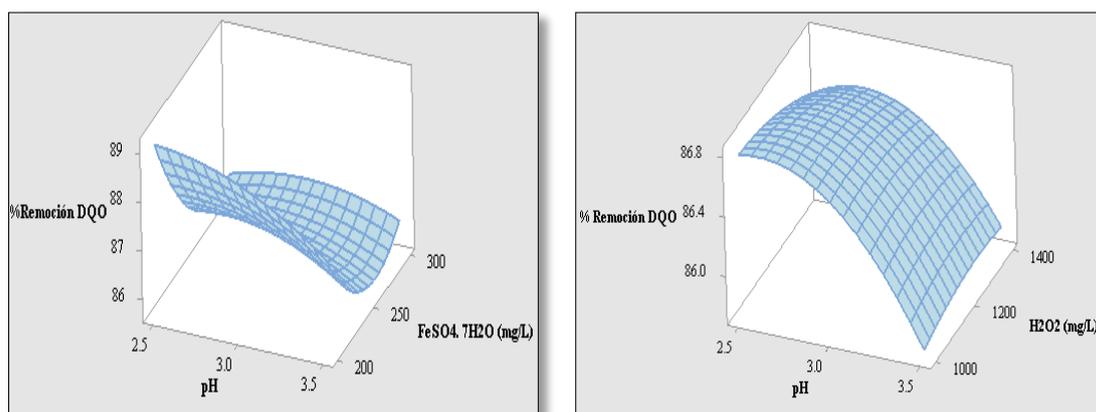


Figura 7. Superficie de respuesta para el % de Remoción del DQO mediante el proceso Fenton: $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, H_2O_2 y pH.

Fuente propia.

Los gráficos de superficie de respuesta (Fig. 5) muestran la remoción del DQO en función a tres factores. Además, según el modelo las condiciones de operación óptimas fueron: pH = 2.5, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ = 200 mg/L y H_2O_2 = 1000 mg/L. Asimismo, los gráficos de superficie de respuesta muestran el aumento de remoción del DQO con las mayores concentraciones de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Sin embargo, la concentración del H_2O_2 y el pH no juegan un papel importante en el DQO.

- **Aceites y Grasas (A&G)**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	1706.29	189.588	1.45	0.356
Lineal	3	571.67	190.557	1.46	0.332
pH	1	0.12	0.125	0.00	0.977
Peróxido de hidrógeno	1	246.42	246.420	1.89	0.228
Sulfato ferroso	1	325.13	325.125	2.49	0.176
Cuadrado	3	490.56	163.519	1.25	0.385
pH*pH	1	143.65	143.654	1.10	0.342
Peróxido de hidrógeno*Peróxido de hidrógeno	1	173.89	173.885	1.33	0.301
Sulfato ferroso*Sulfato ferroso	1	147.13	147.130	1.13	0.337
Interacción de 2 factores	3	644.07	214.689	1.64	0.292
pH*Peróxido de hidrógeno	1	0.72	0.723	0.01	0.944
pH*Sulfato ferroso	1	0.72	0.722	0.01	0.944
Peróxido de hidrógeno*Sulfato ferroso	1	642.62	642.622	4.92	0.077
Error	5	653.39	130.677		
Falta de ajuste	3	652.85	217.615	805.98	0.001
Error puro	2	0.54	0.270		
Total	14	2359.68			

Nota: $R^2 = 72.31\%$; R^2 (ajustado) = 22.47 %, R^2 (pred.) = 0.00 %.

Tabla 17. Análisis de varianza para la Remoción de A&G.

Fuente propia.

El modelo cuadrático ajustado para el % de Remoción de A&G en el análisis de varianza (ANOVA) no fue estadísticamente significativo, ya que el valor-p son superiores a 0.05, con un intervalo de confianza del 95%. El gráfico de Pareto muestra el efecto estadísticamente relevante de los factores (A, B, C), además de acuerdo a los resultados de ANOVA (Tabla 17) y para el gráfico de Pareto (Ver Anexo 11), es posible observar que los términos lineales y cuadráticos de los factores no afectan en la remoción de A&G.

Gráficas de superficie de respuesta para A&G

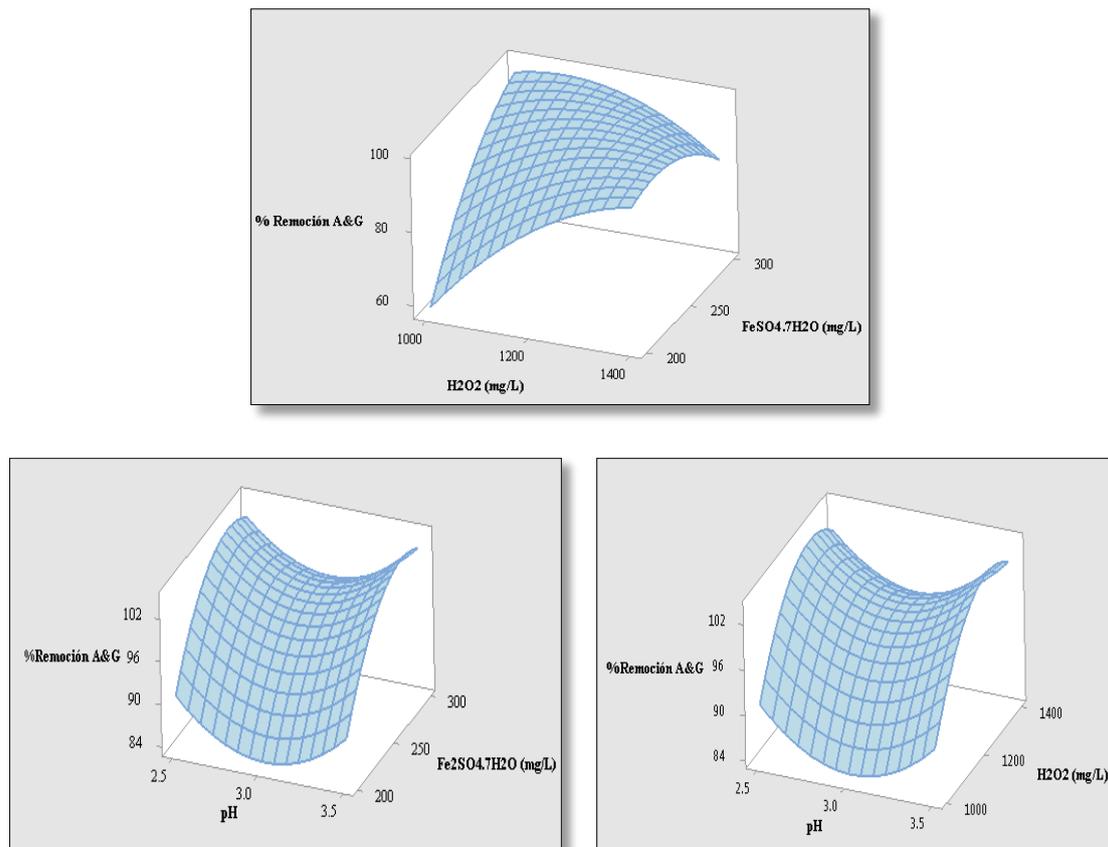


Figura 8. Superficie de respuesta para la eliminación del A&G de efluente pesquero por el proceso Fenton: $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, H_2O_2 y pH.

Fuente propia.

En la Figura 6, se muestra los gráficos de superficie en relación a la remoción de A&G. Siendo las condiciones de operación óptimas las siguientes: pH = 3.5, $FeSO_4 \cdot 7H_2O = 300$ mg/L y $H_2O_2 = 1000$ mg/L. Asimismo, los gráficos de superficie de respuesta muestran la baja remoción de A&G con el mayor rango de pH. Sin embargo, las concentraciones del H_2O_2 y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ no juegan un papel importante en el A&G.

- **Sólidos Suspendedos Totales (SST)**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	3312.54	368.060	27.52	0.001
Lineal	3	1255.02	418.341	31.28	0.001
pH	1	631.90	631.901	47.25	0.001
Peróxido de hidrógeno	1	109.52	109.520	8.19	0.035
Sulfato ferroso	1	513.60	513.601	38.40	0.002
Cuadrado	3	841.85	280.615	20.98	0.003
pH*pH	1	731.90	731.900	54.73	0.001
Peróxido de hidrógeno*Peróxido de hidrógeno	1	156.20	156.200	11.68	0.019
Sulfato ferroso*Sulfato ferroso	1	13.74	13.742	1.03	0.357
Interacción de 2 factores	3	1215.67	405.224	30.30	0.001
pH*Peróxido de hidrógeno	1	428.49	428.490	32.04	0.002
pH*Sulfato ferroso	1	607.62	607.623	45.43	0.001
Peróxido de hidrógeno*Sulfato ferroso	1	179.56	179.560	13.43	0.015
Error	5	66.87	13.374		
Falta de ajuste	3	24.62	8.208	0.39	0.777
Error puro	2	42.25	21.123		
Total	14	3379.41			

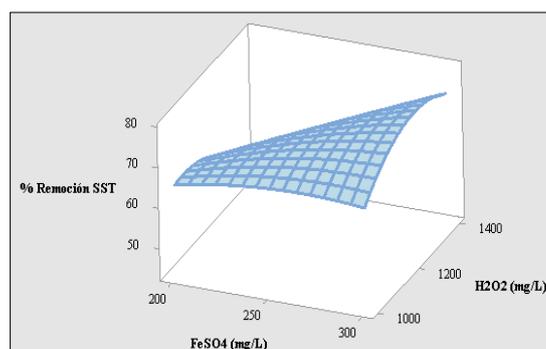
Nota: $R^2 = 98.01\%$; R^2 (ajustado) = 94.46%, R^2 (pred.) = 98.02%.

Tabla 18. Análisis de varianza para la Remoción de SST.

Fuente propia.

El ANOVA en el modelo cuadrático ajustado para el % de Remoción de SST, se observa que es estadísticamente significativo, ya que el valor-p es inferior a 0.05, dando un intervalo de confianza del 95%. El gráfico de Pareto muestra el efecto estadísticamente relevante, además de acuerdo a los resultados de ANOVA (Tabla 18) y el gráfico de Pareto (Ver Anexo 11), es posible observar que los términos lineales y cuadráticos de pH (AA) es el factor que más afecta en la remoción del SST (Ver Anexo 11). Sin embargo, las concentraciones de H_2O_2 y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ no influyen significativamente en el proceso.

Gráficas de superficie de respuesta para SST



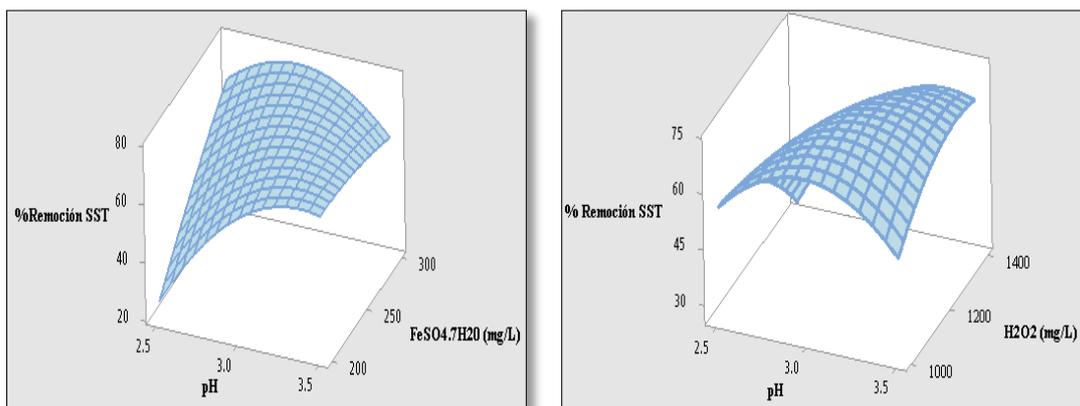


Figura 9. Superficie de respuesta para la eliminación del SST de efluente pesquero por el proceso Fenton: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_2O_2 y pH.

Fuente propia.

Los gráficos de superficie de respuesta (Figura 7) muestra la remoción de SST. Además, según el modelo las condiciones de operación óptimas fueron: pH = 3.0, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ = 300 mg/L y H_2O_2 = 1200 mg/L. Asimismo, los gráficos de superficie de respuesta muestran el aumento de remoción del SST con el mayor rango de pH. Sin embargo, la concentración del H_2O_2 y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ no juegan un papel importante en el SST.

3.5 Efecto del tiempo de reacción

Los resultados obtenidos de los 5 ensayos del efecto del tiempo de reacción en el punto de muestreo Ei-02 fueron los siguientes:

N° Muestra	Tiempo (min)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	% Remoción	
				DQO	SST
1	25	709.8	50	87.35	82.40
2	35	605.8	159	88.9	44
3	45	716.8	115	87.2	59.51
4	55	790.8	139.5	85.9	50.88
5	65	794.8	118.5	85.8	58.28

Tabla 19. Efecto del tiempo de reacción.

Fuente propia.

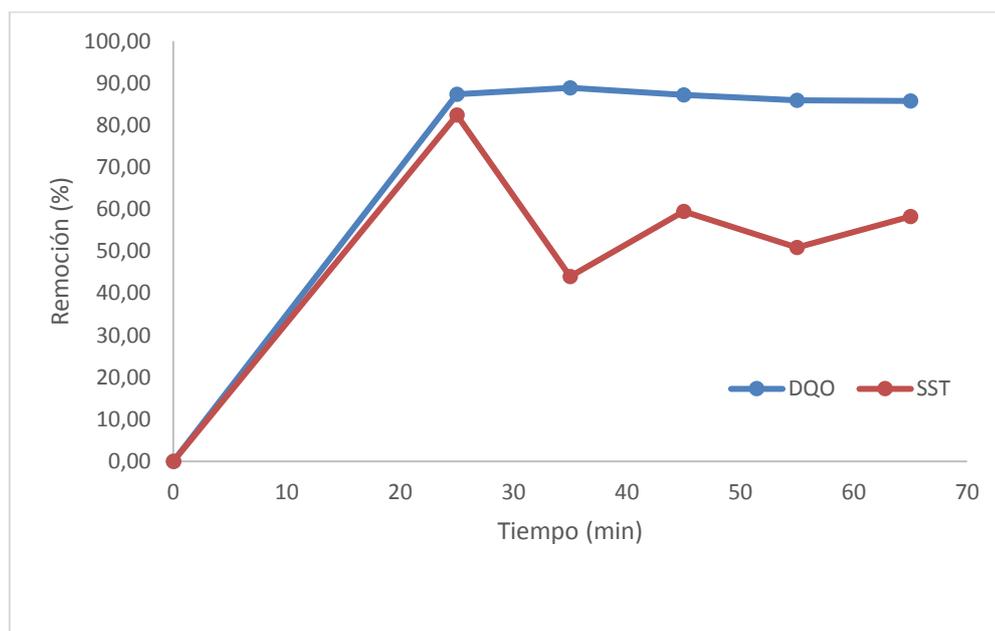


Figura 10. Efecto del tiempo de reacción.

Fuente propia.

En la figura 8, se presentan los resultados de los 5 ensayos en los cuales se determinó el efecto del tiempo en base al % de Remoción DQO y SST del efluente en el punto Ei-02, además se puede observar que la remoción a partir del minuto 25 en los valores del DQO son casi constantes, por lo que no tiene sentido darle más tiempo al proceso. Asimismo, para SST también en el minuto 25 se tiene la máxima remoción, luego de eso la remoción disminuye y tiene valores casi constantes.

3.6 Ensayos del hierro residual

Los resultados obtenidos de los 3 ensayos de hierro residual en el punto de muestreo Ei-02 fueron los siguientes:

N° Muestra	Dosis de FeSO ₄ 7H ₂ O (mg/L)	Hierro en Solución (mg/L)
MR ₁	200	0.972
MR ₂	250	0.581
MR ₃	300	0.894

ECAs agua: Categoría 1, Subcategoría A₃ Hierro= 5mg/L (Ministerio del Ambiente, 2017)

Tabla 20. Resultados de los ensayos del hierro residual.

Fuente propia.

En la Tabla 20, se presentan los resultados de los 3 ensayos del hierro residual. La concentración del hierro añadido que reaccionando como catalizador en la ayuda de formación de OH^\bullet , quedando en la solución filtrada iones libres (residual o no precipitados), y el hierro restante se precipita formando un lodo o también llamado precipitado metálico, siendo la cantidad más significativa el de 200 mg/L, quedando 0.972 mg/L de hierro en la solución que es una concentración relativamente baja, estando por debajo del valor límite de hierro para la descarga con un valor de 5 mg/L, la cantidad más significativa fue de 200 mg/L convirtiendo en Fe^{3+} .

IV. DISCUSIÓN

- Cristovao et al, (2014) a partir de su estudio reportó los resultados obtenidos en el tratamiento de efluentes pesqueros a diferentes condiciones de operación con un pH = 3.2, H₂O₂ = 1558 mg/L al 30%, FeSO₄ 7H₂O = 363 mg/L, tiempo = 1h, reduciendo un 63% con respecto al DQO, a través del Software Statistica v12.0, donde se obtuvo una remoción máxima con R² ajustado de 86.4% de acuerdo al modelo. Asimismo, los resultados obtenidos en este estudio resultaron distintos, ya que no se trabajó con el mismo Software Minitab v19 y se utilizó diferentes condiciones de operación con valores óptimos de pH = 2.5, H₂O₂ = 1000 mg/L, FeSO₄ 7H₂O = 200 mg/L reduciendo un 89.2%, donde se determinó un R² ajustado de 70.64%.
- Menéndez Escarcena, Alfredo (2018) en su investigación indica que son necesarios 44 minutos de tiempo de reacción para alcanzar una remoción de DQO de 78.93% en efluentes conteniendo lactosuero. En este estudio fueron necesarios 25 minutos para alcanzar la máxima remoción de DQO de 87.35%, afirmando lo dicho por Abad, (2013) que el tiempo necesario para completar un proceso Fenton está en un rango de 20 – 65 min, ya que se ha demostrado que con bajos períodos de reacción, se consiguen buenos niveles de remoción de agentes contaminantes.
- De acuerdo a la turbidez, los resultados obtenidos en el trabajo de investigación de Figueroa, y otros (2018) sobre los parámetros analizados en efluentes de la industria cartonera, se obtuvo un pH = 4, Fe²⁺ = 2.5 mg/L y H₂O₂ = 33.3 mg/L en donde se pudo disminuir la turbidez a un 95.75%. Sin embargo, en nuestro estudio la adición del agente catalizador en el proceso Fenton se obtuvieron valores de turbidez después de una breve filtración de 0.00 NTU. Se puede concluir que el proceso Fenton trabaja con concentraciones apropiadas tanto del catalizador como del oxidante, ya que es un proceso de oxidación muy efectivo.

- Los resultados obtenidos indican que a menores concentraciones de catalizador, mayor es la remoción del DQO, esto se debe a que si se le añade altas concentraciones de Fe^{2+} aumenta el efecto de captura de radicales OH^\bullet (Ec. 5). El Fe^{2+} no puede añadirse sin ninguna limitación, porque si se da un exceso de Fe^{2+} no solo incrementa los costes de operación, sino además presenta la generación de lodos de hierro, obteniéndose un efecto negativo sobre la degradación de los contaminantes orgánicos (Zhang, et al., 2019). Asimismo, según De la Cruz, Oscar. et al. (2018) el Fe^{2+} antes de pasar a iones libres funciona como un coagulante, después actúa como catalizador debido a la presencia de los iones libres en la solución acelerando la reacción y consumiendo el H_2O_2 , siendo esto beneficioso para el proceso Fenton.
- Respecto a la remoción de A&G el que más influencia tuvo fue la interacción del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ con H_2O_2 , que en esencia es el proceso Fenton. Sin embargo, el pH no influye porque se trabajó en un rango donde el proceso Fenton es eficiente, 2.5-3.5, (Medina Valderrama, y otros, 2016).
- En la remoción de SST el factor que más afecta, es la relación pH – pH. Las mayores remociones de SST siempre se dan en un rango de pH entre 2 - 4 (Xiangsong, y otros, 2019). Asimismo, los resultados muestran que el pH óptimo es de 3.0 para la remoción de este parámetro. Según Zhang et al., (2019 p.117) a valores bajos de pH, existe un mayor efecto de captura de radicales OH^\bullet por H^+ (Ec. 8) disminuyendo la eficiencia de remoción de SST.

V. CONCLUSIONES

- Los máximos valores de remoción obtenidos fueron de 89.2 % para DQO, 99.1 % para A&G y el 91.9 % para SST.
- Las condiciones óptimas para DQO fueron: pH = 3.0, H₂O₂ = 1000 mg/L y FeSO₄ 7H₂O = 200 mg/L, para A&G: pH = 3.5, FeSO₄ 7H₂O = 300 mg/L y H₂O₂ = 1000 mg/L y para SST: pH = 3.0, FeSO₄ 7H₂O = 300 mg/L y H₂O₂ = 1200 mg/L. Estas condiciones fueron determinadas a 35 minutos. Sin embargo, se determinó un tiempo mínimo de 25 minutos para alcanzar la máxima remoción de DQO y SST.
- Se determinó que la concentración de hierro residual fue de 0.972 mg/L y 0.894 mg/L en la solución, cuando se usa 200 y 300 mg/L, estas concentraciones son relativamente bajas.

VI. RECOMENDACIONES

- Evaluar el efecto del tiempo en los primeros 20 minutos para la remoción de DQO, A&G y SST.
- Hacer las evaluaciones de costo del proceso Fenton como alternativa de tratamiento con los volúmenes generados por una planta de conservas de pescado.
- Evaluar metales pesados que se encuentren en el efluente.

VII. REFERENCIAS

1. **Abad, José. 2013.** *Aplicaciones de proceso Foto-Electrofenton para la oxidación de contaminantes en la industria química.* Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2013, pág. 83, Tesis.
2. **Admin. 2018.** Instrumentos de laboratorio. [En línea] 25 de Noviembre de 2018. [Citado el: 14 de Junio de 2019.] <https://instrumentosdelaboratorio.org/phmetro>.
3. **A. Fahim, Fawzia, y otros. 2001.** Evaluation of some methods for fish canning wastewater treatment. *natureresearch.* 2001, Vol. 127, 1-4, pág. 23.
4. **Agreda, Amelia y Dominguez, Teresa. 2018.** *Influencia de la concentración de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno de efluentes de curtiembre pretratados mediante coagulación-floculación.* Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2018, pág. 68, Tesis.
5. **Ait-Amir, Bouzidait, El Hami, Abdelkhalak and Pougnet, Philippe. 2015.** Meta-Model Development. *Embedded Mechatronic Systems 2.* 2015, Vol. 6, p. 29.
6. **Anam Asghar, Abdul Aziz, y otros. 2015.** *Advanced oxidation processes for in-situ production of hydrogen peroxide/hydroxyl radical for textile wastewater treatment: a review.* s.l: University Malaya, 2015, Vol. 87, N° 15, pág. 5.
7. **APHA-AWWA-WEF. 2012.** *Standard Methods for examination of water and wastewater.* Washington: Inorganic Nonmetals, 2012, 22nd Ed., pág. 5.
8. **APHA-AWWA-WEF. 2012.** *Chemical Oxygen Demand (COD).* Washington: Aggregate Organic Constituents, 2012, 22nd Ed., pág. 6.
9. **APHA-AWWA-WEF. 2012.** *Total Suspended Solids Dried at 103 – 105 °C.* Washington: Physical & Aggregate Properties, 2012, 22nd Ed., pág. 7.
10. **Barliza, Victor y Torres, Daniel. 2018.** *Evaluación de los procesos de oxidación avanzada: fenton, UV/H₂O₂ y Foto-fenton para la degradación de Clorpirifos en aguas residuales a nivel de laboratorio en la universidad de Cartagena.* Bogotá: Fundación Universidad de América, 2018, pág. 127, Tesis.
11. **Bhawana, Jain, et al. 2018.** *Treatment of organic pollutants by homogeneous and heterogeneous Fenton reaction processes.* India: Department of Chemistry, 2018, Vol. 16 (3), pág. 22.

- 12. Burgos Galeano, Carlos, Hérnadez, Bengambre Never y Estrada Palencia, Paula. 2018.** *Validación de la metodología analítica para la determinación de DQO en agua natural y residual por los métodos colorimétrico y titulométrico (reflujo cerrado)*. s.l: 2018, Vol. 3(2), pág. 12.
- 13. Castillo Hilario, Flor. 2015.** *Dosificación de Cloro y Peróxido de hidrógeno en el tratamiento de aguas cianuras en Minera Laytaruma S.A.* Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2015, pág. 200, Tesis.
- 14. Camelino, Sebastián Omar, y otros. 2018.** Optimización de un procedimiento para la determinación de oro mediante espectrofotometría UV/Vis. *Revista Materia*. 19 de Julio de 2018, Vol. 23, 2, pág. 7.
- 15. Collivignarelli, Maria, et al. 2017.** *H₂O₂ Based Oxidation Processes for the Treatment of Real High Strength Aqueous Wastes*. Brescia: University of Brescia, 2017, Vol. 9, pág. 14.
doi:10.3390/su9020244
- 16. Cristovao, Raquel, et al. 2014.** *Chemical oxidation of fish canning wastewater by Fenton's reagent*. s.l: Journal of Environmental Chemical Engineering, 2014, Vol. 2, N° 4, pág. 5.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.12.023>
- 17. De la Cruz, Oscar. et al. 2018.** *Determinación de la dosificación óptima de agentes coagulantes y floculantes en relación con parámetros fisicoquímicos en el tratamiento del agua de Sanguaza de una empresa pesquera en Chimbote*. Chimbote: Universidad Nacional del Santa, 2018, pág. 164, Tesis.
- 18. Delgado, Daniel y Santander, Nancy. 2017.** *Remoción de coloración de tintes de teñido en aguas residuales de la industria textil, utilizando procesos de oxidación avanzada (poa)*. Puno: Universidad Nacional del Antiplano, 2017. pág. 141, Tesis.
- 19. Dheea, Atallah y Puganeshwary, Palaniandy. 2018.** *Advanced oxidation processes (AOPs) to treat the petroleum wastewater*. Malaysia: University Sains Malaysia, 2018, pág. 25.
DOI: 10.4018/978-1-5225-5766-1.ch005
- 20. EC-Meter. 2019.** Ficha tecnica BASIC 30. [En línea] 2019. [Citado el: 28 de Noviembre de 2019.] http://shop.gabsystem.com/data/descargas/BASIC_30.pdf.

- 21. Escalante. 2014.** *Calidad del agua y su relación con alimentos: aplicación de procesos Fenton y tipo Fenton en la eliminación de contaminantes en agua.* México: Universidad de las Américas Puebla, 2014, Vol. 8, N° 1, pág. 14.
- 22. Farfán, Aura. 2017.** *Tratamiento de aguas residuales industriales de una empresa farmacéutica por oxidación avanzada - Lima 2017.* Lima: Universidad César Vallejo, 2017, pág. 108, Tesis.
- 23. Figueroa, Flora y Zambrano, Gema. 2018.** *Ttratamiento por oxidacion avanzada (reaccion de fenton) en aguas residuales de una industria cartonera.* Ecuador : Universidad de Guayaquil, 2018, pág. 77, Tesis.
- 24. García, Julián. 2014.** *Procesos Fenton y Foto - Fenton para el tratamiento de aguas residuales de laboratorio microbiológico empleando Fe₂O₃ soportado en nanotubos de carbono.* Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2014, pág. 65, Tesis.
- 25. García, Sara. 2017.** *Desarrollo de nuevas estrategias basadas en la integración de procesos fotoquímicos solares con otras técnicas avanzadas para el tratamiento de aguas residuales complejas.* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2017, pág. 218, Tesis.
- 26. Gil, Edison, Arbeláez, Paula, y otros. 2018.** *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia.* Medellín: Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 2018, Vol. 1, N° 34(1), pág. 11.
- 27. HACH. 2019.** Reactores digitales. [En línea]. 2019. [Citado el: 9 de Junio de 2019.]
<https://es.hach.com/reactoresdigitales/family?productCategoryId=24761079866>.
- 28. HANNA Intruments. 2018.** Instrumentación analítica. Guía para el análisis de la demanda química de oxígeno (DQO). [En línea]. 2018. [Citado el: 9 de Junio de 2018.] <https://hannainst.com.br/dicas-dos-especialistas/guia-completo-para-testes-de-dqo/>.
- 29. Heponiemi, Anne y Lassi, Ulla. 2012.** *Advanced oxidation processes in food industry wastewater treatment - a review.* Kokkola: University Consortium Chydenius, 2012, Vol. 13, pág. 28.
- 30. Hernández, Roberto. 2014.** *Metodología de la Investigación.* Santa Fe : INTERAMERICANA EDITORES S.A., 2014. Vol. 6ta edición.
ISBN: 978-1-4562-2396-0

- 31. Hidalgo Porras, Jocseline. 2017.** Cuantificación de V, Ni, Zn y Fe en asfalto por espectroscopia de absorción atómica. *LanammeUCR*. 24 de Agosto de 2017, Vol. 7, 1, pág. 10.
- 32. HUALIX. 2017.** Inversiones Hualix. [En línea] 2017. [Citado el: 9 de Junio de 2019.] <https://hualix.com.pe/producto/termoreactor-laboratorio-enologico-hi839800/>.
- 33. HUALIX. 2019.** Turbidímetro de laboratorio LP2000. [En línea] 2019. [Citado el: 28 de Noviembre de 2019.] <https://hualix.com.pe/producto/turbidimetro-de-laboratorio-lp2000/>.
- 34. Ibarra Taquez, Harold, Dobrosz Gómez, Izabela y Gómez, Miguel. 2018.** *Optimización Multiobjetivo del Proceso Fenton en el Tratamiento de Aguas Residuales provenientes de la Producción de Café Soluble*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2018, Vol. 29, 5, pág. 12. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000500111>
- 35. Iglesias, Olalla. 2013.** *Tratamientos avanzados para la descontaminación de sedimentos marinos y efluentes marinos*. Vigo: Universidad de Vigo, 2013, pág. 191, Tesis.
- 36. Jun, Lan, y otros. 2019.** *Combined microbial desalination and chemical-production cell with Fenton process for treatment of electroplating wastewater nanofiltration concentrate*. China:s.n Vol. 359, pág. 11. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.067>
- 37. LABORATORIO QUÍMICO. 2018.** Portal de contenidos educativos de química general y laboratorio químico. [En línea]. 2018. [Citado el: 09 de Junio de 2019] <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico.html>
- 38. LENNTECH. 2019.** Peróxido de hidrógeno. [En línea]. 2019. [Citado el: 24 de Abril de 2019.] <https://www.lenntech.es/peróxido-de-hidrogeno.htm>
- 39. López, Cristina. 2016.** *Procesos físicos-químicos de oxidaciones avanzadas (H₂O₂/UV; Fe²⁺/H₂O₂/UV; TiO₂/H₂O₂/UV) y la mejora con un sistema de coagulación-floculación previo, en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de colorantes*. España: Universidad de Granada, 2016, pág. 203, Tesis.

- 40. López, Itzel. 2012.** *Programa de mantenimiento de equipo de laboratorios de tecnología de alimentos y dietología.* Xalapa: Universidad Veracruzana, 2012, pág. 52, Tesis.
- 41. López, Jesús. 2014.** *Intensificación de sistemas de tratamiento para la eliminación de compuestos prioritarios y emergentes presentes en aguas residuales.* Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, 2014, pág. 272, Tesis.
- 42. Matavos, Sina and Moussavi, Mohsen. 2017.** *Advances in Fenton and Fenton Based Oxidation Processes for Industrial Effluent Contaminants Control-A Review.* Iran: s.n, 2017, pág. 18.
ISSN: 2572 - 1119
- 43. Medina Valderrama, Carlos Javier, Montero del Águila, Edgar Michel y Cruz Pio, Liz Erika. 2016.** *Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.* Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2016, Vol. 82, N° 4, pág. 13.
- 44. Menéndez Escarcena, Alfredo. 2018.** *Reducción de la demanda química de oxígeno en lactosuero mediante el proceso Fenton.* Puno: Universidad Nacional del Antiplano . 2018. pág. 95. Tesis.
- 45. Metzler, Katie. 2015.** *Intruducing research Methodology uwe flick.* Los Ángeles: s.n, 2015, Vol. second, pág.297
eISBN:978-0-335-26447-6
- 46. Mertens, David. 1960.** *Gravimetric Determination of Amylase-Treated Neutral Detergent Fiber in Feeds with Refluxing in Beakers or Crucibles.* Madison: Journal of AOAC International, 1960, Vol. 85, N° 6, pág. 24
- 47. Miller, Christopher, Rose, Andrew and Waite, David. 2016.** *Importance of Iron Complexation for Fenton-Mediated Hydroxyl Radical Production at Circumneutral pH.* Australia: School of Civil and Environmental Engineering, 2016, Vol. 3, pág. 13.
- 48. Ministerio del Ambiente. 2017.** Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM. [En línea] El Perú primero, 07 de Junio de 2017. [Citado el: 28 de Octubre de 2019.] <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>.

- 49. Ministerio de la Producción. 2016.** Protocolo para el monitoreo de los efluentes de los establecimientos industriales pesqueros de consumo humano directo e indirecto. [En línea]. 2016. [Citado el: 3 de Mayo de 2019.] <http://www.snp.org.pe/media/nada/Efluentes/R.M.N°061-2016-PRODUCE-Protocolo.pdf>.
- 50. Ministerio de Vivienda, Construcción y Sanamiento. 2012.** Aprueba los parámetros para las actividades que según la Clasificación Industrial Internacional Uniforme - CIIU serán de cumplimiento obligatorio por parte de los Usuarios No Domésticos. [En línea]. 2012. [Citado el: 29 de Abril de 2019.] <http://ww3.vivienda.gob.pe/direcciones/Documentos/RM-116-2012-VIVIENDA.pdf>
- 51. Ministerio de Vivienda, Construcción y Sanamiento. 2019.** Valores Máximos Admisibles para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. [En línea]. 2019. [Citado el: 3 de Mayo de 2019.] https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/309485/DS_014-2019-VIVIENDA.pdf
- 52. Neyens, E. y Baeyens J. 2003.** *A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique.* s.l: Journal of Hazardous Materials, 2003, pág. 18.
- 53. Neyra, Percy y Alemán, Jorge. 2018.** *Aplicación de tecnología de oxidación avanzada en la descontaminación de aguas residuales procedentes del empaque de banano en Tumbes.* Tumbes: Manglar, 2018. pág. 58, Tesis.
- 54. Nwaigwe, Ugochukwu. 2017.** *Fish preservation and processing.* Singapur: University of Agriculture, 2019, Vol. N° 1, pág. 31
- 55. Ocampo, Reyna y Meléndez, Ingrid. 2018.** *Efecto del volumen de Peróxido de Hidrógeno y tiempo de reacción en el tratamiento de agua residuales.* Chachapoyas: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, 2018, pág. 58, Tesis.
- 56. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. 2014.** Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. [En línea]. 2014. [Citado el: 03 de Mayo de

- 2019.] <https://sinia.minam.gob.pe/fuente-informacion/organismo-evaluacion-fiscalizacion-ambiental-oeфа>
- 57. Organización Mundial de la Salud. 2016.** Organización Mundial de la Salud. [En línea]. 2016. [Citado el: 15 de Abril de 2019.] https://www.who.int/water_sanitation_health/sanitation-waste/es/.
- 58. Otiniano, Rita. 2016.** *Efecto del proceso de coagulación-floculación para la remoción de sólidos suspendidos del efluente del camal municipal El Porvenir-Trujillo*. Trujillo: Universidad César Vallejo, 2016, pág. 50, Tesis.
- 59. OZPerú. 2019.** Conductímetro. [En línea] 2019. [Citado el: 28 de Noviembre de 2019.] <https://www.oz-peru.com/conductimetro/>.
- 60. Parvathy, y otros. 2017.** Biological Treatment Systems for Fish Processing Wastewater - A Review. *Nature Environm and PollutionTechnology*. 2017, Vol. 16, 2, pág. 8.
- 61. Pelayo, Deva. 2018.** *Procesos de oxidación avanzada: avances recientes y tendencias futuras*. Cantabria: Universidad de Cantabria, 2018, pág. 74, Tesis.
- 62. Punzi, Marisa. 2015.** *Treatment of textile wastewater by combining biological processes and advanced oxidation*. Suecia: Lund University, 2015, Vol. N° 1, pág. 79.
- 63. Republica, 2017.** El círculo pesquero en el Perú. [En línea] La Republica, 6 de Agosto de 2017. [Citado el: 27 de Septiembre de 2019.] <https://larepublica.pe/economia/1070777-circulo-pesquero-en-el-peru/>
- 64. Rivera Ñacari, Ana. 2017.** *Uso de moringa oleífera y carbón activado para el mejoramiento de la calidad del agua residual de lavado vehicular en el distrito de San Martín de Porres-Lima, 2017*. Lima : s.n., 2017.
- 65. Rodríguez, Tatiana, Botelho, Diego y Cleto, Eduardo. 2008.** *Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta*. Bogotá: s.n, 2008, Vol. N° 46, pág. 15.
- 66. Rubio, Ainhoa, Chica, Edwin y Peñuela, Gustavo. 2014.** *Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico*. Medellín: s.n, 2014, Vol. 16, N° 2, pág. 13.

- 67. Rueda, Juan, et al. 2015.** *Post-treatment of biologically treated wastewater containing organic contaminants using a sequence of H₂O₂ based advanced oxidation processes: Photolysis and catalytic wet oxidation.* Spain: s.n, 2015, Vol. N° 71, pág. 12.
- 68. Sanca, Miler. 2011.** *Tipos de investigación científica.* La Paz: Universidad Mayor de San Andrés, 2011, Vol. N° 12, pág. 4.
ISSN: 2304-3768
- 69. Sánchez, Renato y García, Katty. 2018.** *Tratamiento de aguas residuales de cargas industriales con oxidación avanzada en sistemas convencionales.* Quito: Universidad Politécnica Salesiana, 2018, Vol. 27, N° 1, pág. 9.
ISSN:1390-8596
- 70. Sindhi, Yogita and Mehta, Mehali. 2014.** *COD Removal of Different Industrial Wastewater by Fenton Oxidation Process.* Gujarat: Civil Engineering Department, 2014, Vol. N° 6, pág. 6.
ISSN: 2277-9655
- 71. SLU, Tribuladores. 2016.** Turbidez. [En línea] 29 de Agosto de 2016. [Citado el: 28 de Noviembre de 2019.] <https://medidordeph.com/blog/2016/08/turbidez/>.
- 72. SOLVITINTAS. 2018.** Materiales e instrumentos de un laboratorio químico. [En línea]. 2018. [Citado el: 09 de Junio de 2019] <http://www.solvitintas.com/pdf/instrumentos.pdf>
- 73. STRUCPLAN. 2016.** Efluentes líquidos contaminantes del agua. [En línea]. 2016. [Citado el: 30 de Abril de 2019.] www.estrucplan.com.ar/contenidos-efluentes-liquidos-test.asp
- 74. Suárez, Néstor, Saéñz, Jessica y Mero, Jessica. 2016.** *Elementos esenciales del diseño de la investigación. Sus características.* Manta: Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, 2016, Vol. 2, Núm. Esp., pág. 14.
ISSN: 2477-8818
- 75. Tech, Boss. 2018.** Tratamiento de Aguas Residuales para Industrias Pesqueras. [En línea] 12 de Octubre de 2018. [Citado el: 27 de Septiembre de 2019.]

<https://bosstech.pe/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-para-industrias-pesqueras/>.

76. Terán, Mery. 2016. *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas.* Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2016, pág. 100, Tesis.

77. Terry Calderón, Victor Manuel, Candela Díaz, José y Adrianzen Matienzo, Elva. 2018. *Análisis de un sistema de recuperación de sólidos y grasas en el agua de bombeo de una planta de harina y aceite de pescado.* Lima: Universidad Nacional Villarreal, Vol. 6, 1, pág. 15.

ISSN: 2310-4767

78. Vrushali, Pawar and Sagar, Gawande. 2015. *An overview of the Fenton Process for Industrial Wastewater.* India: Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2015, Vol. N° 33, pág. 10.

e-ISSN: 2278-1684

p-ISSN: 2320–334X

79. Xiangsong, Meng, y otros. 2019. *Efficient COD reduction from sulfide minerals processing wastewater using Fenton process.* China: s.n Vol. 132, pág. 3.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.054>

80. Zhang, Menghui, Dong, Hui, y otros. 2019. *A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective.* China: Science of the Total Environment, 2019, Vol. N° 1, pág. 12.

VIII. ANEXOS

A continuación, en el Anexo 1 se muestra la autorización de la empresa “Conservas Ricofres S.R.L.”:



Lima, 10 de Mayo del 2019

Señores
Estudiantes de Ingeniería Ambiental
Universidad Cesar Vallejo – Sede Este

Asunto : Autorización para el Uso del nombre de la Empresa en el Proyecto de Investigación e Ingreso al establecimiento para toma de muestras de las aguas residuales en la planta de tratamiento de agua residuales industriales - PTARI

Yo, María del Carmen, Fernández Suarez, identificado con D.N.I. N° 16008444, representante legal de CONSERVAS RICOFRÉS S.R.L, con RUC N° 20506438919, con Establecimiento Industrial Pesquero, que cuenta con licencia de operación otorgada mediante Resolución Directoral N° 159-2006-PRODUCE/DGEPP para la elaboración de Conservas de pescado; que se ubica en Av. Roosevelt s/n Puerto Chancay – Distrito de Chancay – Provincia de Huaral – Departamento de Lima.

En atención a su solicitud se les hace llegar la correspondiente autorización para el uso del nombre del establecimiento “**CONSERVAS RICOFRÉS S.R.L**”; así como el ingreso a planta a fin de realizar la toma de muestras del agua residual para su posterior evaluación e importante en la formulación del Proyecto de Investigación, que desarrollaran las alumnas de la Universidad Cesar Vallejo – Sede Este; cuyos nombres son:

ESTUDIANTES	DNI
Díaz Justiniano Valeria Elizabeth	73178077
Ñaupari Berlanga Kiara Estefanny	74733532

Sin otro particular quedamos a la espera de Uds.

Atentamente.

CONSERVAS RICOFRÉS S.R.L.

María del Carmen Fernández Suárez
Gerente General

Av. Rosevelt s/n Pto. Chancay
Casa: 377-1092
Planta: 377-1157
Nextel:(99) 834*4952

*Anexo 1. Autorización de la empresa.
Fuente. Empresa “Conserva Ricofres S.R.L.”*

A continuación, en el Anexo 2 se muestra la ficha de cadena de custodia para el registro de muestreo:

CADENA DE CUSTODIA (REGISTRO DE CAMPO - Muestreo de efluente)									
Solicitante:									
Lugar de monitoreo:									
Fecha de monitoreo:						Parámetros			
Descripción de la muestra						DQO (mg/l)	SST (mg/L)	A y G (mg/L)	pH
Identificación de la muestra	Muestreo		Tipo de muestra	Coordenadas geográficas					
	Fecha	Hora		Latitud	Longitud				

Anexo 2. Cadena de custodia para el registro de muestreo.

Adaptada de: Protocolo de monitoreo de efluentes. Resolución Ministerial No. 061-2016-Produce.

A continuación, en el Anexo 3 se muestra la ficha del reporte de resultados de la caracterización fisicoquímica del efluente:

REPORTE DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FISICOQUIMICAS DEL EFLUENTE	
Fecha de monitoreo:	
Parámetro	Resultado del análisis
	Efluente
Demanda química de oxígeno (mg/L)	
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	
Aceites y grasas (mg/L)	
pH	

Anexo 3. Reporte de resultados de la caracterización fisicoquímica del efluente.

Fuente propia.

A continuación, en el Anexo 4 se muestra la ficha de variables:

- I. NOMBRE DE LA EMPRESA:
- II. RESPONSABLE DEL MUESTREO:
- III. NÚMERO DE MUESTRA:
- IV. CANTIDAD DE MUESTRA:

VARIABLE INDEPENDIENTE	OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FENTON (H ₂ O ₂ /Fe ²⁺)							
Nº DE LA MUESTRA	CONDICIONES DE OPERACIÓN							
	Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)				Sulfato de hierro (Fe ²⁺)			
	DOSIS	VOLUMEN	pH	TIEMPO	DOSIS	VOLUMEN	pH	TIEMPO
1								
2								
3								
⋮								
90								

VARIABLE DEPENDIENTE	REDUCCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA DEL EFLUENTE		
Nº DE LA MUESTRA	CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA CARGA ORGÁNICA		
	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	A&G (mg/L)
1			
2			
3			
⋮			
90			

Anexo 4. Ficha de variables.

Fuente propia.

A continuación, en el Anexo 5 se muestra los cálculos de los siguientes reactivos y ensayos realizados en el laboratorio de Biotecnología de la universidad Cesar Vallejo:

Sulfato Ferroso Heptahidratado

Densidad $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 1.898 \text{ g/cm}^3$

Densidad $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 1.898 \text{ g/ml}$

	Dosis	0.5 L	
FeSO₄ 7H₂O	200 mg/L	100 mg	0.100 g
	250 mg/L	125 mg	0.125 g
	300 mg/L	150 mg	0.150 g

1 mg ——— 0.001 g		
1 mg = 0.001 g	1 mg = 0.001 g	1 mg = 0.001 g
100 mg = X g	125 mg = X g	150 mg = X g
X = 0.100 g	X = 0.125 ml	X = 0.150 ml

Peróxido de Hidrógeno

Densidad H_2O_2 al 30% = 1.11 g/cm^3

Densidad H_2O_2 al 30% = 1.11 g/ml

	Dosis	0.5 L	
H₂O₂	1 000 mg/L	500 mg	0.45 ml
	1 200 mg/L	600 mg	0.54 ml
	1 400 mg/L	700 mg	0.63 ml

1 ml ——— 1.11 g		
1 ml = 1110 mg	1 ml = 1110 mg	1 ml = 1110 mg
X ml = 500 mg	X ml = 600 mg	X ml = 700 mg
X = 0.45 ml	X = 0.54 ml	X = 0.63 ml

Ácido Clorhídrico

	Dosis	0.5 L	pH
HCl	4%	Gotas	≥ 3.5

$$4 \% = \frac{4 \text{ ml (Ácido Clorhídrico)}}{100 \text{ ml (Agua Destilada)}}$$

Hidróxido de Sodio

	Dosis	0.5 L	pH
NaOH	3M	Gotas	7

$$3 \text{ M} \text{ ——— } 120 \text{ g/L}$$

$$120 \text{ g} = 1000 \text{ ml}$$

$$X \text{ g} = 100 \text{ ml}$$

$$X = 12 \text{ g}$$

Óxido de Manganeso

	Dosis	1 L	0.5 L
MnO ₂	5M	0.5 g/L	0.25 g

$$5 \text{ M} \text{ ——— } 0.5 \text{ g/L}$$

$$0.5 \text{ g} = 1000 \text{ ml}$$

$$X \text{ g} = 500 \text{ ml}$$

$$X = 0.25 \text{ g}$$

*Anexo 5. Cálculos de los reactivos y resultados de ensayos.
Fuente propia.*

Resultados de los ensayos preliminares

Los resultados obtenidos de las muestras recolectadas en el punto de muestreo Ei-03 fueron los siguientes:

N° de Experimento	A ₁	A ₂	A ₃	pH	Turbidez Inicial (NTU)	Conductividad Inicial (µS/cm)	Turbidez Final (NTU)	Conductividad Final (µS/cm)
1	-	-	-	2.5	9.42	4420	0.00	1460
2	0	-	-	2.5	10.79	3080	0.00	1280
3	+	-	-	2.5	4.46	2290	0.00	1476
4	-	0	-	2.5	9.72	2220	0.00	1230
5	0	0	-	2.5	10.76	2220	0.00	1310
6	+	0	-	2.5	3.12	2340	0.00	1356
7	-	+	-	2.5	9.71	2210	0.00	1015
8	0	+	-	2.5	4.64	2180	0.00	1500
9	+	+	-	2.5	2.19	2340	0.00	1037
10	-	-	0	2.5	9.59	4030	0.00	1330
11	0	-	0	3.0	12.34	3120	0.00	1490
12	+	-	0	3.0	3.23	2230	0.00	1385
13	-	0	0	2.5	9.72	2220	0.00	1230
14	0	0	0	3.0	4.69	2230	0.00	1130
15	+	0	0	3.0	2.33	2340	0.00	1080
16	-	+	0	2.5	11.94	2210	0.00	1015
17	0	+	0	3.0	4.50	2250	0.00	1300
18	+	+	0	3.0	4.39	2330	0.00	1456
19	-	-	+	2.5	14.91	2990	0.00	1480
20	0	-	+	3.0	9.45	2230	0.00	1495
21	+	-	+	3.5	5.22	3100	0.00	1506
22	-	0	+	2.5	12.28	2910	0.00	1410
23	0	0	+	3.0	4.84	2340	0.00	1435
24	+	0	+	3.5	4.52	2330	0.00	1330
25	-	+	+	2.5	10.31	2980	0.00	1280
26	0	+	+	3.0	3.38	2260	0.00	1270
27	+	+	+	3.5	15.99	2310	0.00	1500
28	0	0	0	3.0	15.03	2430	0.00	1180
29	0	0	0	3.0	15.42	2310	0.00	1010

En la Tabla 14 se presentan los resultados de los parámetros de turbidez y conductividad inicial-final del proceso Fenton, donde se visualiza que la turbidez en relación con los sólidos al iniciarse es mayor a 5 NTU y la conductividad superando 1500 µm/cm, estas muestras después de la aplicación del tratamiento de acuerdo a los resultados obtenidos se encuentran por debajo de la norma con menos sólidos y sales.

Ensayos experimentales

Los resultados obtenidos de los ensayos del proceso Fenton en el punto de muestreo Ei-02 fueron los siguientes:

N° de Experimento	A ₁	A ₂	A ₃	pH	Turbidez Inicial (NTU)	Conductividad Inicial (μS/cm)	Turbidez Final (NTU)	Conductividad Final (μS/cm)
1	-	-	-	2.5	146	2960	0.00	1360
2	0	-	-	2.5	140	4510	0.00	2020
3	+	-	-	2.5	133	1878	0.00	1500
4	-	0	-	2.5	163	2890	0.00	1488
5	0	0	-	2.5	160	2170	0.00	1120
6	+	0	-	2.5	189	1961	0.00	1346
7	-	+	-	2.5	150	2900	0.00	1108
8	0	+	-	2.5	142	2560	0.00	1140
9	+	+	-	2.5	149.67	1835	0.00	769
10	-	-	0	2.5	142	2930	0.00	1123
11	0	-	0	3.0	130	2040	0.00	1143
12	+	-	0	3.0	180	1696	0.00	1476
13	-	0	0	2.5	163	2890	0.00	1488
14	0	0	0	3.0	141	2900	0.00	1135
15	+	0	0	3.0	144.51	245	0.00	1456
16	-	+	0	2.5	147	3220	0.00	1390
17	0	+	0	3.0	150	2550	0.00	1245
18	+	+	0	3.0	206	1960	0.00	1506
19	-	-	+	2.5	142	3060	0.00	1500
20	0	-	+	3.0	119	2180	0.00	1372
21	+	-	+	3.5	202	1948	0.00	1498
22	-	0	+	2.5	139	3880	0.00	1502
23	0	0	+	3.0	165	3060	0.00	1056
24	+	0	+	3.5	148.80	2440	0.00	1366
25	-	+	+	2.5	166	2930	0.00	1230
26	0	+	+	3.0	152	2560	0.00	1346
27	+	+	+	3.5	59	748	0.00	511
28	0	0	0	3.0	61	770	0.00	413
29	0	0	0	3.0	57	789	0.00	478

En la Tabla 17 se presentan los resultados de los parámetros de turbidez y conductividad inicial-final del proceso Fenton, donde se puede visualizar que la turbidez en relación con los sólidos al iniciarse es mayor a 5 NTU y la conductividad superando 1500 μm/cm, de acuerdo a la norma estas muestras después de la aplicación del tratamiento de acuerdo a los resultados obtenidos se encuentran por debajo de la norma con menos sólidos y sales.

A continuación, en el Anexo 6 se muestra la recolección de la muestra:



Anexo 6. Caracterización del efluente.

Fuente propia.

A continuación, en el Anexo 7 se muestra la parte de la caracterización del efluente:

Caracterización de la Demanda Química de Oxígeno



Caracterización de Aceites y Grasas



Caracterización de Sólidos Suspensos Totales

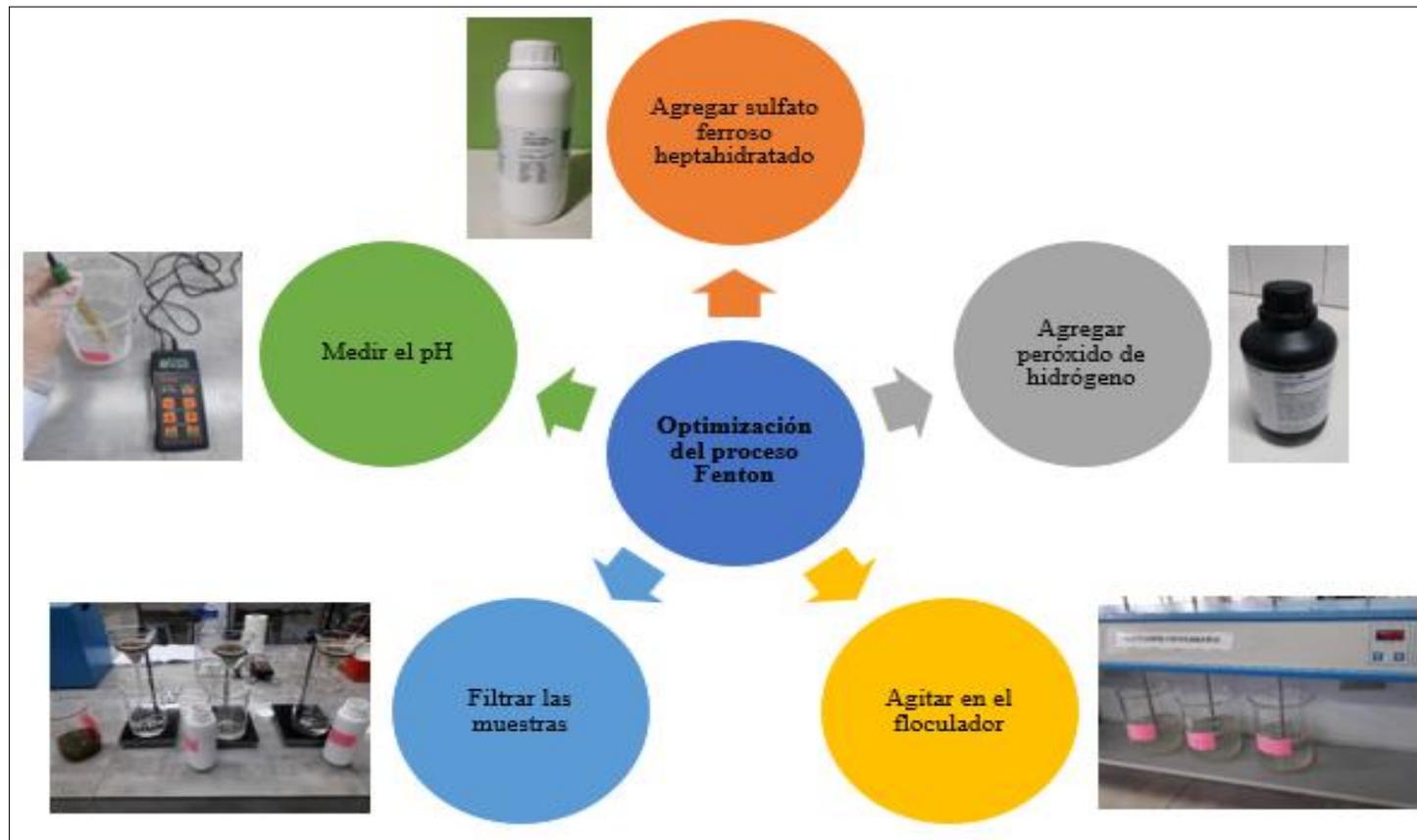


Anexo 7. Caracterización del efluente.

Fuente propia.

A continuación, en el Anexo 8 se muestra la parte experimental del proceso Fenton:

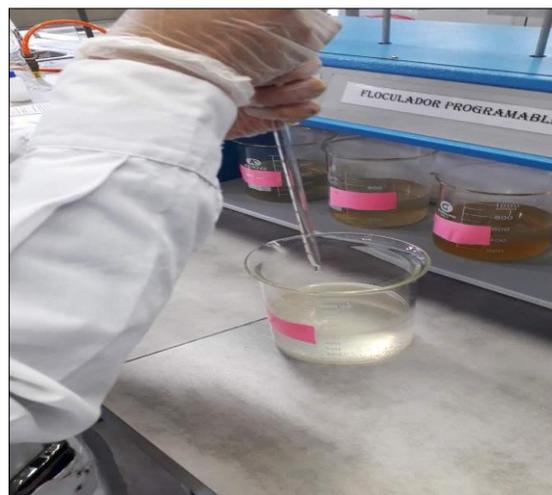
Corrida experimental



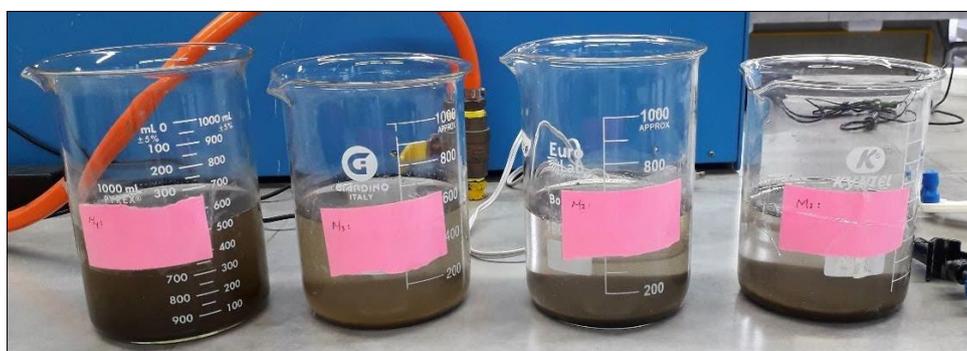
Sulfato ferroso heptahidratado en las muestras de agua.



Peróxido de hidrógeno en las muestras de agua.



Sedimentación de las muestras de agua.



Anexo 8. Corrida experimental del proceso Fenton.

Fuente propia.

A continuación, en el Anexo 9 se muestra las imágenes de la determinación de los parámetros de DQO, A&G y SST:

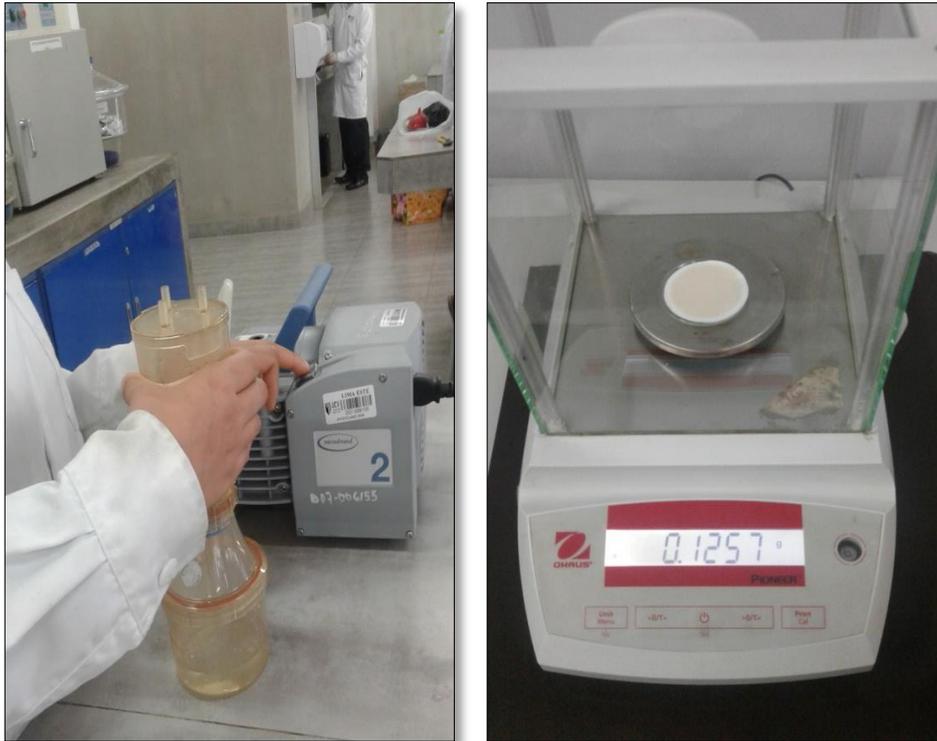
Demanda Química de Oxígeno (DQO)



Aceites y Grasas (A&G)



Sólidos Suspendidos Totales (SST)



*Anexo 9. Determinación de los parámetros después del proceso Fenton.
Fuente propia.*

En el Anexo 10 se muestra la imagen de la determinación del Ion ferroso residual en el espectrofotómetro de absorción atómica:



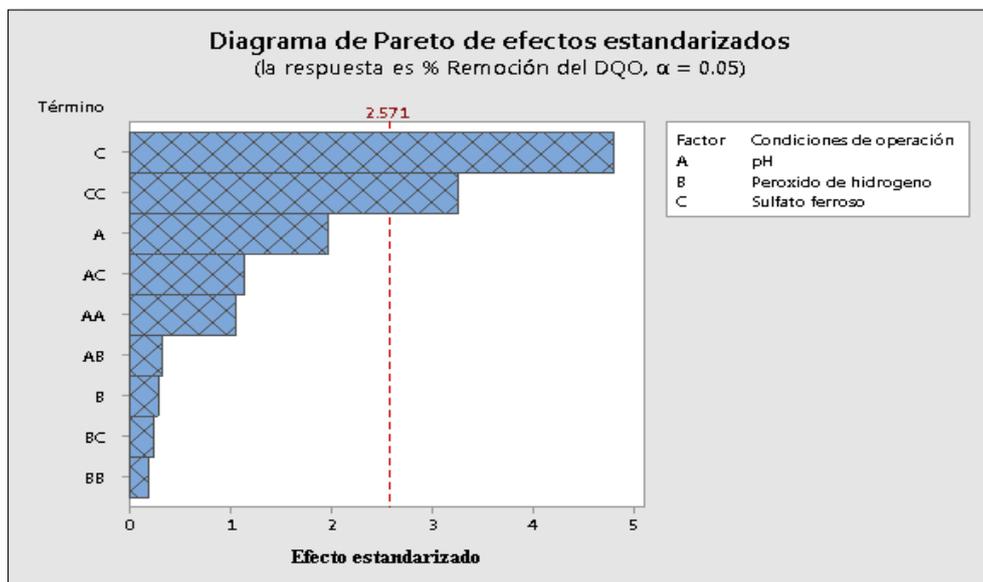
*Anexo 10. Determinación del hierro residual.
Fuente propia.*

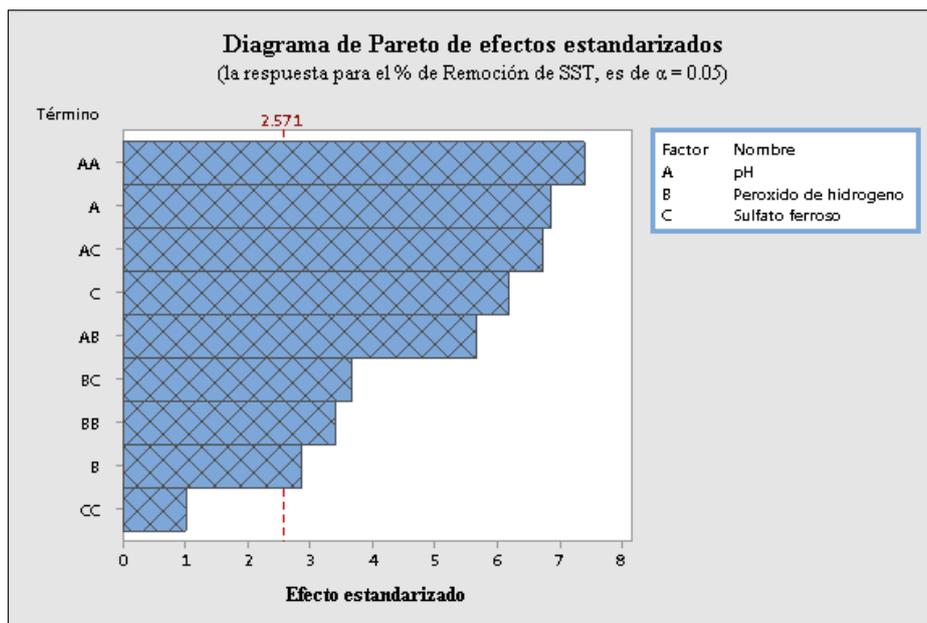
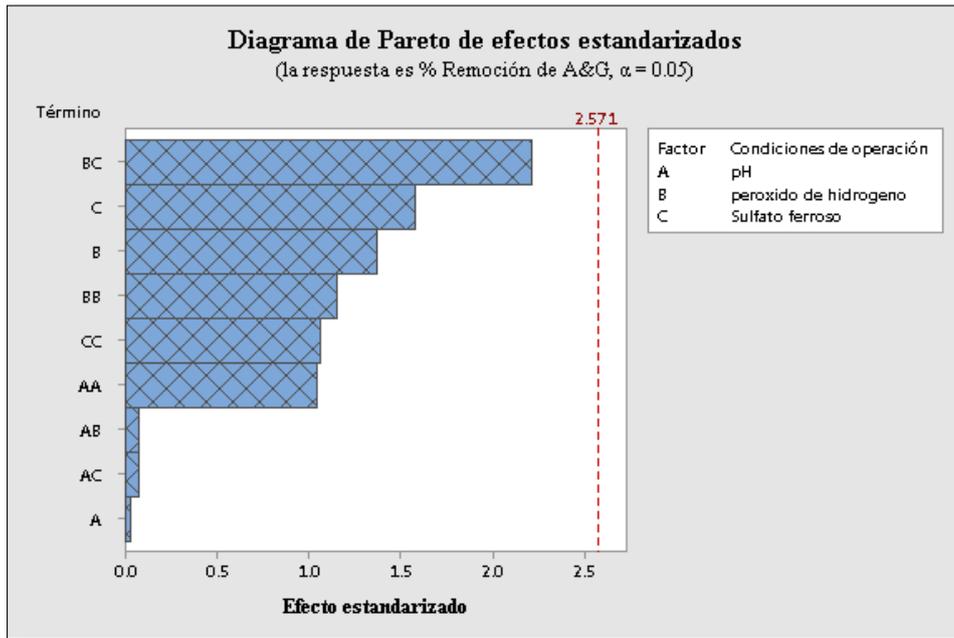
Análisis de Varianza del DQO sin ajuste

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	15.3085	1.70094	4.55	0.055
Lineal	3	10.0875	3.36250	9.00	0.019
pH	1	1.4450	1.44500	3.87	0.106
Peróxido de hidrogeno	1	0.0312	0.03125	0.08	0.784
Sulfato ferroso	1	8.6112	8.61125	23.06	0.005
Cuadrado	3	4.6685	1.55617	4.17	0.079
pH*pH	1	0.4206	0.42058	1.13	0.337
Peróxido de hidrogeno*Peróxido de hidrogeno	1	0.0144	0.01442	0.04	0.852
Sulfato ferroso*Sulfato ferroso	1	3.9744	3.97442	10.64	0.022
Interacción de 2 factores	3	0.5525	0.18417	0.49	0.703
pH*Peróxido de hidrogeno	1	0.0400	0.04000	0.11	0.757
pH*Sulfato ferroso	1	0.4900	0.49000	1.31	0.304
Peróxido de hidrogeno*Sulfato ferroso	1	0.0225	0.02250	0.06	0.816
Error	5	1.8675	0.37350		
Falta de ajuste	3	1.7275	0.57583	8.23	0.110
Error puro	2	0.1400	0.07000		
Total	14	17.1760			

Anexo 11. Modelo estadístico sin ajuste para % de remoción de los DQO, en el diseño factorial de Box-Behnken.

Fuente propia.





Anexo 12. Gráfico de Pareto estandarizado para % de remoción de los DQO, A&G y SST en el diseño factorial de Box-Behnken.
Fuente propia.