

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

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA**



**TESIS**

**APLICACIÓN DEL PROCESO FOTO – FENTON EN AGUAS  
CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS EN EL MAR DE VENTANILLA**

**PRESENTADO POR:**

**Bach.** Percy Franco Lastrera

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

**Asesora:**

Dra. Amanda Rosa Maldonado Farfan

**CUSCO- PERÚ**

**2024**

## INFORME DE ORIGINALIDAD

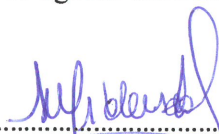
La que suscribe, asesora del trabajo de investigación titulado “**APLICACIÓN DEL PROCESO FOTO – FENTON EN AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS EN EL MAR DE VENTANILLA**”, presentado por el Br. Percy FRANCO LASTRERA, con DNI N°72874028 para optar al Título Profesional de Ingeniero Petroquímico, informo, que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 vez, mediante el software antiplagio, conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8 %.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación tesis (Art. 7, inc 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con una X
Del 1 al 10 %	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las	

Por tanto, en mi condición de asesora, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software antiplagio.

Cusco, 29 de agosto del 2024



.....  
Dra. Ing. Amanda Rosa MALDONADO FARFAN

DNI: 23822559

ORCID: 0000-0002-4870-7078

#### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:

<https://unsaac.tumitin.com/viewer/submissions/oid:27259:376675151?locale=es-MX>

NOMBRE DEL TRABAJO

**TESIS\_-\_PERCY\_FRANCO\_LASTRERA\_\_FI  
NALF-- - copia.pdf**

AUTOR

**PERCY FRANCO LASTRERA**

RECUENTO DE PALABRAS

**10867 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**53773 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**83 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**2.7MB**

FECHA DE ENTREGA

**Aug 29, 2024 2:57 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Aug 29, 2024 2:59 PM GMT-5****● 8% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)

## **PRESENTACIÓN**

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

De conformidad con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de Procesos vigente, presento a vuestra consideración la tesis titulada “APLICACIÓN DEL PROCESO FOTO – FENTON EN AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS EN EL MAR DE VENTANILLA” para optar al Título Profesional de Ingeniero Petroquímico.

El trabajo de investigación está orientado a evaluar el proceso FOTO – FENTON en la recuperación de aguas contaminadas por hidrocarburos, el que constituye una alternativa viable.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres; quienes son el motor de mi vida que día a día hacen lo imposible por el bienestar de nuestro hogar; a mis hermanos que me alientan, motivan e inspiran a seguir adelante y alcanzar mis metas.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a las personas que fueron parte de este trabajo a la Dra. Amanda Maldonado, quien es una grandiosa persona y como profesional apasionada a la investigación que hizo los esfuerzos para ejecutar el proyecto, es alguien de quien se aprende día a día e indudablemente es digna de admiración; al ingeniero Andy Jorge Salazar Sanchez, quien mostró entrega completa en el desarrollo del proyecto.

Finalmente, el agradecimiento infinito a mi familia, sin vuestro apoyo, consejos y motivación no hubiera sido posible llegar hasta aquí, los amo mucho y estaré siempre agradecido con todos ustedes.

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue determinar la eficiencia del proceso Foto - Fenton para tratar aguas contaminadas por hidrocarburos en el mar de Ventanilla. El proceso se llevó a cabo mediante experimentos en un reactor batch de un litro, con radiación ultravioleta (4 w, 254nm), utilizando muestras de agua de mar de Ventanilla y variando las concentraciones de  $H_2O_2$ ,  $Fe^{2+}$  y el tiempo de radiación, manteniendo un pH de 3 y temperatura ambiente.

La caracterización fisicoquímica del agua de Ventanilla reveló contenidos de DQO de 1174 mg/L, turbidez 0.39, pH 8.16, sólidos disueltos totales 32.3 mg/L y conductividad 51.4 mS/cm; posteriormente se desarrollaron 10 experimentos correspondientes a un diseño experimental  $2^3$ , y dos puntos medios y una réplica considerando como variables independientes concentración de  $H_2O_2$ , concentración  $Fe^{2+}$  y el tiempo de radiación sobre el porcentaje de degradación de hidrocarburos de agua contaminada sintética. Con los resultados se establecieron como parámetros  $Fe^{2+} = 200$  mg/L,  $H_2O_2 = 4$  mg/L y un tiempo de radiación de 3 horas a los cuales se lograron un 98% de degradación de hidrocarburos (%DQO eliminado).

El modelo cinético mostró un crecimiento exponencial de la degradación con respecto al tiempo, con una reacción pseudo de primer orden.

Al aplicar el proceso de Foto - Fenton al agua de Ventanilla, se logró una reducción del 99.83% en la concentración de hidrocarburos totales de petróleo, disminuyendo de 5.65 mg/L a  $<0.0100$  mg/L en comparación con el tratamiento estándar (HTP). Además, la concentración de DQO se redujo en un 70%. Otros parámetros también experimentaron reducciones, como la turbidez que se redujo en un 64%, los sólidos disueltos totales en un 34% y la conductividad se redujo en un 21% para el agua tratada de Ventanilla.

**Palabras Clave:** Foto – Fenton, Ultravioleta, DQO, Degradación de hidrocarburos, contaminación por hidrocarburos, HTP

## ABSTRACT

The main objective of this work was to determine the efficiency of the Photo-Fenton process in treating hydrocarbon-contaminated waters in the Ventanilla Sea. The process was carried out through experiments in a one-liter batch reactor, with ultraviolet radiation (4w, 254nm), using samples of Ventanilla seawater and varying the concentrations of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Fe<sup>2+</sup>, and radiation time, while maintaining a pH of 3 and ambient temperature.

The physicochemical characterization of Ventanilla water revealed DQO contents of 1174 mg/L, turbidity of 0.39, pH of 8.16, total dissolved solids of 32.3 mg/L, and conductivity of 51.4 mS/cm. Subsequently, 10 experiments were conducted corresponding to a 2<sup>3</sup> experimental design, with two central points and one replicate, considering H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration, Fe<sup>2+</sup> concentration, and radiation time as independent variables affecting the percentage degradation of hydrocarbons in synthetic contaminated water. Parameters of Fe<sup>2+</sup> = 200 mg/L, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 4 mg/L, and a radiation time of 3 hours were established based on the results, achieving a 98% degradation of hydrocarbons (%DQO removed).

The kinetic model showed exponential growth in degradation over time, with a second-order reaction.

By applying the Photo-Fenton process to Ventanilla water, a 99.83% reduction in total petroleum hydrocarbon concentration was achieved, decreasing from 5.65 mg/L to <0.0100 mg/L compared to the standard treatment (HTP). Additionally, DQO concentration was reduced by 70%. Other parameters also experienced reductions, with turbidity decreasing by 64%, total dissolved solids by 34%, and conductivity by 21% for the treated Ventanilla water.

**Keywords:** Photo – Fenton, Ultraviolet, COD, Hydrocarbon degradation, hydrocarbon pollution, TPH



## ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABLAS.....	X
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	13
1.1    Formulación de Problema.....	13
1.1.1    Descripción de Problema.....	13
1.1.2    Problema general.....	13
1.1.3    Problemas específicos.....	13
1.2    Objetivos.....	14
1.2.1    General.....	14
1.2.2    Específicos.....	14
1.3    Justificación.....	14
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	15
2.1    Antecedentes.....	15
2.2    Fundamentos teóricos.....	17
2.2.1    Composición de los hidrocarburos.....	17
2.2.2    Hidrocarburos totales del petróleo (TPH).....	17
2.2.3    Aguas contaminadas por hidrocarburos.....	17
2.2.4    El verdadero impacto de un derrame de petróleo.....	18
2.2.5    Características del mar peruano.....	18
2.2.6    Derrame de petróleo en Ventanilla.....	19
2.2.7    Descripción de los principales parámetros de la calidad del agua.....	20
2.2.8    Proceso Foto - Fenton.....	21
2.2.9    Influencia de la concentración del agente oxidante y del catalizador.....	22
2.2.10    Influencia del pH.....	23
2.2.11    Influencia del tiempo de reacción.....	23

2.2.12	Influencia del tipo de contaminante.....	23
2.2.13	Cinética y orden de reacción.....	24
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....		26
3.1	Muestra .....	26
3.2	Materiales.....	26
3.3	Métodos.....	27
3.3.1	Muestreo y transporte.....	28
3.3.2	Caracterización inicial de la muestra .....	28
3.3.3	Preparación de la muestra sintética.....	30
3.3.4	Proceso Foto – Fenton con muestra sintética .....	31
3.3.5	Parámetros de proceso .....	34
3.3.6	Estudio cinético.....	34
3.3.7	Proceso Foto – Fenton con muestra real.....	35
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		36
4.1	Caracterización fisicoquímica de la calidad del agua de Ventanilla ....	36
4.2	Proceso Foto – Fenton con agua sintética.....	37
4.3	Parámetros del proceso.....	43
4.4	Modelo cinético del proceso .....	44
4.5	Proceso Foto – Fenton con agua de Ventanilla. ....	47
CONCLUSIONES.....		50
RECOMENDACIONES.....		51
REFERENCIAS.....		52
ANEXOS.....		57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Etapas del estudio del proceso Foto – Fenton .....	27
Figura 2	Muestreo de agua de la zona de mar de Ventanilla.....	28
Figura 3	Caracterización de muestra de agua de la zona de mar de Ventanilla .....	29
Figura 4	Preparación de muestra sintética .....	31
Figura 5	Reactor foto catalítico .....	32
Figura 6	Diagrama de Pareto general con variables de estudio .....	41
Figura 7	Diagrama de Pareto ajustado con variables de estudio.....	42
Figura 8	Curva % degradación vs tiempo (min).....	45
Figura 9	Gráfica Ln (DQO/DQOo) vs tiempo (min).....	46
Figura 10	Gráfica DQO (experimental y teórico) (mg/L) vs tiempo (min).....	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de muestra analizados .....	30
Tabla 2 Niveles y variables.....	33
Tabla 3 Plan experimental.....	33
Tabla 4 Plan experimental para la cinética .....	34
Tabla 5 Características fisicoquímicas de la calidad del agua del mar de Ventanilla ..	36
Tabla 6 Resultados porcentaje de degradación de petróleo (bloque experimental) ....	38
Tabla 7 Resultados porcentaje de degradación de petróleo (replica) .....	38
Tabla 8 Resultados estadística de regresión entre valores promedio de DQO (mg/L) y % de degradación de petróleo .....	39
Tabla 9 Resultados de análisis de varianza entre valores promedio de DQO (mg/L) y % de degradación de petróleo.....	39
Tabla 10 Resultados finales porcentaje de degradación de petróleo .....	40
Tabla 11 Resultados de prueba ANOVA general para variables de estudio .....	42
Tabla 12 Resultados de prueba ANOVA ajustado para variables de estudio .....	43
Tabla 13 Resultados de comportamiento de degradación de petróleo en función del tiempo .....	44
Tabla 14 Características fisicoquímicas de la calidad del agua de Ventanilla tratada con el proceso Foto - Fenton .....	48
Tabla 15 Resultados para Hidrocarburos totales de petróleo para agua de Ventanilla tratada con el proceso Foto - Fenton .....	49

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Caracterización de Muestras .....	57
Anexo 2 Prueba de DQO.....	61
Anexo 3 Prueba de DQO-Replica.....	65
Anexo 4 Resultados para Modelo Cinético.....	69
Anexo 5 Ensayo Caracterización Hidrocarburos Totales Agua de Ventanilla .....	72
Anexo 6 Ensayo Caracterización de Muestra Tratada .....	74
Anexo 7 Registro Fotográfico Muestreo.....	76
Anexo 8 Registro Fotográfico Preparación de muestra sintética .....	77
Anexo 9 Registro Fotográfico Caracterización de Muestra Sintética .....	79
Anexo 10 Registro Fotográfico Pruebas de Proceso Foto Fenton .....	82
Anexo 11 Registro Fotográfico Caracterización de Muestra Tratada .....	89
Anexo 12 Registro Fotográfico Equipos Conectados para Proceso Foto Fenton .....	93

## INTRODUCCIÓN

La demanda de cubrir necesidades básicas de la sociedad ha provocado la contaminación de aguas con derrames de petróleo. Los hidrocarburos son un grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno. Son los compuestos orgánicos más simples y pueden ser considerados como las sustancias principales de las que se derivan todos los demás compuestos orgánicos. Sin embargo, su manejo, distribución y transporte origina derrames, siendo una de las principales fuentes de contaminación e impactos ambientales, ya que contiene compuestos químicos tóxicos que ocasionan daños a plantas, animales y humanos (Perez et al., 2019).

El método Foto - Fenton, que puede reducir los principales contaminantes como DBO, DQO, sólidos suspendidos y coliformes. Las ventajas de este método son varias: el Fe (II) es abundante y no tóxico, el peróxido de hidrógeno es fácil de manejar, no se forman compuestos clorados como en otros métodos oxidantes, y no existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo. En contraposición, el método Foto - Fenton presenta como limitación la necesidad de operar en condiciones de acidez (pH, 2.8 a 3.0), donde un cambio produce efectos negativos en la eficiencia debido a la poca solubilidad de los iones Fe (III) generados en el tratamiento (Domenech et al., 2021).

El presente trabajo permite difundir la facilidad de aplicación de una tecnología que se ha aplicado con resultados satisfactorios y que puede resultar beneficiosa para el tratamiento de las aguas contaminadas por hidrocarburos una alternativa de tratamiento que se puede tomar para dar solución al problema y así minimizar los riesgos de contaminación ambiental.

## **CAPITULO I: GENERALIDADES**

### **1.1 Formulación de Problema**

#### **1.1.1 Descripción de Problema**

Los hidrocarburos siguen presentes en el ecosistema y zonas aledañas afectadas por el siniestro de Ventanilla a un año después del derrame de petróleo, según el Ministerio de Medio Ambiente (MINAM, 2023).

Los derrames de petróleo son un problema en este país. Así, la amazonía peruana ha sido escenario de varios derrames de petróleo, muchos de los cuales han impactado severamente a las poblaciones aledañas, principalmente indígenas, cuya supervivencia dependerá de la naturaleza y su entorno hasta que sane el medio ambiente.

Según la Agencia de Evaluación y Control Ambiental, entre marzo de 2011 y julio de 2019 se registraron 69 derrames de petróleo en la región Loreto solo del oleoducto Norperuano. Además, en 2020, hubo al menos 19 emergencias ambientales solo en el área del Bloque 192 (Defensoría del pueblo, 2022).

A esta larga lista se suma el derrame del 15 al 25 de enero de 2022 en la terminal 2 de multiboyas de la refinería La Pampilla, operada por el grupo Repsol. El primero de ellos, unos 12.000 barriles de petróleo, provocó el peor desastre ambiental en Lima, dada su magnitud y la falta de respuestas empresariales y gubernamentales oportunas y efectivas para aumentar su impacto (Defensoría del pueblo, 2022).

El tiempo que tarda en recuperarse un ecosistema dañado por un derrame de petróleo puede llegar a demorar hasta 100 años. Pero si el vertido no es enorme, el ecosistema se recupera en 10 o 20 años (BBC , 2010).

Por ello es necesario plantear alternativas de solución a esta problemática.

#### **1.1.2 Problema general**

¿Cuál es la eficiencia del proceso FOTO - FENTON en aguas contaminadas por hidrocarburos del mar de Ventanilla?

#### **1.1.3 Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua de Ventanilla?

- ¿Cuál es el efecto de la concentración de  $H_2O_2$ , concentración  $Fe^{2+}$  y el tiempo de radiación sobre el porcentaje de degradación de petróleo mediante el proceso Foto - Fenton en aguas contaminadas sintéticas?
- ¿Cuáles son los parámetros de concentración de  $H_2O_2$ , concentración de  $Fe^{2+}$  y el tiempo de radiación que logran mayor porcentaje de degradación de hidrocarburos en aguas de concentración sintéticas?
- ¿Cuál es el modelo cinético del proceso?
- ¿Cuál es la calidad del agua de Ventanilla tratada con el proceso Foto – Fenton?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Determinar la eficiencia del proceso Foto – Fenton en aguas contaminadas por hidrocarburos del mar de Ventanilla.

### **1.2.2 Específicos**

- Caracterizar fisicoquímicamente la calidad del agua de Ventanilla.
- Determinar el efecto de la concentración de  $H_2O_2$ , concentración  $Fe^{2+}$  y el tiempo de radiación sobre el porcentaje de degradación de petróleo mediante el proceso Foto – Fenton en aguas contaminadas sintéticas.
- Establecer los parámetros de concentración de  $H_2O_2$ , concentración de  $Fe^{2+}$  y el tiempo de radiación que logran mayor porcentaje de degradación de hidrocarburos en aguas contaminadas sintéticas.
- Establecer el modelo cinético del proceso.
- Determinar la calidad del agua de Ventanilla tratada con el proceso de Foto – Fenton.

## **1.3 Justificación**

La presente investigación busca degradar la presencia de hidrocarburos de las aguas del mar de Ventanilla aplicando el proceso Foto – Fenton para poder remediar el daño ecológico.

Los resultados obtenidos en la investigación servirán de material de apoyo para futuras investigaciones relacionadas y se tome como referencia investigativa que permitirán una alternativa de solución a los problemas expuestos con anterioridad por tanto los resultados que se obtendrá en el proceso Foto – Fenton será una herramienta útil para el escalamiento industrial en el tratamiento de aguas contaminadas por hidrocarburos.



## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

En su investigación Rubio (2018) desarrolló el tratamiento de un agua residual procedente de una refinería de petróleo. Todos los procedimientos investigados dieron resultados insatisfactorios con tasas de remoción <30%, excepto los métodos Fenton y Foto - Fenton. Sin embargo, el proceso Foto - Fenton demostró ser el método más eficaz para el tratamiento de este tipo de aguas residuales, logrando una tasa de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) del 83%. También probaron la eficiencia del proceso de oxidación Foto - Fenton. Trataron aguas residuales contaminadas con diésel, tratadas con 0,1 mM  $Fe^{2+}$ , 50 mM  $H_2O_2$  y radiación UV (lámpara de mercurio de media presión, 450 W) y lograron una mayor degradación de los contaminantes mencionados hasta un 99 %. Los estudios han demostrado que la radiación UV combinada con el proceso Fenton puede eliminar significativamente las cargas orgánicas. Aunque el uso de lámparas UV artificiales aumentará los costos operativos.

Tapia (2016), desarrolló el proceso Fenton para lo cual agregaron diferentes dosis de  $H_2O_2$  y  $Fe^{2+}$  a cada muestra de agua, y sus concentraciones óptimas se determinaron utilizando el software Statgraphics. Se utilizó radiación UV para aumentar la tasa de degradación de los contaminantes: hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y fenol, y se determinó el tiempo óptimo de reacción. También usó diferentes materiales vegetales para la adsorción para seleccionar un biofiltro adecuado. En estas condiciones óptimas se alcanzaron los valores límite permisibles de TPH y fenoles en el vertido de aguas residuales. Con los resultados experimentales se llevó a cabo el escalado industrial del proceso. Para el agua de formación, un proceso de Fenton ligero es suficiente para cumplir con las regulaciones al eliminar el 83,4 % de TPH y el 98,7 % de fenol, mientras que el agua de refinería requiere una combinación de biofiltros (proceso de oxidación avanzada) para eliminar el 97,4 % de TPH y el 97,8 % de fenol.

Tinoco (2018), dividió su investigación en dos partes, primero hizo una muestra sintética para contener el principal compuesto contaminante, que utilizó para determinar la dosis óptima del reactivo de Fenton. En la primera parte se utilizó el proceso de Foto -Fenton por su alta eficiencia en la degradación de

compuestos alifáticos y aromáticos; las relaciones entre las concentraciones molares  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , de 12 y 0.06 respectivamente son mejores condiciones para la mineralización, degradación de hidrocarburos y detoxificación. Los resultados mostraron que el tratamiento solo con  $\text{H}_2\text{O}_2$  y radiación UV (254 nm) no redujo la toxicidad inicial en un 100% y la salinidad obtenida después de 4 horas de tratamiento fue inferior al 30% de los hidrocarburos de la muestra. Por otro lado, los procesos Fenton y Foto - Fenton desintoxican completamente el agua y mineralizan los hidrocarburos hasta en un 88% luego de 4 horas de reacción.

Béjar y Rodríguez (2022), en su investigación determinaron la eficiencia del proceso Foto - Fenton en agua contaminada con colorante verde ácido 25. Para este fin se utilizan micro reactores fotoquímicos. Los resultados mostraron que el proceso Fenton decoloró en un 94.89 % el colorante verde ácido 25 en parámetros adecuadas de  $\text{pH} = 3$ ,  $\text{Fe}^{2+} = 2 \text{ mg/L}$  y 2,94 mL de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Además, se demostró que el proceso Foto - Fenton que usa radiación azul de 435 a 445 nm es capaz de decolorar el 100 % de los colores en 45 minutos.

Conde (2016) obtuvo las mejores condiciones de descomposición en su estudio, es decir, la relación molar  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  de dos fuentes de hierro y bajo las condiciones: Relación de concentración 1:20 y  $\text{pH} 3$ , se obtuvieron resultados similares bajo estas condiciones. Las constantes de velocidad obtenidas utilizando  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{FeC}_2\text{O}_4$  como fuentes son  $5.46 \times 10^{-2}$  y  $5.63 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  respectivamente y la velocidad de degradación alcanza más del 95 % en 60 min. El  $\text{pH}$  fue la variable con mayor impacto en la degradación de pirazinamida. La tasa de descomposición disminuyó a medida que aumentó el  $\text{pH}$ . En cuanto a la mineralización, se obtuvieron resultados similares para las dos fuentes de hierro en las mejores condiciones de extracción. Sin embargo, la mineralización de bajo grado obtenida se debe a la alta estabilidad del anillo de pirazina. Según varios procesos de oxidación evaluados como Fotólisis, UV/  $\text{H}_2\text{O}_2$  Fenton, Foto - Fenton, etc. Este último proceso favorece la degradación debido a un efecto sinérgico de  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ . También se cuantificaron las concentraciones de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  durante el tratamiento Foto - Fenton bajo los mejores parámetros de degradación con ambas fuentes de hierro, llegando a observar

una disminución en la concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  y un aumento de concentración de  $\text{Fe}^{3+}$  más rápida con  $\text{FeSO}_4$  que con  $\text{FeC}_2\text{O}_4$ .

## **2.2 Fundamentos teóricos**

### **2.2.1 Composición de los hidrocarburos**

El crudo de petróleo se caracteriza por ser un líquido viscoso, negro y con composición química compleja que puede contener miles de compuestos pertenecientes a la familia de los hidrocarburos. Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por átomos de carbono e hidrógeno, la mayoría se extrae de combustibles fósiles. La composición elemental del crudo de petróleo está en función de la abundancia de los compuestos tipo hidrocarburo: carbono (84-87%), hidrógeno (11-14%), azufre (0-8%), oxígeno y nitrógeno (0-4%), y metales como el níquel y el vanadio.

Los hidrocarburos del petróleo y sus derivados pueden penetrar en el mar en forma de crudos (no refinados), con una gran cantidad de compuestos insolubles. Los petróleos refinados, gasolinas y otros combustibles fósiles, tienen un alto contenido de compuestos solubles (Perez et al., 2019).

### **2.2.2 Hidrocarburos totales del petróleo (TPH)**

Describe un gran grupo de compuestos derivados de hidrocarburos, incluidos compuestos alifáticos y aromáticos. Derivado originalmente del petróleo crudo. Los efectos de la exposición a hidrocarburos dependen de muchos factores, incluida la composición de TPH, la duración de la exposición y la cantidad de productos químicos en contacto. Los hidrocarburos causan serios problemas a animales y plantas cuando entran en contacto con el agua o el suelo. Los humanos entran en contacto con los hidrocarburos a través de la adsorción cutánea, la ingestión de alimentos contaminados y la inhalación.

### **2.2.3 Aguas contaminadas por hidrocarburos**

La contaminación por hidrocarburos puede ocurrir de manera selectiva (repentinamente en un cuerpo de agua) o sistemática (repetidamente en la misma área).

Las principales fuentes de contaminación por actividades petroleras que pueden afectar el agua son:

- Petróleo crudo procedente del petróleo contenido en derrames, fugas y efluentes.
- Agua de formación (agua natural de depósitos de sedimentos de petróleo) de grietas, sumideros y drenajes en estaciones de separación de tanques de lavado, procesos de estabilización, líneas de flujo y oleoductos.
- Fluidos de pruebas de producción: petróleo, agua de formación, gas natural, aditivos químicos, inhibidores de corrosión.
- Residuos, productos de la combustión del petróleo y sus derivados, emisiones de compuestos volátiles (Tapia, 2016).

#### **2.2.4 El verdadero impacto de un derrame de petróleo**

El petróleo forma una fina capa sobre la superficie del agua, bloqueando el paso de la luz solar.

Como efecto directo, se forma una película en la superficie del mar que impide que la luz entre en el agua. Hay varias especies en los ecosistemas marinos, como las algas, que requieren luz para la fotosíntesis. Si esto no sucede, muchos de ellos podrían morir.

Luego está la contaminación aguda que incluso puede conducir a la muerte de muchos organismos, ya que los contaminantes en los compuestos del petróleo crudo son muy tóxicos (Natura Responde , 2022).

#### **2.2.5 Características del mar peruano**

El clima tropical hace que el agua sea azul y altamente salina. En tanto, la región Centro-Sur se extiende desde Illescas hasta la frontera con el vecino Chile. El agua es más verde, menos salada y biológicamente rica (Natura Responde , 2022).

##### **A. Animales que hay en el mar peruano**

Las aguas de Perú albergan más de 1000 especies de peces, 1018 especies de moluscos y crustáceos y 215 especies de equinodermos, pero muchas especies están descubiertas y sin catalogar.

##### **B. Características del mar de Grau**

Sus aguas son tropicales porque se encuentran en regiones de baja latitud, cerca del Ecuador, están bajo la influencia de las corrientes del Niño y son aguas cálidas. El agua es azul porque se encuentra en el trópico, no afectada por las corrientes peruanas.

### **C. Características**

Ubicado cerca del Ecuador, el agua de nuestros océanos debe ser cálida y tropical, con una temperatura promedio de 23° a 24°. Sin embargo, esto no sucede porque existen agentes como las corrientes frías que la modifican.

### **D. Importancia del mar del Perú**

Las aguas peruanas son el sustento de cientos de comunidades pesqueras. Contribuyen a la seguridad alimentaria del país y genera miles de millones de divisas a través de las exportaciones.

### **E. Principales corrientes del mar peruano**

La corriente del Perú (Corriente de Humboldt), fluye de sur a norte y se extiende desde el sur de Chile hasta la frontera de Perú y Ecuador. El movimiento de la tierra empuja el agua fría profunda hacia el norte y hacia la superficie (Natura Responde , 2022).

## **2.2.6 Derrame de petróleo en Ventanilla**

El impacto ambiental en el mar y las especies tras el derrame de petróleo en las playas de Bahía Blanca y Costa Azul (Ventanilla) en la Terminal Multiboyas N° 2 de La Pampilla S.A.A., plantea interrogantes sobre la magnitud de los impactos ambientales en las especies que habitan en esta zona.

Asimismo, si bien aún no existe información suficiente para determinar los daños exactos causados por el derrame en territorio peruano, se puede considerar la historia de los hechos en diferentes partes del mundo.

### **A. Impactos ambientales**

El primer efecto de un derrame de petróleo es la formación de una película sobre la superficie del mar. Esto bloquea la luz y evita la fotosíntesis de las algas. Debido a la toxicidad del petróleo crudo, muchos organismos son envenenados en un proceso conocido como contaminación aguda.

### **B. Otros factores para tomar en cuenta**

Las especies y ecosistemas más productivos se ven afectados cuando la escorrentía se produce cerca de las zonas costeras.

Por lo tanto, también es importante conocer la cantidad y la composición del crudo derramado. Ciertos compuestos son más tóxicos, y si se trata de petróleo crudo liviano, el problema se evapora del océano y se derrama a la atmósfera. Todo depende de la infiltración del fondo marino, arena y lodo, que tardan en descomponerse y recuperarse (Sociedad Peruana de Derecho Ambiental, 2022).

### **2.2.7 Descripción de los principales parámetros de la calidad del agua**

Entre los numerosos parámetros que permiten evaluar la calidad del agua, se deben tomar en cuenta los más representativos y cuyo análisis permitirá evidenciar la eficacia del tratamiento aplicado al efluente residual industrial según (Andrade, 2016).

#### **2.2.7.1 Parámetros físicos**

- **Conductividad Eléctrica:** La conductividad eléctrica se refiere a la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. Esta determinación se relaciona con la concentración total de componentes ionizados en varias soluciones. La conductividad es proporcional a la salinidad disuelta y, por lo tanto, está directamente relacionada con el número total de cationes o aniones determinados química y generalmente está estrechamente relacionada con el total de sólidos disueltos. Las medidas están normalizadas a 25°C ya que varían con la temperatura.
- **Temperatura:** Está directamente relacionado con el nivel de oxígeno disuelto. Cuanto mayor sea la temperatura, menor será el contenido de oxígeno disuelto. Los termómetros o sondas se utilizan para medir la temperatura.
- **Turbidez:** La turbidez es una medida de la cantidad de partículas en suspensión en el agua. Las algas, los sedimentos en suspensión, la materia orgánica y los contaminantes pueden enturbiar el agua.

### 2.2.7.2 Parámetros químicos

- **pH:** Determinar el pH del agua indica su tendencia hacia la acidez o la alcalinidad, pero no mide el nivel de acidez o alcalinidad. El valor del pH es un indicador de la capacidad trófica de los cuerpos de agua. El agua ácida se llama oligotrófica y el agua alcalina se llama eutrófica. La mayoría de los cuerpos de agua naturales tienen un pH entre 4 y 9, pero muchos son ligeramente básicos debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos.
- **DQO (Demanda Química de Oxígeno):** Es la cantidad de materia orgánica en el agua que es oxidada por un agente oxidante, expresada en mg/l. Cantidad de oxígeno disuelto requerida para la oxidación química completa de los contaminantes, por tanto, la DQO de muestras de agua se incrementa con el aumento de la concentración de la materia orgánica, lo que implicaría que una medición normal podría ser < 10 mg/L, mientras una lectura de 60 mg/L puede ser considerada como rica (Sociedad Peruana de Derecho Ambiental, 2022).

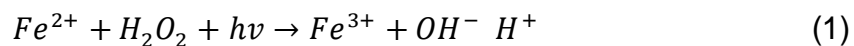
### 2.2.8 Proceso Foto - Fenton

El proceso Foto – Fenton permite demostrar que el peróxido de hidrógeno se puede activar en presencia de los iones  $Fe^{2+}$  y luz para oxidar ácidos tartáricos (Cuesta, 2019).

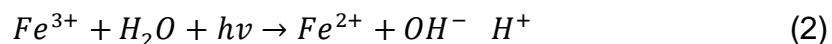
El proceso Foto - Fenton es considerado una de las alternativas que permiten tratar una amplia gama de contaminantes de una forma más eficaz, con el propósito de mejorar la mineralización de las aguas residuales (Cuesta, 2019).

Varios autores afirman que el proceso Foto - Fenton puede tratar de manera muy efectiva los efluentes residuales de la industria petroquímica que contienen altos niveles de hidroxilo ferroso y contaminación del espectro visible. A menudo se utiliza cuando se requiere una gran reducción en la demanda bioquímica de oxígeno (Cuesta, 2019).

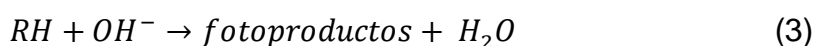
Este proceso involucra una serie de reacciones cíclicas que generan especies reactivas de oxígeno para oxidar contaminantes orgánicos. Las reacciones que forman radicales  $OH^\circ$  en el proceso de Foto - Fenton se muestran en las ecuaciones 1, 2 y 3.



Entonces en la ecuación 1 el  $Fe^{2+}$  se oxida a  $Fe^{3+}$  en el cual hay descomposición del peróxido de hidrógeno y se forman radicales hidroxilos.



La ecuación 2 muestra un incremento de la oxidación por efecto de la foto-reducción del  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$  por efecto de la radiación UV lo que produce más radicales hidroxilos.



Posteriormente la ecuación 3 indica la producción de radicales hidroxilos con el cual se presenta la oxidación de los compuestos orgánicos a través de un ciclo del reactivo Fenton.

El proceso Foto - Fenton está fundamentado en el tratamiento de compuestos plaguicidas, herbicidas, fenoles, entre otros compuestos, estos sistemas de oxidación han sido probados de una manera eficiente en la conversión de una amplia gama de compuestos orgánicos tóxicos y persistentes, entre los que podemos encontrar los hidrocarburos aromáticos policíclicos (Cuesta, 2019).

### **2.2.9 Influencia de la concentración del agente oxidante y del catalizador**

La cantidad de  $H_2O_2$  y de sales de hierro a utilizar depende del tipo de contaminante que se pretenda remover. Cabe destacar que el  $H_2O_2$ , requiere de grandes cantidades de  $Fe^{2+}$  para su descomposición en radicales  $OH^-$ . 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, Chica, & Peñuela, 2018).

De acuerdo con Belles (2018), la dosis de  $H_2O_2$  es importante, ya que cuando este compuesto se consume completamente durante la degradación de contaminante, la reacción se detiene; sin embargo, cuando existe exceso de este compuesto, es posible que ocurran reacciones competitivas que reducen la eficiencia del proceso debido al bajo efecto oxidativo del radical  $OH^-$  que se forma.



### **2.2.10 Influencia del pH**

El pH es una de las variables más significativas en el proceso Fenton. Estudios sobre el reactivo Fenton han demostrado que sólo es efectivo para un rango de pH que oscila entre 2.5 – 4 (Rubio, Chica, & Peñuela, 2018).

De acuerdo con Marín y Clemente (2020), se observa que el pH de una solución genera un alto impacto en el porcentaje de remoción de DQO; además se conoce que un valor de pH elevado en la solución resulta en una menor remoción de DQO (para un rango entre 3 a 7 unidades de pH) y desde un punto de vista químico, esto se explica por la formación de hidróxido de hierro (II) ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) e hidróxido de hierro (III) ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) a pH mayores a 4, estos compuestos precipitan mas rápidamente limitando las reacciones 3 y 4, lo que reduce el efecto en el proceso.

### **2.2.11 Influencia del tiempo de reacción**

De acuerdo con De la Cruz (2013), el tiempo de reacción necesario depende principalmente de la intensidad y riqueza de UV de la lampara que se usa para el tratamiento, es por ello que cuando se usan lamparas con menores valores de UV se ralentiza el proceso lo que genera una influencia significativa en la degradacion de los contaminantes por la generación de radicales hidroxilo (OH) que se vuelve menos eficiente y por lo tanto se reduce el efecto del proceso foto fenton.

Desde un punto de vista económico, se ha demostrado que operar con altos tiempos de residencia no es viable; de hecho, con bajos períodos de reacción se consiguen buenos niveles de degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación química (Rubio, Chica, & Peñuela, 2018).

### **2.2.12 Influencia del tipo de contaminante**

Los efluentes petroquímicos se caracterizan por una alta demanda química de oxígeno (DQO). Por lo tanto, la DQO es un parámetro esencial para conocer el grado de contaminación del agua y es muy importante para la eficiencia del proceso Fenton (Rubio, Chica, & Peñuela, 2018).

### 2.2.13 Cinética y orden de reacción

La cinética química de acuerdo con Gordon (1973) se define como el estudio de todo lo concerniente a la velocidad de aquellos sistemas químicos que se aproximan a una condición de equilibrio y dicha velocidad de reacción se puede determinar experimentalmente a través de la variación de la concentración de uno o más reactivos en función del tiempo; la importancia de determinar la velocidad de reacción radica en que a través de ella se pueden desarrollar predicciones o teorías a priori acerca de los procesos que se estén estudiando y además poder justificar la forma de velocidad que se observa.

Se llama orden de reacción parcial al valor del exponente al que esta elevada la concentración de reactivo A o B en la expresión:

$$v=K[A]^m[B]^n \quad (4)$$

Donde:

v: Velocidad de reacción (mol /Ls)

K: Constante de velocidad de reacción

A: Concentración de Reactivo A (mol/L)

B: Concentración de Reactivo B (mol/L)

m: Orden de reacción parcial respecto al reactivo A

n: Orden de reacción parcial respecto al reactivo B

La suma de ambos exponentes (m y n) se denomina orden de reacción global. Se conocen 3 ordenes de reacción (orden 0, orden 1, orden 2) que se presentan de acuerdo a la velocidad de reacción que se define matemáticamente a partir de la diferencial de concentración de reactivo en función al tiempo (Atáres, 2021). Finalmente para determinar el orden de reacción es necesario conocer la ecuación cinética de la misma, ósea que esta debe expresarse como el producto de una constante cinética k por las concentraciones de las diferentes especies de la reacción elevadas a sus órdenes parciales.

Respecto a las reacciones de pseudo orden, se dan principalmente cuando la concentración del reactivo B se mantiene constante durante un periodo de tiempo determinado, por lo que la ecuación de velocidad se puede describir a través de la siguiente expresión.

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = K'[A]$$

Donde:

$$K' = K[B]$$

Por lo tanto si  $[B] \gg [A]$ , mientras la concentración de A cambia de  $[A]_0$  a  $[A]$ , entonces  $[B]$  disminuirá aproximadamente 1% cuando la reacción haya llegado a su fin (Castillo, 2015).

### **CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS**

La investigación se desarrolló en el laboratorio del Instituto Científico Sostenible Minero (ICSM) que se encuentra ubicado en Los Olivos. (Lima – Perú); este establecimiento contaba con los equipos e instrumentos necesarios para el desarrollo de la presente investigación (ver Anexo 07, figuras 02 y 03).

#### **3.1 Muestra**

La muestra estuvo constituida por aguas sintéticas y real del mar de Ventanilla.

#### **3.2 Materiales**

##### **a) Materiales de vidrio y otros.**

- 8 unidades de vasos precipitados de vidrio de 500 y 1000mL.
- 1000 unidades de papel tisúes.
- 30 unidades de papel filtro para partículas de 3 a 5 um.
- 50 pares de guantes de nitrilo.
- 5 unidades de pisetas de 500mL de plástico.
- 1 unidad de micropipeta de 200uL.
- 2 unidades de vagueta de vidrio.
- 1 unidad espátula.
- 1 unidad luna de reloj.
- 1 unidad cucharilla de acero
- 2 fiolas de vidrio de 1L.
- 100 unidades de puntas de micropipetas.
- 3 gradillas de acero de 24 espacios.

##### **b) Reactivos**

- 100 g de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (sulfato ferroso heptahidratado) al 99.8% w/w.
- 4 L de peróxido de hidrógeno al 50% v/v.
- 15 mL de ácido sulfúrico en solución 1:1 V/V.
- 50 reactivos de DQO.

##### **c) Instrumentos y Equipos**

- Multiparámetro marca Hach Modelo Hq40d
- Colorímetro marca Hach Modelo DR900

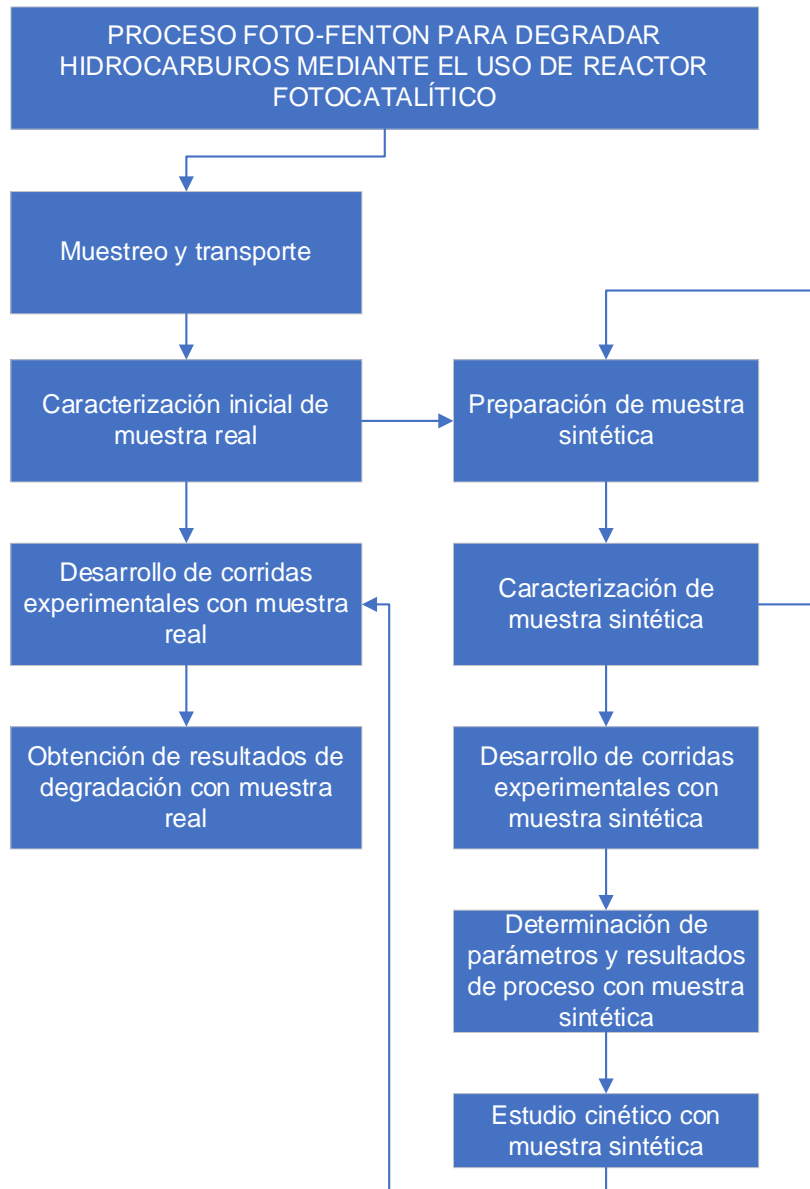
- Termoreactor marca Hach Modelo DRB200
- Centrifugadora marca Hach Modelo CRA300
- Turbidímetro portátil Hach Modelo 2100Q
- Reactor fotocatalítico con zona de reacción de 70 mL (Luz: UVc, 245 nm)
- Bomba de agua con un caudal de 0.005 L/s.

### 3.3 Métodos

El desarrollo de la investigación se siguió de acuerdo con lo descrito en la figura 1 que comprende las siguientes etapas.

**Figura 1**

*Etapas del estudio del proceso Foto – Fenton*



### 3.3.1 Muestreo y transporte

El método de muestreo se realizó de acuerdo a las especificaciones establecidas en la Guía técnica de procedimiento de tomas de muestras del agua de mar en playas establecido por el DIGESA a través de la R.M.Nº553-2010/MINSA que indica las diferentes técnicas de muestreo a realizar en tipos específicos de aguas (DIGESA, 2011).

Se tomo 20 litros de una muestra compuesta en la zona del mar de Ventanilla, específicamente en el punto de coordenadas: 18L 266983 mE y 8680054 mS, donde ocurrió el derrame de petróleo (ver figura 01 y 02 de Anexo 07). Un litro de esta muestra se colocó en un recipiente de vidrio de boca ancha de color ámbar y correctamente rotulado para luego ser transportada al laboratorio. En la figura 2 se visualiza la etapa de muestreo.

#### Figura 2

*Muestreo de agua de la zona de mar de Ventanilla*



### 3.3.2 Caracterización inicial de la muestra

Se caracterizó la muestra proveniente de la zona de mar de Ventanilla. La figura 3 muestra la etapa de caracterización de la muestra (ver anexo 09, figura 06).

### Figura 3

*Caracterización de muestra de agua de la zona de mar de Ventanilla*



Se analizaron los siguientes parámetros en la muestra (Tabla 1).

**Tabla 1**

Parámetros de muestra analizados

<b>TIPO DE ENSAYO</b>	<b>NORMA DE REFERENCIA</b>	<b>TÍTULO</b>
Hidrocarburos Totales de Petróleo	(C10-C40) 1 EPA METHOD 8015C Rev. 03 2007	Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography
Demanda química de oxígeno	SM Part 2320B, 23rd. Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD).Closed Reflux Colorimetric Method,23rd. Ed. 2017
Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Method 5520 D: Determination of Turbidity by the Nephelometric Method. Ed. 2017
pH	SM Part 4500-H+ B, 23rd. Ed. 2017	pH Value. Electrometric MethodSMEWW-APHA-AWWAWEF Part 4500-H+ B, 23rd. Ed. 2017
STD	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd. Ed. 2017	Method 2540 C: Determination of Total Suspended Solids (TSS). Ed. 2017
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B. 22nd Ed.2017	Conductivity. Laboratory Method, 23rd. Ed. 2017

### 3.3.3 Preparación de la muestra sintética

De acuerdo con la caracterización de la muestra del mar de ventanilla se llevó a cabo la preparación de la muestra sintética a través del ajuste de las características de esta a las de la muestra real (ver anexo 08, figura 03), para lo cual se consideró el procedimiento que se describe a continuación.

Para preparar la muestra sintética se tomaron 500 mL de agua destilada y 2.5 mL de Diesel, posterior a ello se añadieron 2 gotas de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) con el fin de ajustar el pH a 3. La figura 4 muestra la etapa de preparación de la muestra sintética (ver anexo 08, figura 08 a 12).



## Figura 4

### *Preparación de muestra sintética*



#### **3.3.4 Proceso Foto – Fenton con muestra sintética**

El proceso se desarrolló inicialmente con muestras sintéticas a concentración semejantes al agua del mar de Ventanilla (DQO = 1041mg/L).

Las corridas experimentales se desarrollaron utilizando el reactor foto catalítico, un vaso de precipitado de una capacidad de 1000 ml y una bomba de agua con un caudal de 0.005 L/s. El reactor catalítico consta de una fuente de radiación lámpara UV marca Philips de luz UVc (4w, 254nm), una carcasa cilíndrica de metal, una superficie reflectante de acero, un tubo de borosilicato en forma de espiral concéntrica que fue la zona de reacción con un volumen de 70 ml aproximadamente (ver figura 5).

## Figura 5

### Reactor foto catalítico



El proceso Foto – Fenton se desarrolló con 500 mL de muestra sintética a diferentes concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y tiempo de radiación; a un pH 3 y temperatura ambiente. Al termino de cada experimento se tomó una alícuota de 10 ml de muestra, a la cual se añadió hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) al 2% para detener la reacción, observándose la formación de un precipitado (ver Anexo 07, figuras 15 al 18). Se procedió a centrifugar y filtrar la muestra tratada (ver Anexo 10, figuras 19 a 24) .

Las variables en estudio son:

---

Concentración  $\text{Fe}^{2+}$  (mg/L)

Concentración  $\text{H}_2\text{O}_2$  (mg/L)

Tiempo de reacción (horas)

---

Los parámetros del proceso Foto – Fenton que se determinaron de acuerdo con estudios previos realizados, como el de Tinoco (2018) son:

- pH (3)
- Temperatura (ambiente: 20-25°C)
- Volumen de la muestra (500 ml)
- Radiación UVc (4W, 245nm)

Los niveles para cada una de las variables se muestran en la tabla 2:

**Tabla 2**  
Niveles y variables

<b>Variabes/ niveles</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>
Concentración $Fe^{2+}$ (mg/L)	200	300
Concentración $H_2O_2$ (mg/L)	2	4
Tiempo de reacción (horas)	1	3

El plan experimental se muestra en la tabla 3 comprende un diseño factorial completo  $2^3=8$ , además de 2 puntos medios haciendo un total de 10 experimentos y considerando una réplica se desarrollaron 20 experimentos y se determinó la degradación del DQO (ver anexo 11, figura 26).

**Tabla 3**  
Plan experimental

<b>N°</b>	<b>Concentración de <math>Fe^{2+}</math> (mg/L)</b>	<b>Concentración de <math>H_2O_2</math> (mg/L)</b>	<b>Tiempo de reacción (horas)</b>	<b>% de degradación de petróleo</b>
1	200	2	1	
2	300	2	1	
3	200	4	1	
4	300	4	1	
5	200	2	3	
6	300	2	3	
7	200	4	3	
8	300	4	3	
9	250	3	2	
10	250	3	2	

El porcentaje de degradación (% de DQO eliminado) se determinó a través de la siguiente expresión:

$$\% \text{ de degradación (DQO eliminado)} = \left( \frac{DQO_{inicial} - DQO_{final}}{DQO_{inicial}} \right) \times 100 \quad (5)$$

El análisis estadístico comprendió el estudio del efecto de cada una de las variables independientes sobre la variable dependiente y la determinación de la significancia de cada una de las variables en estudio a través de la prueba ANOVA usando el software Statgraphics.

### 3.3.5 Parámetros de proceso

Los parámetros de proceso estuvieron constituidos por los niveles de cada una de las variables que tuvieron influencia en el porcentaje de degradación de hidrocarburos.

### 3.3.6 Estudio cinético

Para determinar el modelo cinético se desarrolló el proceso Foto – Fenton a las condiciones a las cuales se lograron mayor porcentaje de eliminación de DQO; para lo cual se tomaron alícuotas de los volúmenes cada 5 min. Los datos obtenidos fueron ajustados a un modelo cinético. La tabla 4 muestra el plan experimental.

**Tabla 4**  
Plan experimental para la cinética

N° experimento	Tiempo (minutos)	% de degradación de petróleo
1	5	
2	15	
3	30	
4	40	
5	55	
6	65	
7	80	

N° experimento	Tiempo (minutos)	% de degradación de petróleo
8	90	
9	105	
10	115	
11	130	
12	140	
13	155	
14	165	
15	180	

### 3.3.7 Proceso Foto – Fenton con muestra real

Se realizó el tratamiento para el agua de Ventanilla mediante el proceso Foto – Fenton con los parámetros (concentración H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, concentración Fe<sup>2+</sup> y el tiempo de radiación) determinados en el ítem anterior. La eficiencia del proceso se determinó con la ecuación 6.

$$\% \text{ de degradación (DQO eliminado)} = \left( \frac{DQO_{inicial} - DQO_{final}}{DQO_{inicial}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Con el fin de corroborar los resultados se realizó la determinación de HTP en la muestra inicial y la muestra tratada. Por tanto, el porcentaje de HTP eliminado (eficiencia del proceso) se determinó con la ecuación 7.

$$\% \text{ HTP eliminado} = \left( \frac{HTP_{inicial} - HTP_{final}}{HTP_{inicial}} \right) \times 100 \quad (7)$$

## CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización fisicoquímica de la calidad del agua de Ventanilla

Se determinaron las características fisicoquímicas de la calidad del agua de Ventanilla (ver Anexo 01), obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5**

Características fisicoquímicas de la calidad del agua del mar de Ventanilla

Parámetros	Norma de referencia	Método de ensayo	Resultado
DQO (mg/L)	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Método colorimétrico	1174
Turbidez (NTU)	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 2130 B, 23rd. Ed. 2017	Método nefelométrico	0.39
pH	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 4500- H+ B, 23rd. Ed. 2017	Método electrométrico	8.16
STD (mg/L)	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd. Ed. 2017	Solidos disueltos totales secado a 180° C	32.3
Conductividad (mS/cm)	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 2510 B. 22nd Ed.2017	Método de conductividad	51.4

Los resultados indican valores altos de DQO (1174 mg/L) que superan en 29.35 veces el estandar de calidad ambiental (40 mg/L) aprobado mediante el Decreto Supremo 004-2017 del MINAM, lo que indica la necesidad de tratamiento de dichas aguas. Respecto a la normativa internacional, se observa una diferencia significativa con el valor establecido en la normativa chilena del Decreto Supremo N°90/2000 que especifica 60mg/L para DQO en aguas de mar

y también se observa una diferencia significativa respecto al valor de 100mg/L para DQO recomendado por el National Recommended Water Quality Criteria (EPA) en los Estados Unidos; por lo que el estudio se enfocó principalmente en la reducción del valor de DQO de las muestras que sobrepasa los valores mostrados anteriormente, respecto al valor de turbidez se cumple con el valor establecido en la norma peruana que es de 100 NTU, respecto al valor de pH se cumple con el valor establecido que en la norma peruana que es de 8.5, lo mismo sucede con los sólidos suspendidos totales que no sobrepasa el valor de la normativa peruana que es menor o igual a 30 mg/L.

De acuerdo con la tabla 5, se observa un valor elevado de DQO de 1174 mg/L, valor de turbidez igual a 0.39, pH de 8.16, sólidos disueltos totales igual a 32.3 mg/L y conductividad igual a 51.4 mS/cm, aun así es menor a las diferentes caracterizaciones realizadas en otros estudios como el de Tapia (2016) que trabajó con un agua contaminada con hidrocarburos procedente de la refinería La Libertad cuya caracterización evidenció valores de pH igual a 7.5, DQO = 1189 mg/L, conductividad igual a 32.7 mS/cm y sólidos disueltos totales igual a 17.34mg/L, como el estudio de Tinoco (2018) que trabajó con una muestra de agua sintética contaminada con diesel y gasolina que a través de su caracterización evidenció un valor de pH igual a 8, demanda química de oxígeno igual a 1725 mg/L y un valor de hidrocarburos totales igual a 236 mg/L, finalmente se rescata la valoración realizada por Romero (2014) que menciona que los valores de DQO usuales para aguas provenientes de la industria petrolera se encuentran entre 850 a 1020 mg/L, pH entre 8 a 8.20 y turbidez entre 22 a 52 NTU, dichos valores validan los resultados obtenidos en el presente trabajo para la caracterización de los contaminantes.

#### **4.2 Proceso Foto – Fenton con agua sintética**

Se determinó el porcentaje de degradación del petróleo de acuerdo con los tres factores determinados en el diseño experimental: Concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, concentración de Fe<sup>2+</sup> y tiempo de radiación para un valor inicial de DQO de 1041 mg/L obteniéndose resultados que se muestran en la Tabla 6 que muestra los resultados del bloque experimental (ver Anexo 02) y la Tabla 7 que muestra los resultados de la réplica (ver Anexo 03).

**Tabla 6**

Resultados porcentaje de degradación de petróleo (bloque experimental)

Desv. Estándar= 21.63					
N°	Concentración de $Fe^{+2}$ (mg/L)	Concentración de $H_2O_2$ (mg/L)	Tiempo de reacción (horas)	DQO final (mg/L)	% de degradación de petróleo
1	200	2	1	74	93
2	300	2	1	94	91
3	200	4	1	68	93
4	300	4	1	508	51
5	200	2	3	472	55
6	300	2	3	587	44
7	200	4	3	21	98
8	300	4	3	58	94
9	250	3	2	46	96
10	250	3	2	48	95

**Tabla 7**

Resultados porcentaje de degradación de petróleo (replica)

Desv. Estándar= 21.22					
N°	Concentración de $Fe^{+2}$ (mg/L)	Concentración de $H_2O_2$ (mg/L)	Tiempo de reacción (horas)	DQO final (mg/L)	% de degradación de petróleo
1	200	2	1	76	93
2	300	2	1	91	91
3	200	4	1	63	94



Desv. Estándar= 21.22					
N°	Concentración de $Fe^{+2}$ (mg/L)	Concentración de $H_2O_2$ (mg/L)	Tiempo de reacción (horas)	DQO final (mg/L)	% de degradación de petróleo
4	300	4	1	497	52
5	200	2	3	453	56
6	300	2	3	572	45
7	200	4	3	24	98
8	300	4	3	62	94
9	250	3	2	53	95
10	250	3	2	45	96

**Tabla 8**

Resultados estadística de regresión entre valores promedio de DQO (mg/L) y % de degradación de petróleo

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	1,0000
Coefficiente de determinación $R^2$	0,9999
$R^2$ ajustado	0,9999
Error típico	0,2023
Observaciones	10

**Tabla 9**

Resultados de análisis de varianza entre valores promedio de DQO (mg/L) y % de degradación de petróleo

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	4130,77257	4130,77257	100925,837	1,0792E-17
Residuos	8	0,327430335	0,040928792		
Total	9	4131,1			

Respecto a la variación de resultados entre el primer bloque experimental y la réplica, se observa a través de la tabla 8 que se obtuvieron mínimas variaciones ya que el coeficiente de determinación  $R^2$  resulto ser de 0,99,

también se observa en la tabla 9 que el valor crítico de F se aproxima a cero por lo que el modelo de regresión que describe los valores de degradación (%) en función del DQO (mg/L) es estadísticamente significativo; en consecuencia se determina que los valores finales de DQO y el porcentaje de degradación resultante del promedio de los valores de DQO del primer bloque experimental y la réplica son consistentes y no muestran variabilidad significativa gracias a la desviación estándar de los residuos de la regresión y en particular al error típico de 0,20 que indica que los puntos de datos están más cerca de la línea de regresión ajustada.

**Tabla 10**

Resultados finales porcentaje de degradación de petróleo

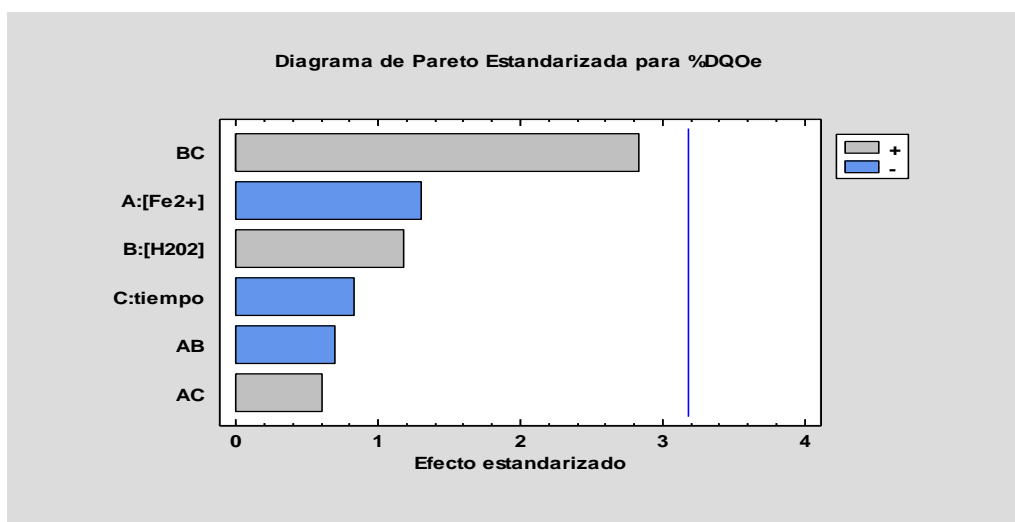
<b>Desv. Estándar = 21,41</b>					
<b>N°</b>	<b>Concentración de <math>Fe^{+2}</math> (mg/L)</b>	<b>Concentración de <math>H_2O_2</math> (mg/L)</b>	<b>Tiempo de reacción (horas)</b>	<b>Promedio DQO final (mg/L)</b>	<b>% de degradación de petróleo promedio</b>
1	200	2	1	75	93
2	300	2	1	93	91
3	200	4	1	66	94
4	300	4	1	503	52
5	200	2	3	463	56
6	300	2	3	580	44
7	200	4	3	23	98
8	300	4	3	60	94
9	250	3	2	50	95
10	250	3	2	47	96

Se observa en la tabla 10 que el porcentaje de degradación obtenido en los 20 experimentos fluctúa entre 44% y 98%, los experimentos 4, 5 y 6 en los que se obtuvieron menores valores de degradación que se caracterizan por ser resultantes de concentración de  $Fe^{2+}$  alto, concentración de  $H_2O_2$  alto y tiempo

de radiación bajo, concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  bajo, concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  bajo y un tiempo de radiación alto, concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  alto, concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  bajo y un tiempo de radiación bajo; el problema principal radica en que para concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  alto, concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  alto se requiere de un tiempo de radiación alto, para concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  bajo, concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  bajo se requiere de un tiempo de radiación bajo y para concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  alto, concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  bajo se requiere de un tiempo de radiación alto; dichos resultados concuerdan con los obtenidos por Aznate, Cerro, y Orozco (2013) que resaltan que el incremento en la dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  mejora la eficiencia del proceso ya que se genera mayor cantidad de radicales hidroxilos que incrementan la velocidad de degradación. Sin embargo, los autores mencionan que una dosis muy elevada de  $\text{Fe}^{2+}$  provoca resultados adversos en el proceso concordando con lo mencionado anteriormente. Además los resultados también concuerdan con los obtenidos por Centeno, Labrador, Lara, y Jimenez (2021) ya que obtuvieron porcentajes que variaron de acuerdo al tiempo de tratamiento a las que se sometieron las muestras estudiadas

### Figura 6

Diagrama de Pareto general con variables de estudio



De acuerdo con la figura anterior, se observa que ninguna de las variables presenta un efecto significativo sobre la variable respuesta.

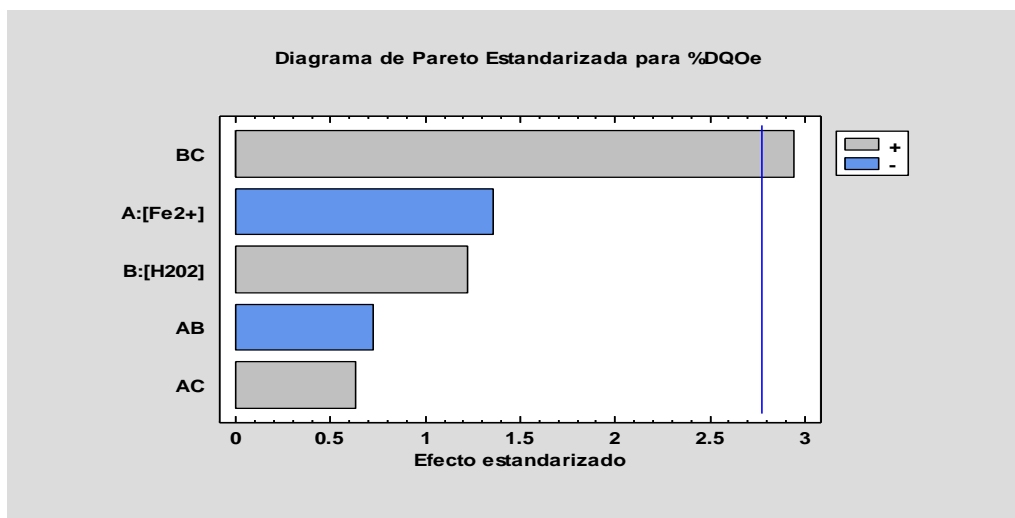
El análisis de la significancia de las variables independientes sobre la variable dependiente se muestra en la tabla 11.

**Tabla 11**

Resultados de prueba ANOVA general para variables de estudio

Variable	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Concentración Fe2	450.0	1	450.0	1.70	0.2829
B:Concentración H2O2	364.5	1	364.5	1.38	0.3249
C:Tiempo	180.5	1	180.5	0.68	0.4691
AB	128.0	1	128.0	0.48	0.5365
AC	98.0	1	98.0	0.37	0.5855
BC	2112.5	1	2112.5	8.00	0.0663
ABC	792.6	3	264.2		
Error total	4126.1	9			
Total (corr.)	450.0	1	450.0	1.70	0.2829

De acuerdo a la tabla anterior, se observa que el valor de P en todos los casos es mayor a 0.05 por lo que aunque no hay una significancia estadística, existen interacciones cerca del umbral de significancia, además el valor de  $R^2$  resultante es de 44.37%, es decir se tiene un una incidencia baja de cada una de las variables y un ajuste bajo en el modelo establecido que a futuro puede presentar variaciones significativas y no es fiable, por lo que se procedió a depurar la variable que menor significancia presento (tiempo) para incrementar la precisión del modelo obteniendo el siguiente diagrama de Pareto estandarizado (figura 7).

**Figura 7***Diagrama de Pareto ajustado con variables de estudio*

De acuerdo con la figura anterior, se observa que las variables que más significancia tienen en el proceso de degradación de hidrocarburos son: la interacción entre la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo. Los resultados de la prueba ANOVA se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12**

Resultados de prueba ANOVA ajustado para variables de estudio

Variable	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>A:Concentración Fe2</b>	450.0	1	450.0	1.85	0.2454
<b>B:Concentración H2O2</b>	364.5	1	364.5	1.50	0.2881
<b>AB</b>	128.0	1	128.0	0.53	0.5084
<b>AC</b>	98.0	1	98.0	0.40	0.5601
<b>BC</b>	2112.5	1	2112.5	8.68	0.0421
<b>Error total</b>	973.1	4	243.275		
<b>Total (corr.)</b>	4126.1	9			

De acuerdo a la tabla anterior, se observa que la interacción entre las variables: Concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo presenta valor de  $p < 0.05$ , por lo que tiene significancia, afirmación que concuerda con la conclusión mencionada por Rubio, Chica, y Peñuela (2013) que resaltan que las variables mas influyentes en el proceso son las concentraciones de Fe<sup>2+</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ademas del tiempo de reacción y por Aznate, Cerro, y Orozco (2013) que indican que si bien las interacciones dobles no se pueden explicar desde un punto de vista físico, estas tienen significancia y el valor positivo que se muestra entre la interaccion de variables indica que dicha interacción es sinérgica; es decir que existe un incremento combinado entre los efectos principales de la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo; por tanto, el efecto combinado de dicha concentración y tiempo variaran de manera conjunta mas que de manera individual.

### 4.3 Parámetros del proceso

De acuerdo con los resultados de la investigación, se observó que el mayor porcentaje de degradación obtenido es de 98% para una concentración de Fe<sup>2+</sup> de 200 mg/L, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 4 mg/L y un tiempo de radiación de 3 horas; constituyendo estos los parámetros del proceso. Se puede apreciar una reducción es significativa para DQO que pasó de 1041 mg/L a 23 mg/L. Los

resultados obtenidos superan a los que muestran autores como Tinoco (2018) que considera como dosis optima de tratamiento 200 mM de  $H_2O_2$ , 1mM de  $Fe^{2+}$  y obtuvo un porcentaje de degradación menor del 90% que evidencio una reducción para DQO de 1725 mg/L a 250 mg/L y para HTP una reducción de 236 mg/L a 20 mg/L para un tiempo de reacción que fue de 4 horas, tambien se supera el resultado obtenido por Tapia (2016) que considera como dosis optima para el proceso a de 100 mM de  $H_2O_2$ , 1mM de  $Fe^{2+}$  y obtuvo un porcentaje de degradación menor del 65% que evidencio una reducción para DQO de 1189 mg/L a 410 mg/L y para HTP una reducción del 97% que muestra un cambio de 215 mg/L a 5 mg/L para un tiempo de reacción menor que fue de 1 hora. Finalmente los resultados no concuerdan con lo mencionado por Rubio, Chica, y Peñuela (2013) que mencionan que se obtienen resultados de reducción del 80% para DQO con tiempos de reacción bajos aproximados a 1 hora y media, para una dosis de  $H_2O_2$  proxima a 50 mg/L y para valores de  $Fe^{2+}$  próximos a 0.06M.

#### 4.4 Modelo cinético del proceso

Respecto al modelo cinético del proceso, se obtuvieron los siguientes resultados de degradación en función del tiempo (ver Anexo 04), con el cual fue posible determinar dicho modelo, tal como se muestra en la tabla 13.

**Tabla 13**

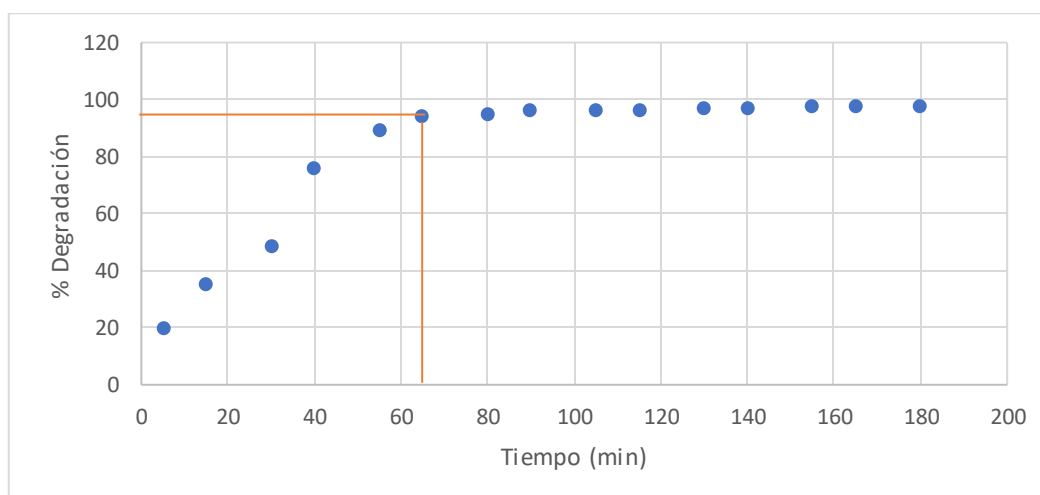
Resultados de comportamiento de degradación de petróleo en función del tiempo

N°	Tiempo (minutos)	DQO (mg/L)	% de degradación de petróleo
1	0	1041	0
2	5	1038	20
3	15	828	35
4	30	680	49
5	40	526	76
6	55	247	89
7	65	114	94

N°	Tiempo (minutos)	DQO (mg/L)	% de degradación de petróleo
8	80	58	95
9	90	52	96
10	105	46	96
11	115	42	96
12	130	39	97
13	140	28	97
14	155	25	98
15	165	23	98
16	180	19	98

Con los resultados mostrados en la tabla anterior se obtiene la siguiente curva la que se ajustó a una curva exponencial con el fin de determinar la ecuación que describe el comportamiento de la degradación en función del tiempo (ver figura 8).

**Figura 8**  
Curva % degradación vs tiempo (min)

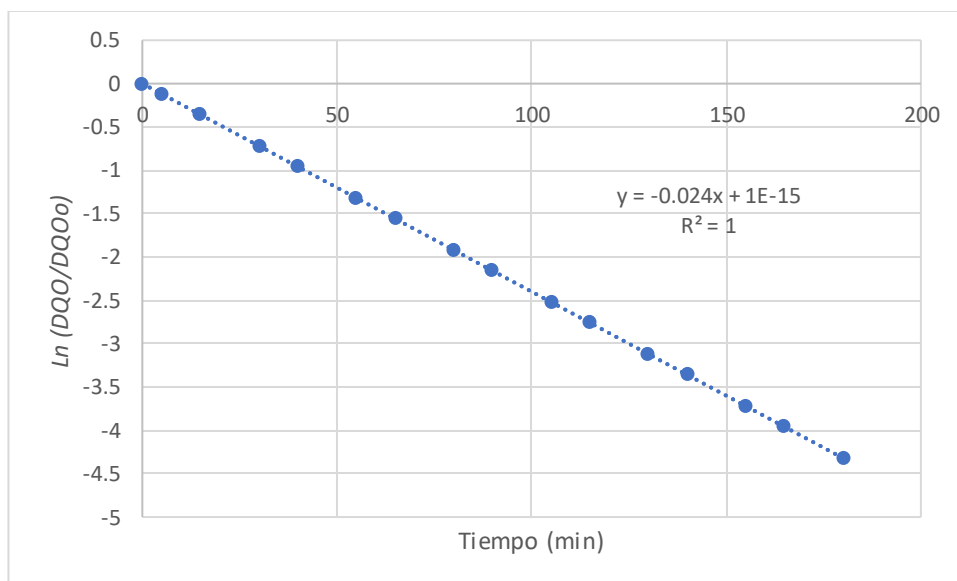


De acuerdo con la figura anterior, se observa un crecimiento de la degradación respecto al tiempo, dicho comportamiento se asemeja al reportado por Aznate, Cerro, y Orozco (2013) quienes destacan una alta degradabilidad después del tratamiento a causa de la eliminación de DQO promovida por el

oxígeno disuelto, de la misma manera Medina (2018) reporta un comportamiento similar de la degradación respecto al tiempo; se observa también que la degradación alcanza un valor a los 65 min de tratamiento, con un porcentaje de remoción de 94%, este valor se aproxima al reportado por Walling et al. (2021) que es del 96% para un tiempo de tratamiento de 60 min.

Respecto al orden de reacción, se conoce que el proceso Foto-Fenton sigue una cinética de pseudo primer orden de acuerdo con lo expuesto por Chu et al.,(2005) y Liou et al., (2004), es decir que la reacción tiende a reducir su velocidad a medida que pasa el tiempo respecto al  $H_2O_2$  y la formación de radicales hidroxilo, sin embargo en este caso se considera constante a la acción del  $Fe^{3+}$  por tener concentración superior al  $H_2O_2$  y por lo tanto la velocidad determinada depende también de la acción de este reactivo. En consecuencia, a través de los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 12 se crea la gráfica mostrada a continuación.

**Figura 9**  
*Gráfica  $\ln(DQO/DQO_0)$  vs tiempo (min)*



La ecuación resultante a partir de la figura 9, es:  $y = -0.024x$  y posee un coeficiente  $R^2$  de ajuste igual a 1, lo que valida los resultados obtenidos en la presente investigación y además se conoce que la pendiente representa la constante de velocidad de reacción  $K$  (aparente) resultante del modelo cinético de pseudo primer orden que es  $0.024 \text{ min}^{-1}$ , este valor se aproxima al reportado

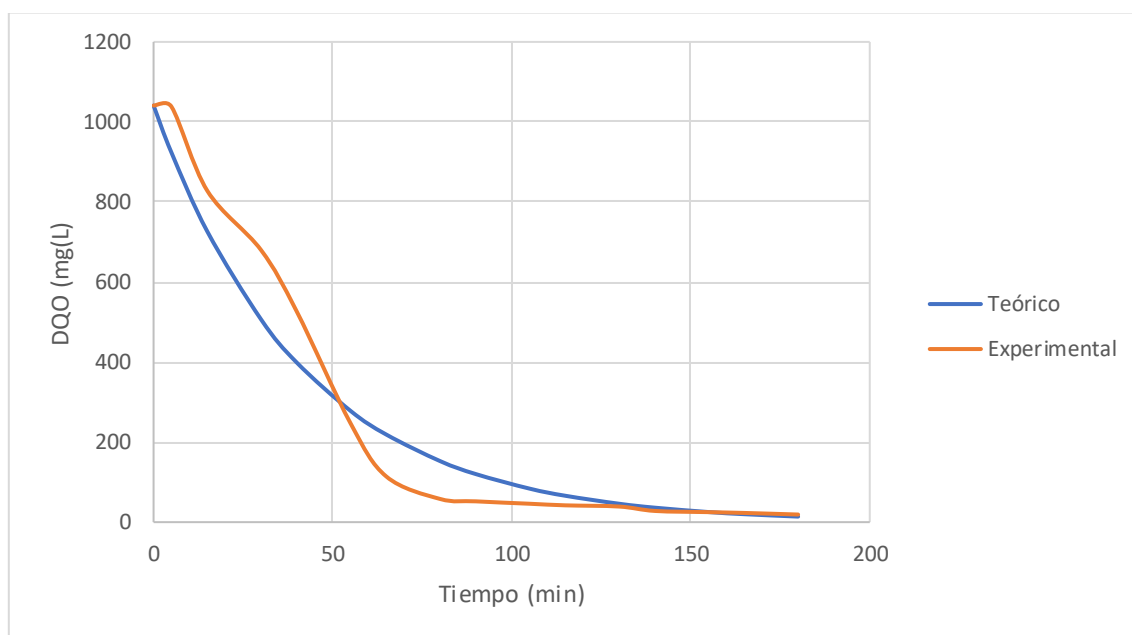


por Chu et al.,(2005), cuyos valores de la constante de velocidad de reacción K (aparente) resultantes se encuentran en el rango de 0.036 a 0.054 min<sup>-1</sup>.

Haciendo uso del valor de K (aparente) hallado, se determinan los valores de DQO (mg/L) teóricos a través del modelo de reacción de primer orden que menciona Fogler (2008) y que se muestra en el apartado 2.2.13 y se comparan con los valores de DQO experimentales, tal como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 10**

*Gráfica DQO (experimental y teórico) (mg/L) vs tiempo (min)*



Tal como se observa en la figura 10, se presenta proximidad entre los resultados experimentales y teóricos, también se observan diferencias que posiblemente se deben a factores externos que influyen en el proceso experimental y que son motivo de interés para estudiar a futuro, por lo que los resultados obtenidos en la presente investigación son importantes para los rangos de valores elegidos en cada variable de estudio ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , tiempo).

#### **4.5 Proceso Foto – Fenton con agua de Ventanilla.**

Se determinaron las características fisicoquímicas de la calidad del agua de Ventanilla tratada con el proceso Foto – Fenton (ver Anexo 06), obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14**

Características fisicoquímicas de la calidad del agua de Ventanilla tratada con el proceso Foto - Fenton

<b>Parámetros</b>	<b>Norma de referencia</b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Resultado</b>
DQO (mg/L)	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Método colorimétrico	352
Turbidez (NTU)	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 2130 B, 23rd. Ed. 2017	Método nefelométrico	0.14
pH	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 4500- H+ B, 23rd. Ed. 2017	Método electrométrico	7.28
STD (mg/L)	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd. Ed. 2017	Sólidos disueltos totales secado a 180° C	21.45
Conductividad (mS/cm)	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part 2510 B. 22nd Ed.2017	Método de conductividad	40.32

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior, se observa una reducción significativa en todos los valores de los parámetros, lo que significa un funcionamiento adecuado del proceso; sin embargo se resalta la diferencia entre los resultados obtenidos para las muestras de agua sintética y agua real cuyos valores finales de DQO (mg/L) son 23 y 352 respectivamente, dicha diferencia se da principalmente a causa de las condiciones de tratamiento que se dieron para ambas muestras, pues las reacciones no establecieron comportamientos similares a causa de contaminantes ajenos no afines al tratamiento.

En relación con el porcentaje de degradación observado en el agua de mar de Ventanilla, se estableció, según los datos presentados en la tabla 16, un índice de degradación del 70%. Este valor concuerda con los hallazgos reportados por Rubio, Chica y Peñuela (2013), quienes indican que para aguas de origen costero o marino se obtienen porcentajes de remoción cercanos al 70%.

En cuanto a la validez del valor final de la demanda química de oxígeno (DQO), se destaca su fiabilidad al compararse con el dato proporcionado por Gonzales (2018), el cual representa el estado inicial previo al derrame de petróleo para el año 2018 que evidencia un valor de 382 mg/L que es mayor al reportado en la presente investigación, lo que significa que se tiene un retorno válido al estado inicial del agua del mar de Ventanilla.

Respecto a los resultados para hidrocarburos totales de petróleo (ver Anexo 05), se muestra en la tabla 15 la variación de la concentración de este contaminante después de la aplicación del tratamiento Foto - Fenton.

**Tabla 15**

Resultados para Hidrocarburos totales de petróleo para agua de Ventanilla tratada con el proceso Foto - Fenton

Ensayo	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)
Hidrocarburos totales de petróleo (C10-C40)	5.6548	<0.01

Los resultados expuestos en la tabla anterior indican un rendimiento altamente eficaz del proceso, evidenciado por la notable reducción de hasta un 99.83% en la concentración de hidrocarburos totales de petróleo en el agua tratada de Ventanilla.

Estos resultados reflejan la eficiencia y efectividad del tratamiento realizado, destacando su capacidad para mitigar de manera significativa la presencia de contaminantes en el medio acuático.

## CONCLUSIONES

1. Se determinó la eficiencia del proceso Foto – Fenton en las aguas contaminadas por hidrocarburos del mar de Ventanilla siendo, esta del 70% respecto a la remoción de la carga contaminante en las muestras procesadas.
2. Se caracterizó fisicoquímicamente la calidad del agua de Ventanilla determinando un valor elevado de DQO de 1174 mg/L, dicho valor excedía en 29.35 veces el valor establecido en el estandar de calidad ambiental.
3. Se establecieron los parámetros de concentración de  $H_2O_2$ , concentración  $Fe^{2+}$  y el tiempo de radiación que lograron un mayor porcentaje de degradación de hidrocarburos en aguas sintéticas cuyo valor fue de 98% y dichos parámetros fueron :  $Fe^{2+}$  de 200 mg/L,  $H_2O_2$  de 4 mg/L y un tiempo de radiación de 3 horas.
4. Se estableció el modelo cinético del proceso que evidenció un crecimiento exponencial de la degradación de los contaminantes respecto al tiempo; además la variación de la concentración de dichos contaminantes en función del tiempo se caracterizó por ser una reacción de pseudo primer orden para un coeficiente  $R^2$ .
5. Se caracterizó la calidad del agua de Ventanilla tratada con el proceso de Foto – Fenton evidenciando una reducción significativa en todos los valores de los parámetros estudiados, respecto al DQO se obtuvo un valor final de 352 mg/L lo que representó un 70% de degradación de contaminantes en el agua de la zona de mar de Ventanilla.

## RECOMENDACIONES

1. Estudiar los efectos de diferentes procesos de oxidación avanzada para comparar los resultados con los obtenidos en el presente estudio
2. Estudiar la aplicabilidad de los modelos determinados en presente estudio a diferentes contextos y contaminantes.
3. Proponer mejoras al modelo cinético establecido en la presente investigación, considerando factores adicionales como la presencia de contaminantes ajenos al análisis inicial.

## REFERENCIAS

- Andrade, F. (2016). *Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros*. Las Palmas de la Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de la Gran Canaria. Obtenido de [https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/11899/4/0699295\\_00000\\_0000.pdf](https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/11899/4/0699295_00000_0000.pdf)
- Asociación Española de Normalización . (2024). *Norma Española UNE-EN ISO 5667-1:2023*. Madrid: UNE.
- Atáres, L. (2021). Fundamentos de cinética química: ecuación cinética. *ETSIAMN*, 1-7. Obtenido de <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12661/18.%20Art%3%a%20docente.%20Fundamentos%20de%20CQ%3b%20ecuaci%3%b3n%20cin%3%a9tica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aznate, L., Cerro, O., & Orozco, A. (2013). *Degradación por fotocátalisis homogénea (Foto-Fenton) de efluentes líquidos contaminados con residuos de fenol*. Cartagena de las Indias: Universidad de Cartagena. Obtenido de <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/59/DEGRADACI%3%93N%20POR%20FOTOCAT%3%81LISIS%20HOMOG%3%89NEA%20%28FOTO-FENTON%29%20DE%20EFLUENTES%20L%3%8dQUIDOS%20CONTAMINADOS%20CON%20RESI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- BBC . (2010). Derrame de petroleo. *NEWS MUNDO*.
- Bejar Bejar, L. P., & Rodríguez Hercilla, A. L. (2022). *Efectividad de la aplicación del proceso fot-fenton en la decoloración del colorante textil verde ácido 25 en medios acuosos a escala de laboratorio*. Arequipa.
- Belles, R. (2018). *Estudio del proceso Foto-Fenton con dosificación de H2O2 para el tratamiento de aguas residuales con paracetamol*. Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/120734/TFG\\_Ricard\\_Bell%3%A9s\\_I\\_Canals.pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/120734/TFG_Ricard_Bell%3%A9s_I_Canals.pdf?sequence=1)

Castillo, S. (2015). *Cinètica Quimica*.

Centeno, G., Labrador, H., Lara, G., & Jimenez, Y. (2021). Eficiencia en la reducción de materia orgánica petrolera combinando procesos de oxidación avanzada solar y reactor biológico de una PTAR. *Ingeniería del agua*, 25(4), 257-270. Obtenido de <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/14874/14472>

Chu, W., Kwan, K., Chan, S., & Kam, S. (2005). Un estudio del modelo cinético de reacción del 2,4 diclorofenol. transformación por oxidación tipo foto-fenton. *Journal of Hazardous Materials*, 119-126.

Conde, I. (2016). *Degradación de pirazinamida mediante el proceso foto-fenton utilizando FeC2O4 como fuente de hierro a pH 3,4.5 y 6*. San Nicolas de los Garza, México: Universidad autónoma de Nuevo León. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/4232/1/1080253758.pdf>

Cuesta, H. (2019). *Procesos avanzados de oxidación aplicados al tratamiento de las aguas residuales de la industria petroquímica: Fenton y Foto fenton*. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia -UNAD. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/28100/%20%09hcuetab.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

De la Cruz, N. (2013). *Estudio de la eliminación de contaminantes emergentes en aguas mediante procesos de oxidación avanzados*. Barcelona : Universidad de Barcelona .

Decreto Supremo 004-2017. (2017). *Estandares de calidad Ambiental (ECA) para Agua*. Lima. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>

Defensoria del pueblo. (2022). *Derrame de petroleo en la refineria La Pampilla: Recomendaciones frente a un desastre ambiental que pudo evitarse*. Lima: Biblioteca Nacional del Perú. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3126171/Informe-Derrame-Ventanilla.pdf.pdf?v=1653347237>

- DIGESA. (2011). *Procedimiento de toma de muestra del agua de mar en playas de baño y recreación*. Lima. Obtenido de [http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Gu%C3%ADa%20Tecnica%20Proced\\_Tom\\_Muestras\\_Playas.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Gu%C3%ADa%20Tecnica%20Proced_Tom_Muestras_Playas.pdf)
- Domenech, X., Jardim, W., & Litter, M. (2021). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes . 1-26.
- Fogler, H. (2008). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. Pearson Education.
- García, P., Fresno, F., & Lefevre, C. (2020). Synergy effect between photocatalysis and heterogeneous photo fenton catalysis on Ti- doped LaFeO<sub>3</sub> perovskite for high efficiency light- assisted water treatment. *Catalysis Science & Technology*, 1299-1310. Obtenido de <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/cy/c9cy02269d>
- Gonzales, E. (2018). *Microburbujas de aire para el tratamiento del agua residual industrial de la refinería La Pampilla, 2018*. Lima: Universidad Cesar Vallejo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/40219>
- Leon, J., Medina, C., & Segovia, E. (2020). Aplicación del método Foto- Fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea. *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, 6(3), 785-801. doi:<http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1316>
- Liou, M., Lu, M., & Nan, J. (2004). Oxidation of TNT by photo-Fenton process. *Chemosphere*, 1107-1114. Obtenido de <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.07.053>
- Marín, M., & Clemente, A. (2020). Optimización del proceso sono-foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales usando un diseño central compuesto. *Rev. P+L*, 15(2), 22-45. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552020000200024](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552020000200024)
- Medina, V. (2018). *Aplicación del proceso fenton para degradar aguas residuales del camal de Chota*. Chota: Universidad Nacional Autónoma de Chota.



- Obtenido de <https://repositorio.unach.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14142/292/Fenton.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MINAM. (2023). *Efectos del derrame de petróleo en Ventanilla aún no están resueltos*. Lima: Gobierno del Perú. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/688398-minam-efectos-del-derrame-de-petroleo-en-ventanilla-aun-no-estan-resueltos>
- Muños, P. (2018). *Manual técnico de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/349737485\\_Manual\\_Tecnico\\_sobre\\_Procesos\\_de\\_Oxidacion\\_Avanzada\\_aplicados\\_al\\_Tratamiento\\_de\\_Aguas\\_Residuales\\_Industriales](https://www.researchgate.net/publication/349737485_Manual_Tecnico_sobre_Procesos_de_Oxidacion_Avanzada_aplicados_al_Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Industriales)
- Natura Responde . (18 de mayo de 2022). *NaturaResponde.com*. Obtenido de [www.naturaresponde.com/cuales-son-las-principales-caracteristicas-del-mar-peruano](http://www.naturaresponde.com/cuales-son-las-principales-caracteristicas-del-mar-peruano)
- Norma Española UNE-EN ISO 566 7-1:2023 . (2023). *Water quality*.
- Perez, Y., López, S., Rodríguez, A., & Ramos, S. (2019). Evaluación de impacto socioambiental, por derrame de petróleo de un ducto en Comalcalco, Tabasco. *Journal of Basic Sciences*, 5(15), 134-152. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/372991282\\_Evaluacion\\_de\\_impacto\\_socioambiental\\_por\\_derrame\\_de\\_petroleo\\_de\\_un\\_ducto\\_en\\_Comalcalco\\_Tabasco](https://www.researchgate.net/publication/372991282_Evaluacion_de_impacto_socioambiental_por_derrame_de_petroleo_de_un_ducto_en_Comalcalco_Tabasco)
- Rodríguez, M. (2017). Cinética de las reacciones homogéneas. Obtenido de <https://fcen.uncuyo.edu.ar/catedras/unidad-110.pdf>
- Romero, J., & Castañeda, A. (2014). *Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria de petróleo*. Escuela colombiana de ingeniería "Julio Garavito". Obtenido de [https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/84/Casta%  
c3%  
b1eda%20Jimenez%2c%20Amparo%20Carolina%20-  
%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/84/Casta%c3%b1eda%20Jimenez%2c%20Amparo%20Carolina%20-%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Rubio, A., Chica, E., & Peñuela, G. (2018). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas. *Ingeniería y competitividad*, 16(2), 211-223. doi:[https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria\\_y\\_competitividad/issue/view/380](https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/issue/view/380)
- Sociedad Peruana de Derecho Ambiental. (2022). Derrame de petróleo en Ventanilla: sus impactos ambientales en el mar y especies. *MOSAICO PURUS*. Obtenido de <https://www.actualidadambiental.pe/derrame-de-petroleo-en-ventanilla-sus-impactos-ambientales-en-el-mar-y-especies/>
- Sondos, D., Nasr, B., Moustafa, Z., & Ahmed, B. (2019). Degradation of Diallyl Phtalate (DAP) by Fenton Oxidation: Mechanistic and Kinetic Studies . *MDPI*, 1-15.
- Statgrafic. (2024).
- Tapia, M. (2016). *Tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos por medio de procesos de oxidación avanzada y biofiltros*. Quito: Universidad Central de Ecuador. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/0e423776-d91d-48e1-bb39-064d2d7b5d6a>
- Tinoco, D., & Torres, F. (2018). *Estudio experimental de la degradación de hidrocarburos en aguas contaminadas con diesel y gasolina mediante procesos avanzados de oxidación*. Guayaquil: ESPOL. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54973>
- Walling, S., Um, W., Corkhill, C., & Hyatt, N. (2021). Fenton and Fenton-like wet oxidation for degradation and destruction of organic radioactive wastes. *npj nature partner journals*, 5(50), 1-50. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41529-021-00192-3>

## ANEXOS

### Anexo 1 Caracterización de Muestras



INFORME DE ENSAYO N° 7094015  
VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : Percy Franco Lastrera  
Referencia : Muestra de agua sintética  
Proyecto : Caracterización de muestra de agua sintética

#### I. Datos de la muestra

Plan de Muestreo : Realizado por Cliente  
Cantidad de Muestras : 1  
Producto : Agua  
Condición de la Muestra : Buen estado  
Codigo ICSM : 7094015  
Fecha de Recepción : 01/07/2023  
Fecha de Ensayo : 01/07/2023  
Fecha de Emisión : 04/07/2023

#### II. Método de Referencia

Parámetros	Norma de referencia	Título
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method
Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 23rd. Ed. 2017	Turbidity. Nephelometric Method
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 23rd. Ed. 2017	pH Value. Electrometric Method
TDS	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd. Ed. 2017	Solids.Total Dissolved Solids Dried at 180°C
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B. 22ndEd.2017	Conductivity. Laboratory Method

SIGLAS:"EPA": U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.  
"ASTM" American Society for Testing and Materials  
"SM": Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA.

Parámetros	Unidad	L.C.M.	Código de Laboratorio
			Código de Cliente
			Tipo de Producto
			Resultados
DQO	mg/L	5	7094015.01
Turbidez	NTU	0.25	CM
pH	Unidad pH	0.01	AguaResidual
TDS	mg/L	6	
Conductividad	µS/cm	0.01	

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M.= Límite de detención del método, "<"= Menor que el L.C.M., indicado.

**Nota:**

Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización del ICSM S.A.C.



Ing. José Luis Inca Gomez CIP : 219478  
 Jefe de División de Investigación y Desarrollo  
 Instituto Científico Sostenible Minero S.A.C.

**\*\* FIN DEL INFORME \*\***

Nombre del Cliente : Percy Franco Lastrera  
Referencia : Caracterización Agua de Mar de Ventanilla  
Proyecto : Aplicación del proceso Foto - Fenton en aguas contaminadas por hidrocarburos en el mar de ventanilla

**I. Datos de la muestra**

Plan de Muestreo : Realizado por Cliente  
Cantidad de Muestras : 1  
Producto : Agua  
Condición de la Muestra : Buen estado  
Codigo ICSM : 7094174  
Fecha de Recepción : 04/10/2023  
Fecha de Ensayo : 04/10/2023  
Fecha de Emisión : 04/10/2023

**II. Método de Referencia**

Parámetros	Norma de referencia	Título
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method
Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 23rd. Ed. 2017	Turbidity. Nephelometric Method
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500- H+ B, 23rd. Ed. 2017	pH Value. Electrometric Method
TDS	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd. Ed. 2017	Solids.Total Dissolved Solids Dried at 180°C
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B. 22nd Ed.2017	Conductivity. Laboratory Method

SIGLAS:"EPA": U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.

"ASTM" American Society for Testing and Materials

"SM": Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA.

### III. Resultados

Parámetros	Unidad	L.C.M.	Código de Laboratorio
			7094174.01
			Código de Cliente
			M.Inicial
			Tipo de Producto
			AguaResidual
			Resultados
DQO	mg/L	5	1,174
Turbidez	NTU	0.25	0.39
pH	Unidad pH	0.01	8.16
TDS	mg/L	6	32,300
Conductividad	µS/cm	0.01	51,400

Legenda: L.C.M. = Límite de cuanficación del método, L.D.M.= Límite de detención del método, "<"= Menor que el L.C.M., indicado.

Nota:

Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización del ICSM S.A.C.



Ing. José Luis Inca Gomez CIP : 219478  
 Jefe de División de Investigación y Desarrollo  
 Instituto Científico Sostenible Minero S.A.C.

## Anexo 2 Prueba de DQO



INFORME DE ENSAYO N° 7094014  
VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : Percy Franco Lastrera  
Referencia : Agua de Mar  
Proyecto : Aplicación del proceso Foto - Fenton en aguas contaminadas por hidrocarburos en el mar de ventanilla

### I. Datos de la muestra

Plan de Muestreo : Realizado por Cliente  
Cantidad de Muestras : 60  
Producto : Agua  
Condición de la Muestra : Buen estado  
Codigo ICSM : 7094014  
Fecha de Recepción : 01/07/2023  
Fecha de Ensayo : 01/07/2023  
Fecha de Emisión : 04/07/2023

### II. Método de Referencia

Parámetros	Norma de referencia	Título
Demanda Química de Oxígeno	SM Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017

SIGLAS: "EPA": U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.  
"ASTM": American Society for Testing and Materials  
"SM": Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA.

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.01	7094014.02	7094014.03	7094014.04	7094014.05	7094014.06
	Código de Cliente		Exp.1 t1	Exp.1 t2	Exp.1 t3	Exp.1 t4	Exp.1 t5	Exp.1 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	Unidad	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	520	513	239	123	98	74

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.07	7094014.08	7094014.09	7094014.10	7094014.11	7094014.12
	Código de Cliente		Exp.2 t1	Exp.2 t2	Exp.2 t3	Exp.2 t4	Exp.2 t5	Exp.2 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	Unidad	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	613	547	304	257	175	94

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.13	7094014.14	7094014.15	7094014.16	7094014.17	7094014.18
	Código de Cliente		Exp.3 t1	Exp.3 t2	Exp.3 t3	Exp.3 t4	Exp.3 t5	Exp.3 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	Unidad	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	134	129	105	98	83	68

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.19	7094014.20	7094014.21	7094014.22	7094014.23	7094014.24
	Código de Cliente		Exp.4 t1	Exp.4 t2	Exp.4 t3	Exp.4 t4	Exp.4 t5	Exp.4 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	Unidad	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	726	690	629	617	570	508



Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.25	7094014.26	7094014.27	7094014.28	7094014.29	7094014.30
	Código de Cliente		Exp.5 t1	Exp.5 t2	Exp.5 t3	Exp.5 t4	Exp.5 t5	Exp.5 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	586	547	525	495	486	472

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.31	7094014.32	7094014.33	7094014.34	7094014.35	7094014.36
	Código de Cliente		Exp.6 t1	Exp.6 t2	Exp.6 t3	Exp.6 t4	Exp.6 t5	Exp.6 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	672	654	648	617	594	587

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.37	7094014.38	7094014.39	7094014.40	7094014.41	7094014.42
	Código de Cliente		Exp.7 t1	Exp.7 t2	Exp.7 t3	Exp.7 t4	Exp.7 t5	Exp.7 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	75	64	57	34	23	21

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.43	7094014.44	7094014.45	7094014.46	7094014.47	7094014.48
	Código de Cliente		Exp.8 t1	Exp.8 t2	Exp.8 t3	Exp.8 t4	Exp.8 t5	Exp.8 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	86	75	72	65	61	58

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.49	7094014.50	7094014.51	7094014.52	7094014.53	7094014.54
	Código de Cliente		Exp.9 t1	Exp.9 t2	Exp.9 t3	Exp.9 t4	Exp.9 t5	Exp.9 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	74	68	64	58	52	46

Parámetros	Código de Laboratorio		7094014.55	7094014.56	7094014.57	7094014.58	7094014.59	7094014.60
	Código de Cliente		Exp.10 t1	Exp.10 t2	Exp.10 t3	Exp.10 t4	Exp.10 t5	Exp.10 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	76	70	68	61	56	48

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M.= Límite de detención del método, "<"= Menor que el L.C.M., indicado.

**Nota:**

Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización del ICSM S.A.C.



Ing. José Luis Inca Gomez CIP : 219478  
 Jefe de División de Investigación y Desarrollo  
 Instituto Científico Sostenible Minero S.A.C.

**\*\* FIN DEL INFORME \*\***

## Anexo 3 Prueba de DQO-Replica



INFORME DE ENSAYO N° 7094014  
VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : Percy Franco Lastrera  
Referencia : Agua Sintética  
Proyecto : Aplicación del proceso Foto - Fenton en aguas contaminadas por hidrocarburos en el mar de ventanilla

### I. Datos de la muestra

Plan de Muestreo : Realizado por Cliente  
Cantidad de Muestras : 60  
Producto : Agua  
Condición de la Muestra : Buen estado  
Codigo ICSM : 7094014

Fecha de Recepción : 01/07/2023  
Fecha de Ensayo : 01/07/2023  
Fecha de Emisión : 04/07/2023

### II. Método de Referencia

Parámetros	Norma de referencia	Título
Demanda Química de Oxígeno	SM Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017

SIGLAS:"EPA": U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.  
"ASTM" American Society for Testing and Materials  
"SM": Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA.

### III. Resultados

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.01	7094021.02	7094021.03	7094021.04	7094021.05	7094021.06
	Código de Cliente		Exp.1 t1	Exp.1 t2	Exp.1 t3	Exp.1 t4	Exp.1 t5	Exp.1 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	Unidad	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	505	496	217	110	84	76

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.07	7094021.08	7094021.09	7094021.10	7094021.11	7094021.12
	Código de Cliente		Exp.2 t1	Exp.2 t2	Exp.2 t3	Exp.2 t4	Exp.2 t5	Exp.2 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	Unidad	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	598	526	287	245	142	91

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.13	7094021.14	7094021.15	7094021.16	7094021.17	7094021.18
	Código de Cliente		Exp.3 t1	Exp.3 t2	Exp.3 t3	Exp.3 t4	Exp.3 t5	Exp.3 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	Unidad	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	128	117	93	87	76	63

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.19	7094021.20	7094021.21	7094021.22	7094021.23	7094021.24
	Código de Cliente		Exp.4 t1	Exp.4 t2	Exp.4 t3	Exp.4 t4	Exp.4 t5	Exp.4 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	Unidad	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	695	678	604	598	562	497

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.25	7094021.26	7094021.27	7094021.28	7094021.29	7094021.30
	Código de Cliente		Exp.5 t1	Exp.5 t2	Exp.5 t3	Exp.5 t4	Exp.5 t5	Exp.5 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	564	549	528	481	462	453

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.31	7094021.32	7094021.33	7094021.34	7094021.35	7094021.36
	Código de Cliente		Exp.6 t1	Exp.6 t2	Exp.6 t3	Exp.6 t4	Exp.6 t5	Exp.6 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	658	642	628	605	597	572

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.37	7094021.38	7094021.39	7094021.40	7094021.41	7094021.42
	Código de Cliente		Exp.7 t1	Exp.7 t2	Exp.7 t3	Exp.7 t4	Exp.7 t5	Exp.7 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	77	62	59	38	29	24

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.43	7094021.44	7094021.45	7094021.46	7094021.47	7094021.48
	Código de Cliente		Exp.8 t1	Exp.8 t2	Exp.8 t3	Exp.8 t4	Exp.8 t5	Exp.8 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	84	76	70	67	58	62

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.49	7094021.50	7094021.51	7094021.52	7094021.53	7094021.54
	Código de Cliente		Exp.9 t1	Exp.9 t2	Exp.9 t3	Exp.9 t4	Exp.9 t5	Exp.9 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	78	65	59	54	50	53

Parámetros	Código de Laboratorio		7094021.55	7094021.56	7094021.57	7094021.58	7094021.59	7094021.60
	Código de Cliente		Exp.10 t1	Exp.10 t2	Exp.10 t3	Exp.10 t4	Exp.10 t5	Exp.10 t6
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	74	71	67	59	57	45

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M.= Límite de detención del método, "<"= Menor que el L.C.M., indicado.

Nota:

Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización del ICSM S.A.C.



Ing. José Luis Inca Gomez CIP : 219478  
 Jefe de División de Investigación y Desarrollo  
 Instituto Científico Sostenible Minero S.A.C.

**\*\* FIN DEL INFORME \*\***

## Anexo 4 Resultados para Modelo Cinético



INFORME DE ENSAYO N° 7094093  
VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : Percy Franco Lastrera  
Referencia : Agua Sintética  
Proyecto : Aplicación del proceso Foto - Fenton en aguas contaminadas por hidrocarburos en el mar de ventanilla

### I. Datos de la muestra

Plan de Muestreo : Realizado por Cliente  
Cantidad de Muestras : 16  
Producto : Agua  
Condición de la Muestra : Buen estado  
Codigo ICSM : 7094093

Fecha de Recepción : 15/08/2023  
Fecha de Ensayo : 15/08/2023  
Fecha de Emisión : 17/08/2023

### II. Método de Referencia

Parámetros	Norma de referencia	Título
Demanda Química de Oxígeno	SM Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017

SIGLAS:"EPA": U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.  
"ASTM" American Society for Testing and Materials  
"SM": Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA.

### III. Resultados

Parámetros	Código de Laboratorio		7094093.01
	Código de Cliente		M.Inicial
	Tipo de Producto		AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados
DQO	mg/L	5	1038

Parámetros	Código de Laboratorio		7094093.02	7094093.03	7094093.04	7094093.05	7094093.06
	Código de Cliente		Exp.Opt t1	Exp.Opt t2	Exp.Opt t3	Exp.Opt t4	Exp.Opt t5
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	828	680	526	247	114

Parámetros	Código de Laboratorio		7094093.07	7094093.08	7094093.09	7094093.10	7094093.11
	Código de Cliente		Exp.Opt t6	Exp.Opt t7	Exp.Opt t8	Exp.Opt t9	Exp.Opt t10
	Tipo de Producto		AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual	AguaResidual
	Unidad	L.C.M.	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
DQO	mg/L	5	58	52	46	42	39



Parámetros	Código de Laboratorio		7094093.12	7094093.13	7094093.14	7094093.15	7094093.16
	Código de Cliente		Exp.Opt t11	Exp.Opt t12	Exp.Opt t13	Exp.Opt t14	Exp.Opt t15
Unidad	Tipo de Producto		AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados	AguaResidual Resultados
	L.C.M.						
DQO	mg/L	5	34	28	25	23	19

Legenda: L.C.M. = Límite de cuanficación del método, L.D.M.= Límite de detención del método, "<"= Menor que el L.C.M., indicado.

Nota:

Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización del ICSM S.A.C.



Ing. José Luis Inca Gomez CIP : 219478  
 Jefe de División de Investigación y Desarrollo  
 Instituto Científico Sostenible Minero S.A.C.

**\*\* FIN DEL INFORME\*\***

## Anexo 5 Ensayo Caracterización Hidrocarburos Totales Agua de Ventanilla



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE - 096



### INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-21854

N° Id.: 0000090019

#### I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: INSTITUTO CIENTIFICO SOSTENIBLE MINERO S.A.C.
2.-DIRECCIÓN	: MZA. J LOTE. 6 DPTO. LIMA Z.I. ASOC. PARQUE INDUSTRIAL EL ASESOR LIMA - LIMA - ATE
3.-PROYECTO	: APLICACIÓN DEL PROCESO FOTO-FENTON EN AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS EN EL MAR DE VENTANILLA
4.-PROCEDENCIA	: MAR DE VENTANILLA, LIMA, PERÚ.
5.-SOLICITANTE	: INSTITUTO CIENTIFICO SOSTENIBLE MINERO S.A.C.
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 000005325-2023-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2023-10-11

#### II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Agua Salina
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 2
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2023-10-04
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2023-10-04 al 2023-10-11

Liz Y. Quispe Quispe  
**Jefe de Laboratorio**  
CIP N° 211662



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia.

📍 **SEDE PRINCIPAL**  
Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0756  
Col.: 977 516 675 / 940 598 572

📍 **SEDE ZARUMILLA**  
Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0636  
Col.: 937 111 379 / 940 598 572

📍 **SEDE AREQUIPA**  
COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
Arequipa  
Telf.: (+054) 616 843  
Col.: 932 646 642 / 940 598 572

📍 **SEDE PIURA**  
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
Castilla - Piura  
Telf.: (+073) 542 335  
Col.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 1 de 3

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-21854**

N° Id.: 000090019

**III. MÉTODOS Y REFERENCIAS**

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (*)	EPA Method 8015 C, Rev. 3. 2007.	Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography.

\*EPA\* : U. S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemicals Analysis

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-21854**

N° Id.: 000090019

**IV. RESULTADOS**

ITEM	1	2			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-23-68384	M-23-68385			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	AT-01	DT-01			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	Agua Salina	Agua Salina			
SUB PRODUCTO:	Agua de Mar	Agua de Mar			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA				
FECHA y HORA DE MUESTREO :	04-10-2023 08:00	04-10-2023 11:00			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (*)	mg/L	0,0050	0,0100	5,6548	<0,0100

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "&lt;=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "&lt;=" Menor que el L.D.M.

**V. OBSERVACIONES**

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

## Anexo 6 Ensayo Caracterización de Muestra Tratada



INFORME DE ENSAYO N° 7094175  
VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : Percy Franco Lastrera  
Referencia : Análisis Post tratamiento del Agua de Mar de Ventanilla  
Proyecto : Aplicación del proceso Foto - Fenton en aguas contaminadas por hidrocarburos en el mar de ventanilla

### I. Datos de la muestra

Plan de Muestreo : Realizado por Cliente  
Cantidad de Muestras : 1  
Producto : Agua  
Condición de la Muestra : Buen estado  
Codigo ICSM : 7094175  
Fecha de Recepción : 04/10/2023  
Fecha de Ensayo : 04/10/2023  
Fecha de Emisión : 04/10/2023

### II. Método de Referencia

Parámetros	Norma de referencia	Título
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method
Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 23rd. Ed. 2017	Turbidity. Nephelometric Method
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500- H+ B, 23rd. Ed. 2017	pH Value. Electrometric Method
TDS	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd. Ed. 2017	Solids.Total Dissolved Solids Dried at 180°C
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B. 22nd Ed.2017	Conductivity. Laboratory Method

SIGLAS: "EPA": U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.  
"ASTM" American Society for Testing and Materials  
"SM": Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA.

### III. Resultados

Parámetros	Unidad	L.C.M.	Código de Laboratorio
			7094175.01
			Código de Cliente
			M.Post.Tratamiento
			Tipo de Producto
			AguaResidual
			Resultados
DQO	mg/L	5	352
Turbidez	NTU	0.25	0.14
pH	Unidad pH	0.01	7.28
TDS	mg/L	6	21,425
Conductividad	µS/cm	0.01	40,328

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuanficación del método, L.D.M.= Límite de detención del método, "<"= Menor que el L.C.M., indicado.

Nota:

Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización del ICSM S.A.C.



Ing. José Luis Inca Gomez CIP : 219478  
 Jefe de División de Investigación y Desarrollo  
 Instituto Científico Sostenible Minero S.A.C.

**\*\* FIN DEL INFORME**

## Anexo 7 Registro Fotográfico Muestreo

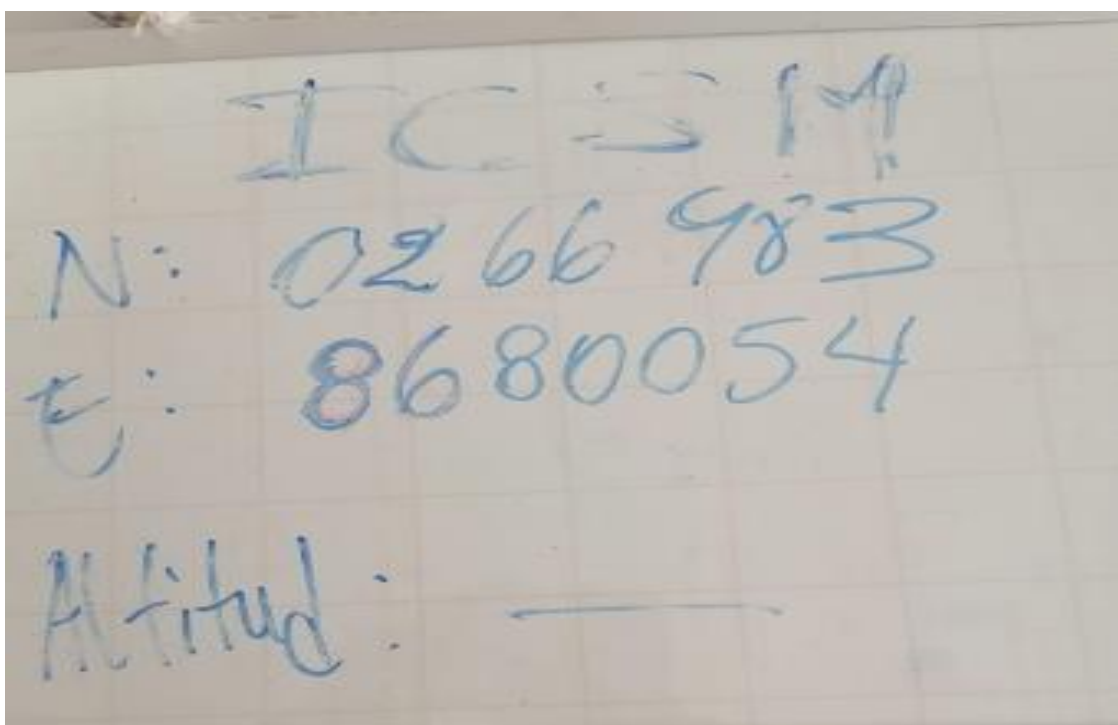
**Figura 01.**

Lugar de muestreo



**Figura 02.**

Lugar de muestreo



## Anexo 8 Registro Fotográfico Preparación de muestra sintética

**Figura 03.**

Preparación de muestra sintética



**Figura 04.**

Preparación de muestra sintética



**Figura 05.**  
Preparación de muestra sintética



**Figura 06.**  
Caracterización de la muestra sintética





## Anexo 9 Registro Fotográfico Caracterización de Muestra Sintética

**Figura 07.**

Caracterización de la muestra sintética

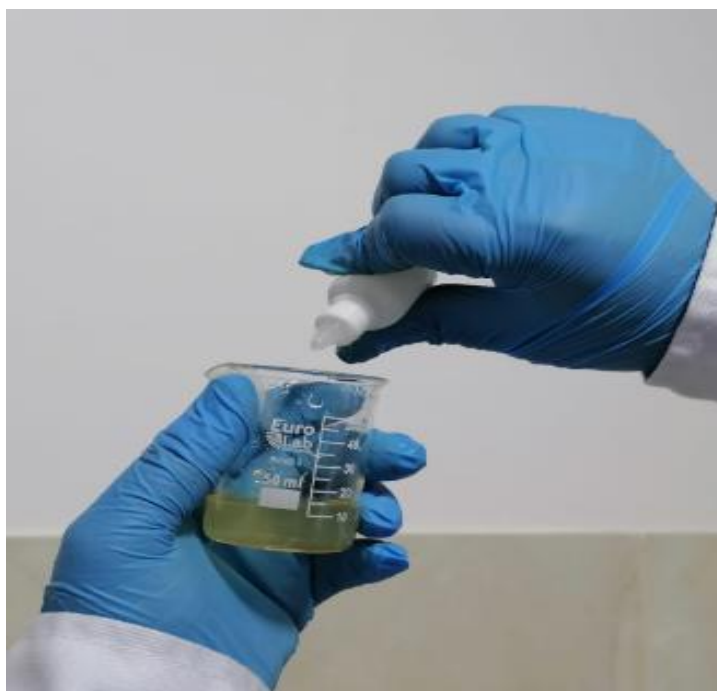


**Figura 08.**

Agregar una a 2 gotas de  $H_2SO_4$  para llegar a un pH ácido de 3



**Figura 09.** Agregar una a 2 gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para llegar a un PH ácido a 3



**Figura 10.** Agregar el  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  +  $\text{H}_2\text{O}_2$  a concentraciones establecidas



**Figura 11.**

Agregar el  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  +  $\text{H}_2\text{O}_2$  a concentraciones establecidas



**Figura 12.**

Agregar el  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  +  $\text{H}_2\text{O}_2$  a concentraciones establecidas



## Anexo 10 Registro Fotográfico Pruebas de Proceso Foto Fenton

**Figura 13.**  
Irradiación UV



**Figura 14.**  
Irradiación UV



**Figura 15.**

Sacar alícuotas para (1 hora cada 10 min, 2 horas cada 20 min, 3 horas cada 30 min) según el tiempo establecido



**Figura 16.**

Sacar alícuotas para (1 hora cada 10 min, 2 horas cada 20 min, 3 horas cada 30 min) según el tiempo establecido



**Figura 17.**

Sacar alícuotas para (1 hora cada 10 min, 2 horas cada 20 min, 3 horas cada 30 min) según el tiempo establecido

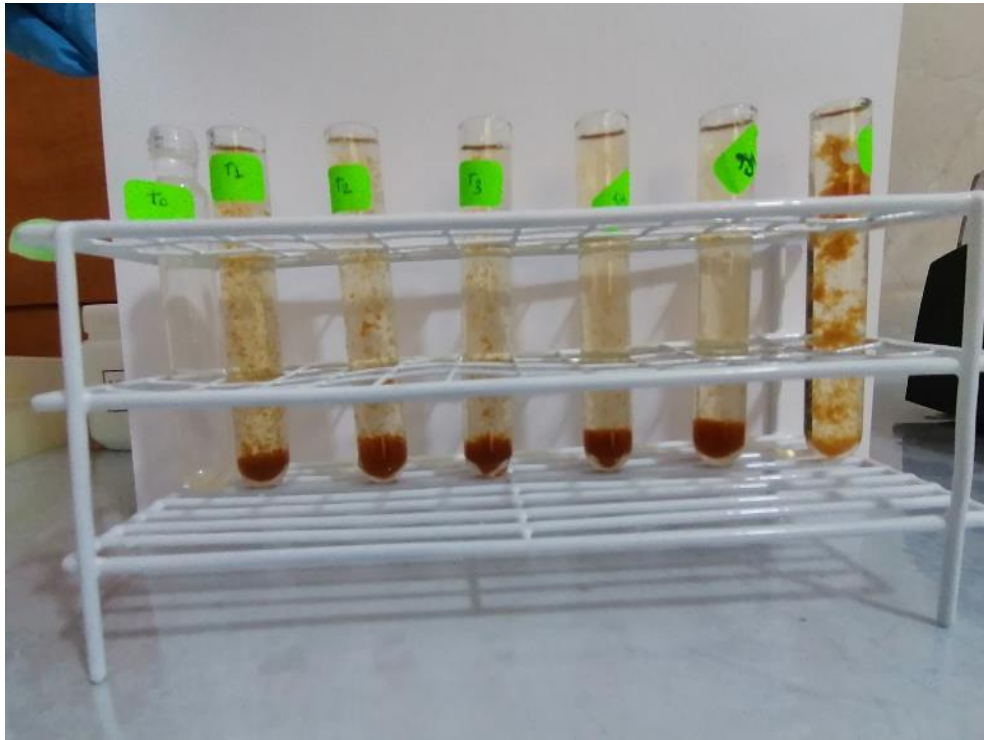


**Figura 18.**

Para detener la reacción se añade una gota de Na(OH)



**Figura 19.**  
Llevar a la centrifugadora para la sedimentación



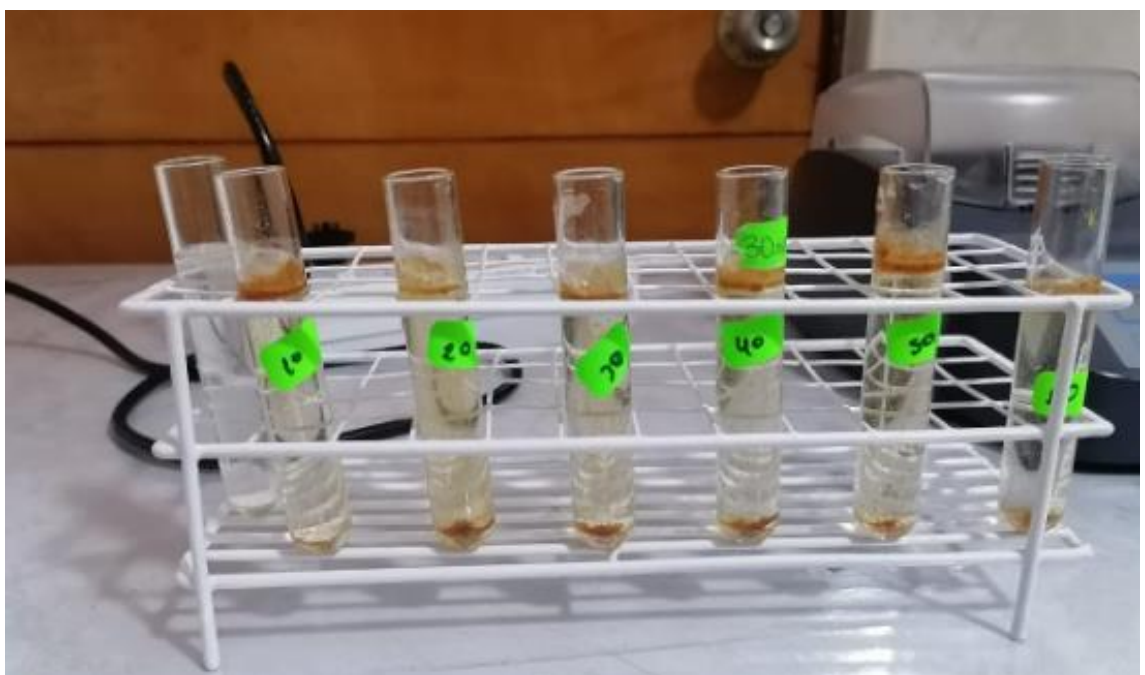
**Figura 20.**  
Llevar a la centrifugadora para la sedimentación



**Figura 21.**  
Llevar a la centrifugadora para la sedimentación

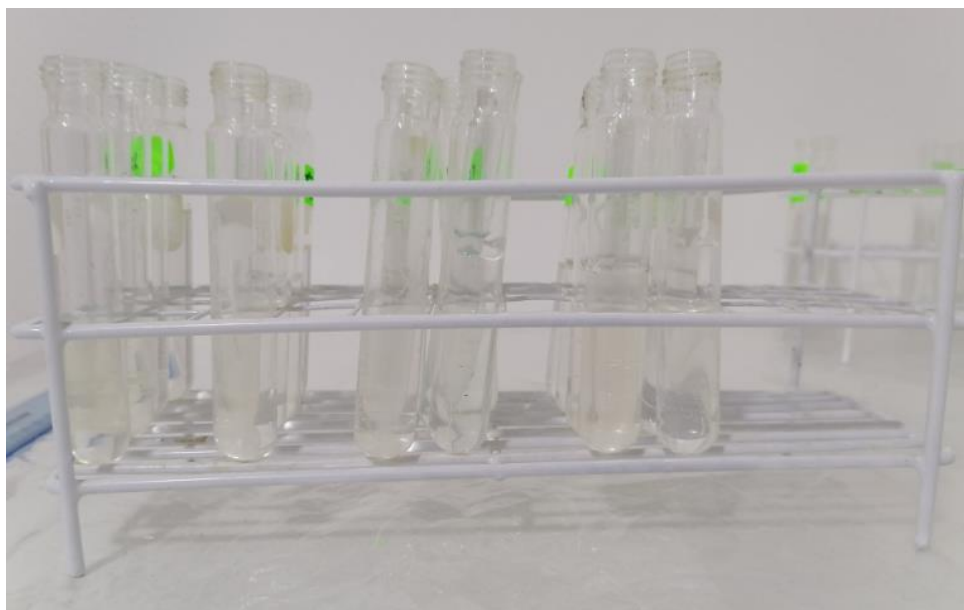


**Figura 22.**  
Llevar a la centrifugadora para la sedimentación





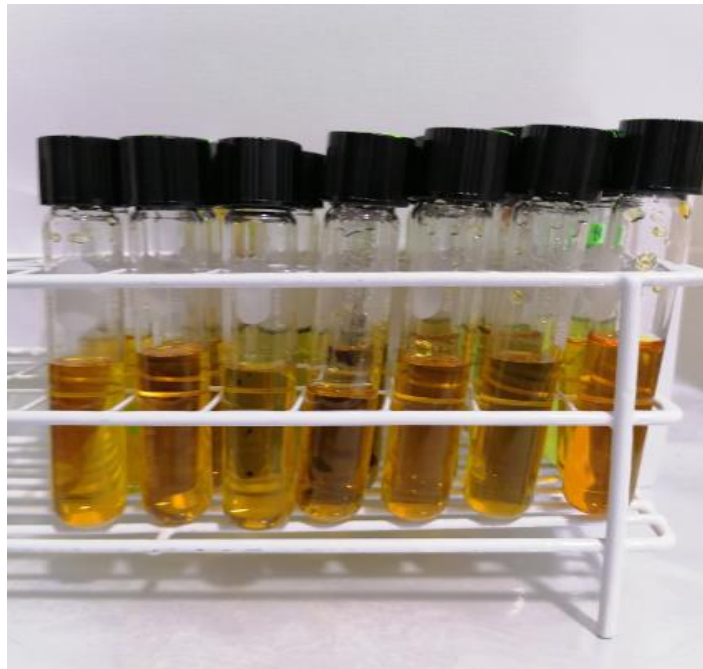
**Figura 23.**  
Filtrado



**Figura 24.**  
Filtrado



**Figura 25.**  
Agregar reactivo DQO y llevar al termoreactor



**Figura 26.**  
Agregar reactivo DQO y llevar al termoreactor



## Anexo 11 Registro Fotográfico Caracterización de Muestra Tratada

**Figura 27.**  
Medir DQO



**Figura 28.**  
Medir DQO



**Figura 29.**  
Equipos GPS



**Figura 30.**  
Equipos Colorímetro



**Figura 31.**  
Equipos Turbidímetro



**Figura 32.**  
Equipos Multiparámetro



**Figura 33.**  
Equipos Centrifugadora



**Figura 34.**  
Equipos Colorímetro



## Anexo 12 Registro Fotográfico Equipos Conectados para Proceso Foto Fenton

Figura 35.  
Reactor

