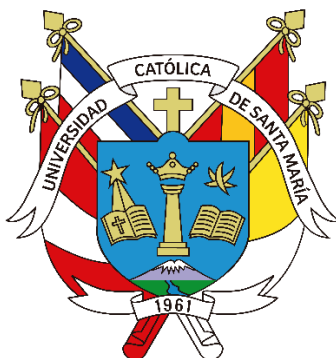


Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Aplicación de un Sistema de Electrocoagulación a Escala Laboratorio como
Alternativa de Remoción de Hidrocarburos Presentes en Agua de Mar
Contaminada con Crudo de Petróleo de Repsol, Lima – Perú, 2022**

Tesis presentada por la Bachiller:

Arroyo Pariente, Fairuz

ORCID: 0000-0002-5157-0690

Carlos Meza, Yanira Patricia

ORCID: 0009-0004-0095-8806

para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor (a):

M. Sc. Ing. Paredes Zavala, Joshelyn Mariangela

ORCID: 0000-0003-0982-7875

Arequipa - Perú

2024

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 05 de Mayo del 2024

Dictamen: 006432-C-EPIA-2024

Visto el borrador del expediente 006432, presentado por:

2013220372 - ARROYO PARIENTE FAIRUZ

2013242922 - CARLOS MEZA YANIRA PATRICIA

Titulado:

APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN A ESCALA LABORATORIO COMO ALTERNATIVA DE REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS PRESENTES EN AGUA DE MAR CONTAMINADA CON CRUDO DE PETRÓLEO DE REPSOL, LIMA ? PERÚ, 2022

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**29727348 - LAZARTE ARREDONDO SONIA
DICTAMINADOR**



**43238145 - BENEGAS LLANOS ROSARIO CAROLINA
DICTAMINADOR**



**43606549 - CARDENAS PILLCO BERLY EDINSSON
DICTAMINADOR**



Aplicación de un Sistema de Electrocoagulación a Escala Laboratorio como Alternativa de Remoción de Hidrocarburos Presentes en Agua de Mar Contaminada con Crudo de Petróleo de Repsol, Lima – Perú, 202

ORIGINALITY REPORT

4%

SIMILARITY INDEX

5%

INTERNET SOURCES

2%

PUBLICATIONS

3%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1 repositorio.ucv.edu.pe 1%
Internet Source

2 tesis.ucsm.edu.pe 1%
Internet Source

3 repositorio.unac.edu.pe 1%
Internet Source

4 cideteq.repositorioinstitucional.mx 1%
Internet Source

Exclude quotes Off

Exclude matches < 1%

Exclude bibliography Off

Dedicatoria

*A Dios, por el regalo de la existencia y por la hermosa creación de este Universo
y todas las coincidencias exorbitantemente bellas durante este viaje.*

*A mis amados padres, Nancy & Antonio por dedicarme años de su juventud, amor y
brindarme la mejor calidad de vida.*

A mis abuelitos Oli & Nico por sus cuidados.

Fairuz Arroyo Pariente

*Nunca pensé que llegaría el día en que debería redactar la dedicatoria de mi tesis. Está
claro que fue uno de los momentos más emocionantes de mi vida. Sin duda alguna puedo
decir que los aprendizajes obtenidos en este proceso marcaron mi camino de hoy en
adelante. El mayor agradecimiento siempre será para mi familia.*

*A mis padres y hermanos por ser los más grandes pilares y soportes en mi vida siempre el
amor y el apoyo de parte de ustedes fue incondicional.*

*A mi pequeña perrita Leona por ser mi compañera más fiel, estar conmigo en todo
momento y por acompañarme en mis noches de estudio.*

*A mi enamorado y a todas las personas que me acompañaron y motivaron durante el
proceso y elaboración de mi trabajo.*

*Finalmente, a mis profesores por darme una formación profesional con ética, principios y
amor al medio ambiente.*

Los amo con todo mi corazón, esta va por ustedes.

Yanira Patricia Carlos Meza

Agradecimiento

A mi My Com Arevalo Fernandez Brenda, por brindarme su cálida amistad y los momentos divertidos.

Al Dr. Miguel Lazarte por impulsarme a brillar.

A mis tíos Dra. Delma & Dr. Oscar y má Edith.

Al Ing. Rider, por protegerme... Ternure

A Jack, tiyo Víctor, Alexa & Euni y a todos los Bandidogs

A mi familia Bambie Car, Yami, Jesh, Hilda, Sol, Jhonur...

A todos los Potaxies del mundo <3

Y la que se Gradúe.....

Fairuz Arroyo Pariente

Debo expresar mi enorme agradecimiento a Dios, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera y formación profesional, por ser mi fortaleza en mis momentos de debilidad. Y por darme una vida llena de aprendizajes y sobre todo felicidad.

Yanira Patricia Carlos Meza

RESUMEN

En enero de 2022, en la costa del Distrito de Ventanilla en Perú, se produjo uno de los mayores vertidos de petróleo registrados en la historia del país. Este incidente afectó a vastas áreas del mar y generó daños significativos en los ecosistemas marinos y la diversidad biológica. Con la finalidad de atender este desafío, se emprendió la investigación actual, la cual se enfocó en la implementación de un sistema de electrocoagulación a nivel de laboratorio como una opción para eliminar los hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminada con petróleo crudo proveniente de la empresa Repsol. Inicialmente, se determinó los niveles iniciales de concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en el agua de mar contaminada los resultados mostraron una concentración inicial de 316.5 mg/L de TPH, considerablemente por encima del estándar de calidad ambiental (ECA) establecidos para el agua en ecosistemas marino costeros. Para optimizar el proceso de electrocoagulación, se determinaron los valores óptimos de densidad de corriente y tiempo de tratamiento, se utilizó el software estadístico SPSS v25 para planificar y analizar los tratamientos, los cuales se llevaron a cabo en un diseño experimental con 4 tratamientos diferentes. La prueba ANOVA reveló que la densidad de corriente tuvo un impacto significativo en la remoción de TPH, mientras que el tiempo no mostró una influencia significativa. La eficacia del sistema de electrocoagulación se evaluó comparando la concentración residual de TPH en el agua tratada con los estándares normativos. Mediante pruebas estadísticas no paramétricas, se determinó que el Tratamiento T2 fue el más efectivo, logrando una remoción de 99.93% de TPH y alcanzando una concentración de 0.168 mg/L de TPH, muy por debajo del límite establecido por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA). En conclusión, se demostró que el sistema de electrocoagulación a escala de laboratorio es una tecnología eficaz y prometedora para el tratamiento de agua de mar contaminada con crudo de petróleo, reduciendo significativamente los niveles de TPH y contribuyendo a la conservación del ambiente acuático.

Palabras clave: Agua de mar; Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH); Electrocoagulación; Electroodos de Aluminio.

ABSTRACT

In January 2022, off the coast of the Ventanilla District in Peru, one of the largest oil spills in the country's history occurred. This incident affected vast areas of the sea and caused significant damage to marine ecosystems and biodiversity. In order to address this challenge, the current research was undertaken, which focused on the implementation of an electrocoagulation system at the laboratory level as an option to remove hydrocarbons present in seawater contaminated with crude oil from the Repsol company. Initially, the initial concentration levels of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) in the contaminated seawater were determined, where the presence of crude oil on flotation was identified. The results showed an initial concentration of 316.5 mg/L of TPH, considerably above the environmental quality standard (ECA) established for water in coastal marine ecosystems. To optimize the electrocoagulation process, the optimal values of current density and treatment time were determined, SPSS v25 statistical software was used to plan and analyze the treatments, which were carried out in an experimental design with 4 different treatments. The ANOVA test revealed that current density had a significant impact on TPH removal, while time showed no significant influence. The efficacy of the electrocoagulation system was evaluated by comparing the residual concentration of TPH in the treated water with regulatory standards. Through non-parametric statistical tests, it was determined that Treatment T2 was the most effective, achieving a 99.93% removal of TPH and reaching a concentration of 0.168 mg/L of TPH, well below the limit established by the Environmental Quality Standard (EQS). In conclusion, it was demonstrated that the laboratory-scale electrocoagulation system is an effective and promising technology for the treatment of seawater contaminated with crude oil, significantly reducing TPH levels and contributing to the conservation of the aquatic environment.

Keywords: Seawater; Total Petroleum Hydrocarbons (TPH); Electrocoagulation.

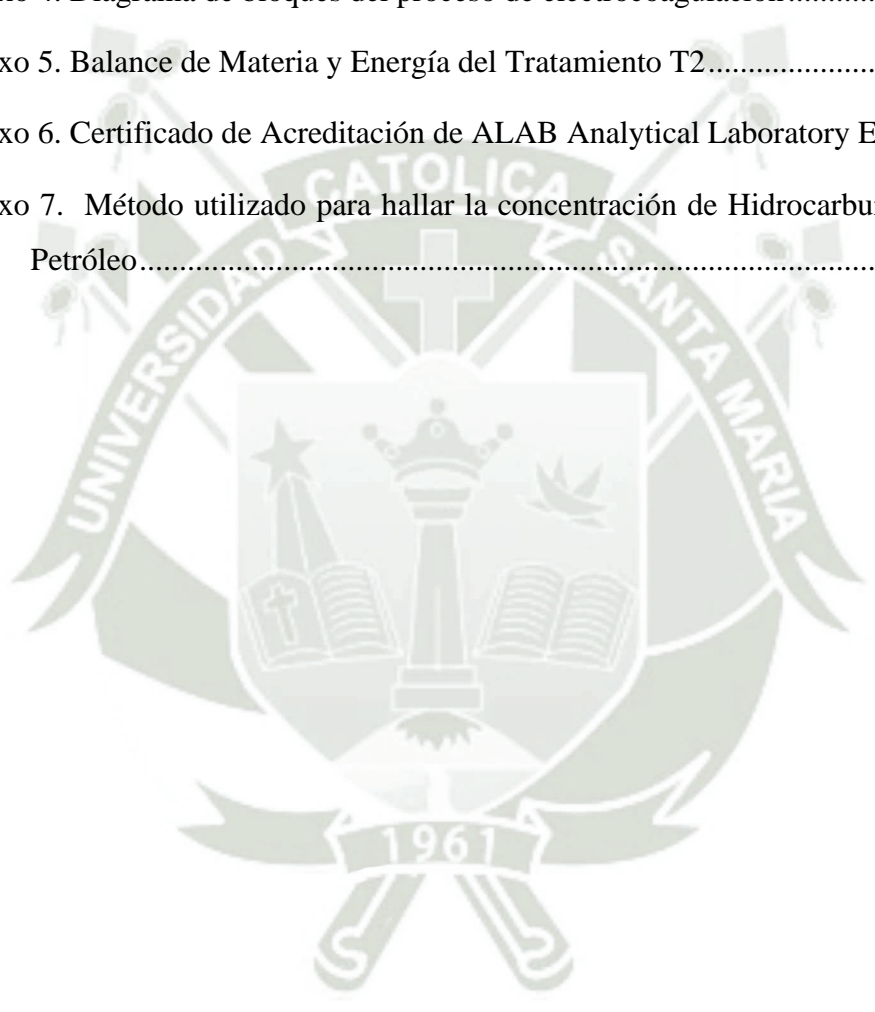
ÍNDICE

<i>Dedicatoria</i>	ii
<i>Agradecimiento</i>	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Problemática de la investigación.....	3
1.2. Justificación de la investigación.....	5
1.2.1. Justificación ambiental.....	5
1.2.2. Justificación social	5
1.2.3. Justificación económica	5
1.2.4. Justificación tecnológica	5
1.2.5. Justificación institucional.....	5
1.3. Objetivos de la investigación.....	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Hipótesis	6
CAPÍTULO II	8
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes de la investigación.....	9
2.2. Marco Teórico	18

2.2.1.	Contaminación de los recursos hídricos.....	18
2.2.2.	El Petróleo	19
2.2.3.	Afectación a la salud humana o toxicología.	23
2.2.4.	Afectación al medio ambiente o ecotoxicología.	23
2.2.5.	Procesos de degradación del petróleo en el mar	24
2.2.6.	Impacto ambiental del derrame de petróleo	29
2.2.7.	Estrategias para la mitigación de vertidos de petróleo en la costa	32
2.2.8.	Tratamiento de aguas residuales	34
2.2.9.	Tratamientos electroquímicos de aguas contaminadas con petróleo	37
2.2.10.	Método analítico para la medición de hidrocarburos	46
2.2.11.	Teoría estadística de análisis de datos.....	47
2.2.11.2.	Método de Análisis de Varianza (ANOVA).....	48
2.3.	Marco legal.....	49
2.3.1.	Internacional.....	49
2.3.2.	Nacional	50
CAPÍTULO III.....		56
3.	METODOLOGÍA	57
3.1.	Tipo y nivel de investigación	57
3.1.1.	Tipo.....	57
3.1.2.	Nivel	57
3.2.	Diseño de la investigación.....	57
3.3.	Operacionalización de Variables.....	57
3.3.1.	Variable independiente.....	57
3.3.2.	Variable Dependiente.....	58
3.4.	Área de estudio	59
3.5.	Población y muestra	60
3.5.1.	Población.....	60

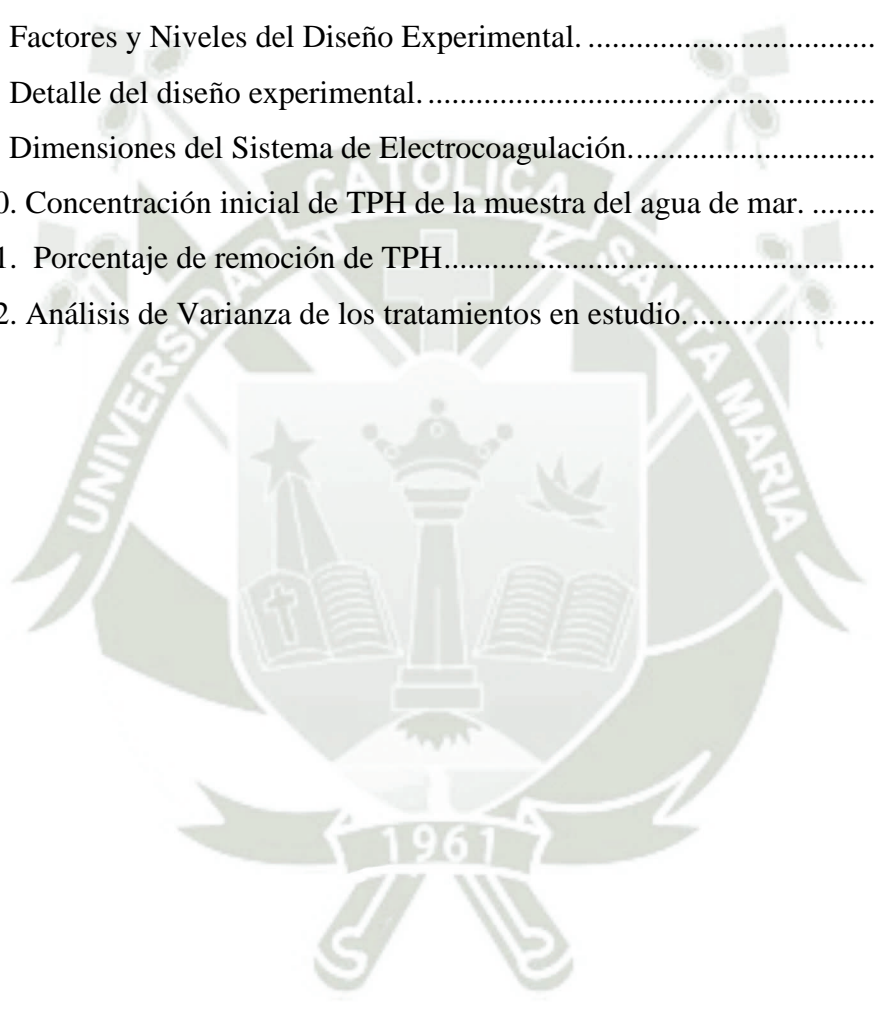
3.5.2.	Muestra.....	60
3.5.3.	Tipo de muestreo.....	60
3.6.	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	61
3.6.1.	Técnicas.....	61
3.6.2.	Instrumentos.....	62
3.6.3.	Materiales y equipos.....	62
3.7.	Métodos de investigación.....	63
3.7.1.	<i>Etapa 1.</i> Identificación de los valores iniciales de concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol – Perú, 2022.	63
3.7.1.1.	Muestreo de agua de mar.....	63
3.7.2.	<i>Etapa 2.</i> Determinación de los valores óptimos de densidad de corriente y tiempo mediante la aplicación de un sistema de electrocoagulación a escala laboratorio para la remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminada con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú 2022.	66
3.7.3.	<i>Etapa 3.</i> Evaluación de la eficacia de remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú 2022 de acuerdo a la normativa nacional vigente.	73
3.7.3.1.	Comparación del TPH residual del agua de mar tratada con la normatividad vigente.....	73
CAPÍTULO IV.....		74
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
CAPÍTULO V.....		87
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
5.1.	Conclusiones.....	88
5.2.	Recomendaciones.....	89
CAPÍTULO VI.....		90
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....		113

Anexo 1. Informes de Ensayo	114
Anexo 2. Panel fotográfico.....	127
Anexo 3. Análisis de Varianza.....	133
Anexo 4. Fundamento matemático para el diseño experimental	136
Anexo 5. Fundamento matemático para el diseño experimental	137
Anexo 4. Diagrama de bloques del proceso de electrocoagulación.....	138
Anexo 5. Balance de Materia y Energía del Tratamiento T2.....	139
Anexo 6. Certificado de Acreditación de ALAB Analytical Laboratory E.I.R.L.....	140
Anexo 7. Método utilizado para hallar la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo.....	141



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de clases, nombres y componentes de hidrocarburos.	21
Tabla 2. Propiedades típicas de los hidrocarburos.	22
Tabla 3. Microorganismos degradadores de contaminantes de hidrocarburos de petróleo	27
Tabla 4 Operacionalización de las variables.	58
Tabla 5. Localización geográfica del área estudio.	59
Tabla 6. Equipos usados en laboratorio.	62
Tabla 7. Factores y Niveles del Diseño Experimental.	67
Tabla 8. Detalle del diseño experimental.	67
Tabla 9. Dimensiones del Sistema de Electrocoagulación.....	68
Tabla 10. Concentración inicial de TPH de la muestra del agua de mar.	75
Tabla 11. Porcentaje de remoción de TPH.....	76
Tabla 12. Análisis de Varianza de los tratamientos en estudio.....	79



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación del proceso de transportes de contaminantes asociados al recurso hídrico.	19
Figura 2. El número de compuestos identificados y cuantificados en los crudos por año.	20
Figura 3. Procesos que actúan sobre una mancha de petróleo en función del tiempo posterior a un derrame. El grosor de línea indica la magnitud relativa de cada proceso.	25
Figura 4. Mecanismos propuestos de fotooxidación del petróleo en el Mar.	26
Figura 5. Desarrollo de efectos y respuestas característicos en la biota marina, en función de las concentraciones de petróleo en el agua de mar y en los sedimentos del fondo.	29
Figura 6. Desarrollo de efectos y respuestas característicos en la biota marina, en función de las concentraciones de petróleo en el mar y en los remanentes sedimentarios.	30
Figura 7. Diferentes formas de contaminación por petróleo en varias costas.	31
Figura 8. Dinámica de la interacción entre el derrame en las costas y los sedimentos.	32
Figura 9. Limpieza de rocas impregnadas de petróleo.	34
Figura 10. Proceso de degradación de aguas residuales.	36
Figura 11. Número de publicaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales de la industria petrolera mediante electroquímica.	38
Figura 12. Diagrama esquemático del diseño de un electrocoagulador.	39
Figura 13. Interacciones que ocurren en el reactor del electrocoagulador.	40
Figura 14. Arreglos de los electrodos del sistema de electrocoagulación.	44
Figura 15. Mapa de ubicación del Área de Estudio.	59
Figura 16. Mapa de ubicación del Punto de Muestreo.	61
Figura 17. Coordenadas del Punto de Muestreo.	65
Figura 18. Preparación de envases y toma de muestra.	65
Figura 19. Medidas de los electrodos de Aluminio.	69
Figura 20. Diseño de la Celda de Electrocoagulación.	70
Figura 21. Modelo de configuración de electrocoagulador tipo batch.	70
Figura 22. Sistema de electrocoagulación.	71
Figura 23. Preparación de vasos para las pruebas de electrocoagulación.	71
Figura 24. Porcentaje de remoción de TPH en los cuatro tratamientos.	80
Figura 25. Factores de remoción de TPH en función al TPH residual después del tratamiento.	82
Figura 26. Comparación del TPH residual con la normativa vigente.	85

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas marinos representan un factor importante para lograr un equilibrio ecosistémico y social, pues no solo brindan un entorno propicio para el desarrollo de la vida acuática, sino que ofrece la oportunidad de desarrollar actividades antrópicas que permiten el desarrollo y crecimiento económico y productivo (MINAM, 2011). A pesar de los múltiples beneficios y servicios que nos ofrece el mar, las actividades antrópicas han ido degradando su calidad, específicamente, los derrames de petróleo ocasionados por un inadecuado manejo y transporte de estos insumos contaminantes, han generado daños considerables a nivel ambiental y de salud humana, produciendo impactos ambientales negativos significativos que deben ser mitigados o remediados.

Tal es el caso del vertido de casi 12,000 barriles de petróleo crudo ocurrido en Ventanilla, Provincia Constitucional del Callao, Perú, el cual tuvo una extensión de 64 km en dirección norte desde el Terminal Marítimo N°2; dañando playas, islas, Áreas Naturales Protegidas y sobre todo especies de flora y fauna marina (IMARPE, 2022), pues esta sustancia es nociva ya que impide la entrada de luz a la superficie marina alterando el desarrollo de la flora y afectando a la cadena alimenticia, y por su alto grado de toxicidad envenena a especies de fauna marina, causando su muerte.

Por esta razón, el objetivo de este estudio es brindar una alternativa de tratamiento de agua de mar contaminada con crudo de petróleo, a través de la aplicación de un sistema de electrocoagulación a escala laboratorio. Para lograrlo se utilizó el proceso de diseño de respuesta de superficie basado en el diseño compuesto central (DCC), realizando tratamientos de electrocoagulación con diferentes densidades de corriente y tiempo de electrocoagulación, para poder determinar la eficacia del método en la remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar, comparando los valores de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) residual con los valores establecidos en el estándar de calidad ambiental para agua, para su validación como una tecnología eficiente.

Finalmente, el presente estudio está estructurado en cinco capítulos, los cuales inician con el planteamiento de la problemática continuando con el fundamento teórico que comprende antecedentes, marco teórico y marco legal, para continuar con metodología, resultados y discusiones y finalizar con las conclusiones y recomendaciones, para poder motivar el desarrollo de futuras investigaciones relacionadas a la temática que impulsó el desarrollo de la misma.



CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

El mar, abarcando el 97.2% de la superficie terrestre, es crucial para el equilibrio ecológico global, regulando la temperatura y las corrientes mediante su microflora (Gómez, 2018). Además, sirve como vital recurso económico, facilitando actividades comerciales y recreativas, y sustentando la pesca, fundamental para países en desarrollo (MINAM, 2011). A pesar de sus beneficios, la gestión ineficiente de actividades humanas ligadas al petróleo causa daños irreparables.

Los derrames de petróleo a gran escala han sido un problema desde finales de la década de 1960, como el caso del Torrey Canyon en el Reino Unido, y el derrame asociado con la Guerra del Golfo en 1991, que liberó más de 82 millones de toneladas (SchmidtEtkin, 2011). Estos incidentes, relacionados con el transporte de petróleo, destacan la importancia de este recurso, considerado vital para la energía mundial, con una proyección de demanda de 107 millones de barriles por día para las próximas dos décadas (El-Naas et al., 2014).

En Latinoamérica, los derrames de petróleo han sido desastres ambientales y gubernamentales, como en el Atlántico Sur en Brasil (Soares et al., 2020) y en el Golfo de México, donde un derrame de 2.6 millones de galones causó un impacto significativo en las playas, hábitats altamente dinámicos (Challenger et al., 2021; Bejarano & Michel, 2016).

En Perú, se han registrado más de 75 derrames de petróleo entre 2011 y 2022, tanto en la región amazónica como en la marino-costera, con una respuesta insuficiente para abordar la problemática ambiental. Muchos de estos incidentes fueron resultado de negligencia en el manejo del hidrocarburo. Además, en los años 2014 y 2016, se derramaron más de 25,000 barriles solo en regiones amazónicas afectadas por el oleoducto peruano, causando daños ambientales, productivos y afectando la salud humana en las comunidades circundantes (Urteaga et al., 2022).

El sábado 15 de enero de 2022, un desastre ambiental de proporciones aún no calculadas fue desencadenado por un derrame de petróleo ocurrido cuando el conducto de descarga de la embarcación italiana Mare Dorium se rompió durante sus operaciones de carga y descarga de crudo en la costa marina de la Refinería La Pampilla y según la revisión de

información de organismos gubernamentales y artículos científicos de revistas indexadas, la cantidad de petróleo derramado alcanzó los 11.900 barriles, que se dispersaron hacia el norte debido a las corrientes marinas. El área afectada por el crudo se extiende por 1.739.000 m², contaminando más de 24 playas. La zona impactada por el derrame abarca 713 hectáreas de mar y 180 hectáreas de litoral, afectando los hábitats y la biodiversidad de la Reserva Nacional Sistema de Islas, Islotes y Puntas Guaneras y la Zona Reservada Ancón. Se estima que cerca de 500 especies de algas marinas, invertebrados, aves y mamíferos han sufrido las consecuencias de este desastre (Capurro et al, 2022).

El derrame de petróleo en la costa de Ventanilla ha generado graves daños ambientales y socioeconómicos. Según la dirección general de Capitanías y Guardacostas del Perú, se atribuye a un posible fallo en el buque-tanque Mare Doricum y las condiciones de mantenimiento del terminal (Diario Gestión, 2022). Esto refleja la falta de preparación de Repsol y del Estado para emergencias (Urteaga et al., 2022). El derrame afectó gravemente la biodiversidad y los hábitats en áreas protegidas como la Reserva Nacional de Islas, Islotes y Puntas Guaneras, y la Zona Reservada de Ancón (SERNANP, 2022). Además, la presencia de petróleo en el agua interrumpe la actividad fotosintética, afectando la cadena alimentaria marina y causando daños graves a la vida marina y a la salud humana (González & Vásquez, 2022). Por tanto, es crucial buscar soluciones como el uso de electrocoagulación para la remoción de petróleo en las costas de Ventanilla.

Los derrames de hidrocarburos en el mar tienen impactos devastadores en la vida marina, afectando principalmente a aves, peces y mamíferos marinos. El petróleo contamina su entorno, inhibiendo la capacidad de vuelo de las aves, causando graves problemas de salud y mortalidad. Los peces sufren muerte, deformidades y extinciones debido a la ingestión de petróleo, mientras que los mamíferos marinos enfrentan problemas de salud por la inhalación de hidrocarburos y la contaminación de su pelaje (Zhang et al., 2019; Akpan, 2022).

Los vertidos de petróleo afectan gravemente los hábitats marinos, como los manglares y el suelo marino, causando daños a la fauna y flora local (Zhang et ál., 2019). Además, tienen graves repercusiones económicas y sociales, restringiendo la pesca comercial y afectando el bienestar de las comunidades pesqueras, que experimentan una disminución en las ventas de pescado y una reducción en los ingresos (Quevedo, 2022). Esto también afecta al turismo y a las empresas en las áreas afectadas, generando pérdidas significativas (Gestión, 2022).

1.2. Justificación de la investigación

1.2.1. Justificación ambiental

La aplicación del sistema de electrocoagulación para la remoción de TPH propuesta en el presente estudio, permitirá contribuir en la reducción de Hidrocarburos Totales de Petróleo como una alternativa de tratamiento del agua contaminada con crudo de petróleo, cumpliendo con los estándares de calidad ambiental para agua de mar, antes de que llegue a contaminar las costas, donde su tratamiento torna más complejo y el daño se magnifica.

1.2.2. Justificación social

Adicionalmente en las tareas de limpieza, los voluntarios y/o encargados presentan una alta probabilidad de desarrollar enfermedades a futuro por la exposición a este contaminante, como también incidentes y accidentes durante dichas labores. El desarrollo de esta investigación podría automatizar las labores de limpieza, requiriendo la mínima cantidad de mano de obra, minimizando los riesgos que estas conllevan; además de contribuir en la mejora de la calidad de vida de las poblaciones afectadas.

1.2.3. Justificación económica

Nuestro proyecto de tesis, propone la aplicación de un sistema de electrocoagulación como una alternativa de solución sostenible debido a su configuración simple y la accesibilidad en sus costos de operación y mantenimiento, además del análisis de ciclo de vida que puede ser menor en términos cuantitativos frente a otras tecnologías.

1.2.4. Justificación tecnológica

El presente estudio, enfocada en la electrocoagulación de hidrocarburos debido a la no generación de lodos ni a la contaminación secundaria, se considera una solución tecnológica sostenible, prometedora e innovadora y podría considerarse una guía para los demás estudios futuros.

1.2.5. Justificación institucional

Las instituciones buscan tecnologías eficientes y de bajo costo como alternativas viables, que permitan fortalecer la gestión, por ende, la

electrocoagulación resulta ser un método aplicable y eficiente debido a que el agua de mar posee sales que podrían ayudar eficientemente en la remoción de hidrocarburos.

Por lo todo lo expuesto es importante generar una investigación que pueda dar solución a la contaminación del mar por hidrocarburos y tener como resultado eficiente la remoción de los hidrocarburos en el ecosistema marítimo y así evitar la expansión de esta contaminación dentro de nuestro litoral, contribuyendo a la gestión ambiental sostenible.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Aplicar un sistema de electrocoagulación a escala laboratorio como alternativa de remoción de hidrocarburos presentes en agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú, 2022.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar los valores iniciales de concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú, 2022.
- Determinar los valores óptimos de densidad de corriente y tiempo mediante la aplicación de un sistema de electrocoagulación a escala laboratorio para la remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú, 2022.
- Evaluar la eficacia de remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú, 2022 de acuerdo a la normativa nacional vigente.

1.4. Hipótesis

Dado que la electrocoagulación, como método de tratamiento de agua, se basa en la aplicación de corriente eléctrica a través de electrodos para inducir la formación de coagulantes in situ, los cuales facilitan la aglutinación y sedimentación de partículas y contaminantes presentes en el agua, incluidos los hidrocarburos totales de petróleo (TPH). Es probable que, durante el proceso

de electrocoagulación, se produzcan reacciones químicas que contribuyan a la transformación de los contaminantes, mejorando aún más la eficacia del tratamiento. Por lo tanto, se postula que la electrocoagulación representa una alternativa altamente eficaz y prometedora para la remoción de TPH en el agua de mar contaminada por derrames de petróleo, ofreciendo beneficios significativos en términos de eficiencia y sostenibilidad ambiental.





CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Salas & Ventura (2020), en su proyecto titulado “Remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) mediante biomasa animal de cascos y cuernos de caprinos 2020”, tuvieron como objetivo principal evaluar cómo la biomasa animal de cascos y cuernos de caprinos puede contribuir significativamente a la eliminación de hidrocarburos de petróleo presentes en cuerpos de agua. Para esto, se llevaron a cabo análisis en los que se recolectaron 30 muestras de agua siguiendo el Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales, y se aplicaron 2 litros de biomasa animal en cada punto de muestreo. Los resultados revelaron que, al utilizar biomasa animal con una granulometría de 2 mm y una concentración de 10 g, se logró remover el 98.80% de los hidrocarburos presentes en la muestra. Por lo tanto, el estudio concluye que la biomasa animal de cascos y cuernos de caprinos tiene un impacto significativo en la eliminación de hidrocarburos de petróleo presentes en cuerpos de agua superficial.

Ramos (2023), en la investigación denominada “Degradación de contaminantes presentes en las aguas residuales de la industria petrolera usando un biorreactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) a escala laboratorio”, planteó evaluar la eliminación de dos contaminantes presentes en el agua residual de una refinería de petróleo. Para alcanzar este objetivo, se dividió la investigación en tres etapas distintas. En primer lugar, se realizó un exhaustivo estudio de la composición de hidrocarburos a nivel nacional e internacional para identificar los principales factores que contribuyen a la toxicidad del agua resultante de la producción de hidrocarburos. Los resultados revelaron que los compuestos aromáticos, como el tolueno y el fenol, junto con la salinidad y los fluidos de perforación, como el etanol, son los principales responsables de esta toxicidad. En la segunda etapa, se evaluó la estabilidad y eficiencia de un biorreactor UASB mientras se ajustaba gradualmente el lodo granular anaerobio a una concentración de cloruro de sodio (NaCl) de 17 g/L. Los hallazgos mostraron que las concentraciones de NaCl inferiores a 9,0 g/L no tuvieron un impacto significativo en el proceso, pero se observó una disminución en la resistencia y estabilidad del lodo granular, lo que resultó en una reducción del rendimiento. Finalmente, el biorreactor se estabilizó, logrando una remoción total de DQO del 58,71% y una remoción de DQO soluble del 75,17%. En la

tercera etapa, se evaluó la capacidad del biorreactor UASB para extraer tolueno y fenol en condiciones salinas y en presencia de etanol. A pesar de que el biorreactor mostraba signos de aproximarse al fallo debido a la disminución de las eficiencias de remoción de DQO total al 25,17% y DQO soluble al 34,32%, respectivamente, se logró una remoción total del tolueno del 100% y una remoción total del fenol del 98%. En conclusión, la investigación resalta la eficacia y viabilidad del biorreactor UASB en la eliminación de hidrocarburos del agua residual de la industria petrolera, a pesar de los desafíos asociados con las condiciones salinas y la presencia de compuestos como el etanol.

Villamizar (2020), en su estudio titulado "Evaluación del efecto del quitosano como alternativa para la depuración de aguas residuales provenientes de la industria de hidrocarburos", se planteó evaluar el efecto del quitosano como una alternativa para depurar aguas residuales en esta industria específica. A través de una serie de análisis enfocados en el quitosano y su función en el proceso de depuración de aguas residuales de hidrocarburos, los resultados mostraron una eficacia en la eliminación de contaminantes hidrocarburoados que varió entre el 80% y el 97%. Por lo tanto, se concluye que el quitosano, con sus propiedades beneficiosas y su facilidad de uso en una variedad de procesos de tratamiento de aguas residuales, emerge como una opción viable para depurar las aguas de producción generadas en el sector industrial de hidrocarburos.

Mamani (2023), en su estudio titulado "Análisis de técnicas de remediación de aguas contaminadas por hidrocarburos, revisión sistemática, 2022", buscó determinar las técnicas más efectivas para remediar aguas contaminadas con hidrocarburos, para ello aplicó una metodología de diseño narrativo, recopiló datos de estudios previos en inglés y español durante un período de 5 años (2018-2022). Los resultados revelaron que la fitorremediación, la biorremediación y el aislamiento bacteriano son las técnicas más comunes en la actualidad para tratar aguas contaminadas con hidrocarburos. Además, se encontró que los componentes ambientales óptimos para la remediación tienen un pH de 6 a 7.5 y temperaturas de 85 a 100 grados Celsius, destacando que la biomasa de microalgas y los fotobiorreactores de algas marinas lograron elevados porcentajes de remoción de hidrocarburos entre el 89% y el 99.9%. En conclusión, estas técnicas demostraron ser superiores debido a su alta eficiencia de remoción, adaptabilidad al clima

y bajo costo, lo que sugiere que pueden reemplazar a las técnicas convencionales.

García & Palacios (2021), llevaron a cabo una investigación titulada "Evaluación de la factibilidad de adsorbentes minerales y orgánicos en el tratamiento de derrames petroleros", con el propósito de evaluar la eficacia de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y cascarilla de arroz (*Oryza sativa* L.) como adsorbentes de hidrocarburos en aguas superficiales, con miras a su posible aplicación en situaciones de derrames en el estero "El Salado", ello se logró a través de una metodología que incluyó una exhaustiva búsqueda documental y bibliográfica, seguida de la revisión, organización, categorización y comparación de datos, se evaluaron nueve tratamientos para determinar la capacidad de adsorción de los materiales ante diversos contaminantes de hidrocarburos, basándose en investigaciones previas. Se encontró que el bagazo de caña de azúcar, tanto en su forma natural como con modificaciones en sus propiedades, demostró tasas de adsorción que oscilaron entre el 65.1% y el 67.38%, mientras que las modificaciones adicionales mejoraron su eficacia hasta alcanzar el 90%. Como resultado, se concluyó que la viabilidad de estos tratamientos para su aplicación experimental, junto con su bajo costo, respalda su efectividad como posibles soluciones para la mitigación de derrames de hidrocarburos en aguas superficiales.

Espinoza & Llatas (2022), en su revisión titulada "Aportes de los adsorbentes como alternativas de solución frente a los derrames de petróleo crudo. Revisión sistemática 2022", buscaron identificar el papel de los adsorbentes en la gestión de derrames de petróleo crudo. Esta revisión involucró el análisis exhaustivo de 28 artículos científicos, empleando un enfoque metodológico que incluyó la recopilación de datos mediante instrumentos y la consideración de estándares de recolección de datos establecidos en fichas. Los resultados revelaron que el 46% de los adsorbentes examinados eran sintéticos, el 29% eran orgánicos, el 14% eran nano, y el 11% eran inorgánicos, estos adsorbentes presentaban una variedad de composiciones, incluyendo polímeros sintéticos, fibras naturales, polímeros agrícolas y nanopartículas, además, se observó que los polímeros sintéticos representaban el 50% de los materiales utilizados, mientras que las fuentes naturales, nanopartículas y fuentes agrícolas representaban el otro 50%.

Concluyendo que los polímeros orgánicos pueden ser una excelente opción para abordar los problemas derivados de los derrames de petróleo crudo.

Villalobos (2022), en su investigación titulada "Estudio del mecanismo de transporte en la movilidad de hidrocarburos en medio acuoso", se propuso desarrollar un modelo matemático para describir la movilidad y transporte de hidrocarburos en medio acuoso. Para lograr este objetivo, empleó un sistema electroquímico que involucra líquidos iónicos y su interacción con los hidrocarburos estableciendo un área de relevancia en los estados de Tamaulipas y Veracruz, evaluada mediante diferentes métodos para definir la contaminación por hidrocarburos. La síntesis y caracterización del líquido iónico P-toluensulfonato de 1-metil-3-hexilimidazolio se detallaron, junto con la determinación de la concentración micelar clave utilizada en las pruebas de interacción con el hidrocarburo. Las variables del sistema electroquímico incluyeron voltaje, distancia entre electrodos y electrolito, para monitorear las gotas de agua cruda y el tiempo y la distancia recorrida por las gotas en cada experimento. Los resultados mostraron que la adición de líquido iónico hacía que el hidrocarburo fuera más flexible. Se concluyó que la distribución del potencial eléctrico a través de la doble capa eléctrica demostraba el movimiento de las especies iónicas en la solución electrolítica, junto con las ecuaciones de transporte de masa.

Garzón (2022), en su estudio, titulado "Estudio sobre la combinación de mezclas naturales y químicas para el proceso de coagulación/floculación en la remoción de la turbidez del agua desde una perspectiva química en el tratamiento del agua", tuvo como objetivo analizar y establecer la eficacia del proceso de coagulación-floculación utilizando mezclas de polímeros y sustancias químicas. Se exploraron diferentes vegetales de consumo cotidiano, como *Moringa oleifera*, *Ipomoea incarnata*, *Opuntia ficus*, *Musa x paradisiaca*, entre otros, que son polímeros naturales conocidos por su éxito en la remoción de turbidez. Se encontró que los extractos de *Ipomoea incarnata* lograron una remoción de turbidez del 99.29%, similar a los resultados obtenidos con sulfatos como $Al_2(SO_4)_3$, $CuSO_4$ y $Fe_2(SO_4)_3$. Además, se destacó la eficacia superior al 90% de otras especies vegetales. Por ejemplo, *Opuntia* mostró remociones significativas, especialmente cuando se combinó con almidón y sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$). Se

observó que la combinación de almidón de plátano con $Al_2(SO_4)_3$ alcanzó una remoción del 97.4%. En conclusión, el estudio demostró una efectiva remoción de turbidez en el agua mediante el tratamiento con estas combinaciones de mezclas naturales y químicas.

Almanche & Sinchiguano (2019), En su investigación titulada "Islas Flotantes Artificiales con PASTO GUINEA (*Panicum maximum*) para Remover TPH en Agua del Río Cutuchi", evaluaron el efecto del Pasto Guinea en la remediación de aguas contaminadas con TPH. Utilizando una bomba de aire y esta especie vegetal, se tomaron mediciones para mantener los datos bajo control. Durante cuatro meses, se evaluaron los niveles de nitratos, fosfatos y TPH en tinas instaladas, obteniendo una remoción del 80.04% de TPH cada siete días. Se demostró que el cultivo de *Panicum maximum* en matrices flotantes es efectivo para su desarrollo, con un periodo de adaptabilidad de 101 días desde la siembra hasta la instalación en las islas flotantes. Esto sugiere que estas islas pueden ser una opción viable para mejorar la calidad del agua.

Pinzon (2022), en su estudio titulado "Evaluación de Intermediarios de la Degradación Electrocatalítica de Hidrocarburos en Aguas Residuales de la Industria Petroquímica Utilizando Cromatografía de Gases con Espectrometría de Masas", se llevó a cabo una investigación sobre la degradación electrocatalítica de hidrocarburos en aguas residuales petroquímicas, para ello se realizaron ajustes en las condiciones de corriente y tiempo de reacción, así como en la elección del electrolito más apropiado para lograr altos niveles de degradación. Empleando la técnica SPME en conjunto con cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), se identificaron los compuestos volátiles presentes en el agua. Se observó que el ácido acético y el ácido benzoico actuaban como intermediarios en el proceso de degradación electrocatalítica. Los resultados demostraron que el proceso electrocatalítico resultó efectivo para la destrucción del tolueno bajo condiciones óptimas específicas: pH 7, voltaje 2 V, amperaje 0.1, densidad de corriente 30 mA/cm², y una duración de reacción de treinta minutos. Concluyendo que el cloruro de sodio es el electrolito más adecuado, logrando una degradación máxima del 94%.

Azaña & Roman (2019), en su investigación titulada "Almohadilla de Pluma de Pollo para la Remoción de Agua Contaminada por Desembarque de Petróleo Crudo en el

Muelle Dársena, Callao 2019", evaluaron el uso de almohadillas de pluma de pollo para la absorción de petróleo crudo en agua de mar contaminada. Mediante un análisis cuantitativo y un diseño experimental, se emplearon almohadillas de yute rellenas con plumas de pollo lavadas en tamaños de 10 cm, 5 cm y 1 cm. Los resultados mostraron que las almohadillas de pluma de pollo de 30 cm x 30 cm retuvieron significativamente mejor el petróleo crudo en dos litros de agua contaminada, con una capacidad de retención de 5,75 gramos dentro de los parámetros evaluados y una reducción del 21,31% en comparación con el control. Además, se observó una mejora en las características fisicoquímicas del agua. Estos hallazgos sugieren que las almohadillas de pluma de pollo de mayor tamaño tienen un potencial prometedor para la remoción efectiva de petróleo crudo en entornos contaminados.

Quispe & Ticona (2022), en su revisión titulada "Tecnologías de Fitorremediación para el Tratamiento de Aguas Contaminadas por Derrames de Hidrocarburos", se propusieron identificar las técnicas más efectivas para este fin. Utilizando un enfoque cualitativo de diseño narrativo y análisis documental, revisaron estudios de los últimos cinco años. Encontraron que la biorremediación asistida utilizando microorganismos y la fitorremediación con plantas son las técnicas más comúnmente empleadas para eliminar hidrocarburos, incluyendo fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, petróleo crudo y otros contaminantes. La biorremediación con microorganismos demostró una eficacia del 80% en la eliminación de hidrocarburos de petróleo, mientras que la fitorremediación logró eliminar el 72.89% de los aceites contaminantes en el agua. En conclusión, la combinación de biorremediación con bacterias y fitorremediación con plantas mejora significativamente la eliminación de diversos tipos de hidrocarburos en aguas contaminadas.

Aruhanca (2019), en su investigación titulada "Eficiencia del Carbón Activado Obtenido de Biopolímeros Naturales en la Adsorción de Petróleo en Agua de Mar a Nivel Laboratorio en el Callao-2018", buscó determinar la capacidad del carbón activado derivado de biopolímeros naturales para adsorber petróleo. Para ello, se recolectaron muestras de agua de mar y petróleo crudo, y para obtener carbón activado se procedió a tratar plumas de pollo y cáscaras de coco. Tras realizar pruebas para determinar la mejor

composición, se encontraron tres tratamientos de carbón activado a base de pollo con diferentes cantidades. Los resultados mostraron que 8 gramos de carbón activado de coco lograron una eficiencia del 99,91% en la adsorción de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), mientras que 18 gramos de carbón activado de plumas de pollo alcanzaron una eficiencia del 94,66%. La investigación concluye con que el carbón activado derivado de biopolímeros naturales es efectivo en la adsorción de petróleo en agua de mar a escala laboratorio.

Rojas & Rengifo (2021), en su proyecto de investigación titulado "Biodegradación de Petróleo por *Pseudomonas aeruginosa* en Aguas de Derrame de la Actividad Petrolera en Ucayali-2020", evaluaron la eficacia de *Pseudomonas aeruginosa* en la biodegradación del petróleo en aguas contaminadas por derrames petroleros en Ucayali, a escala de laboratorio. Utilizando muestras del efluente de la antigua refinería Maple Gas Corporation del Perú S.R.L., se llevaron a cabo ensayos de biodegradación durante 7 días en el Laboratorio de Microbiología y Parasitología de la Universidad Nacional de Ucayali. Los resultados mostraron porcentajes de biodegradación superiores al 80%, con valores específicos del 82,65%, 81,41%, 80,33% y 81,16% para diferentes muestras. Las unidades formadoras de colonias (UFC/ml) fueron medidas, así como el grado API del crudo utilizado. La investigación concluye indicando que el uso de *Pseudomonas aeruginosa* es efectivo en la biodegradación del petróleo bajo condiciones operativas adecuadas.

Nápoles et al. (2019), en su investigación conjunta titulada "Degradación de Diesel en Agua de Mar Utilizando un Consorcio Bacteriano", se propusieron caracterizar el agua de mar en la playa Mar Verde Beach y llevar a cabo experimentos de degradación de diesel comercial mediante un consorcio bacteriano. Se evaluaron parámetros como pH, salinidad, contenido de nitrato y fosfato, oxígeno disuelto y la población de microbios heterótrofos y degradadores de diesel. La cinética de descomposición del diesel fue examinada mediante el uso de una combinación de cuatro cepas bacterianas y dos tipos de medios de cultivo: agua de mar estéril y no estéril. Los resultados mostraron que los parámetros analizados cumplían con los estándares nacionales y que la población heterótrofa no afectó los experimentos de degradación a lo largo de 30 días. La comunidad

bacteriana logró eliminar el 53% del combustible tanto en medios estériles como no estériles. En conclusión, se demostró que este consorcio bacteriano puede ser efectivo para la biorremediación del agua de mar contaminada con diesel.

Larios (2019), en su estudio titulado "Evaluación de Tres Métodos de Tratamiento Químico de la Fibra de Coco como Adsorbente de Diésel en Agua", investigó la capacidad de la fibra de coco para limpiar derrames de diésel en cuerpos de agua. Se realizaron pruebas con tres tratamientos químicos diferentes, que incluyeron ácido acético, ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno, para determinar su capacidad de absorción. Se encontró que el tercer tratamiento, que consistía en 1g de fibra de coco tratada con ácido acético durante 24 horas, logró eliminar en promedio un 10,32% del diésel presente. Tras el tratamiento, el agua contaminada quedó libre de hidrocarburos. Se demostró que la fibra de coco puede ser una opción valiosa para abordar los derrames de diésel en cuerpos de agua, especialmente en entornos selváticos como la Amazonía peruana, donde no se cuenta con productos comerciales específicos. Se concluye resaltando la importancia de tomar medidas inmediatas para proteger la flora y fauna local, aprovechando recursos locales como la fibra de coco, que es ampliamente cultivada en la región selvática del Perú, como una solución provisional hasta que lleguen equipos especializados.

Xu et al. (2022), en su investigación titulada "Mejora del Rendimiento del Sistema de Electrocoagulación-Filtración para el Tratamiento de Aguas Residuales de Maricultura Mediante el Uso de Corriente Pulsante Alterna: Efectos de la Densidad de Corriente y el Período de Conversión de Corriente", investigaron el impacto de la densidad de corriente y el período de conversión de corriente en los electrodos, la eficiencia del tratamiento y la energía consumida en un sistema de filtración de electrocoagulación durante el tratamiento de aguas residuales de maricultura. Recolectaron agua de un estanque de cultivo de *Litopenaeus vannamei* y la filtraron para eliminar sólidos suspendidos y residuos de alimento. Observaron que el uso de corriente continua (CC) resultó en una pasivación de los electrodos, mientras que el uso de corriente pulsante alterna (APC) redujo esta pasivación y mejoró la eficiencia del tratamiento y el consumo de energía. Se encontró que un período de conversión de corriente más corto producía mejores

resultados. Recomendaron el uso de APC con una densidad de corriente más baja para reducir la pasivación del electrodo y los costos de mantenimiento en sistemas de filtración de electrocoagulación a largo plazo.

Hakizimana et al. (2016), elaboró la investigación titulada "Evaluación de la Remoción de Dureza, Microorganismos y Materia Orgánica del Agua de Mar mediante Electrocoagulación como Pretratamiento de Desalinización por Ósmosis Inversa", evaluaron la idoneidad de la electrocoagulación como reemplazo de los pretratamientos tradicionales para reducir el ensuciamiento de las membranas en el proceso de desalinización mediante ósmosis inversa del agua de mar. Emplearon electrodos de aluminio en modo galvanostático en una celda discontinua. Se midió la absorbancia (UV254 nm) y el contenido de carbono orgánico disuelto (DOC) para evaluar la eficacia del proceso en la eliminación de materia orgánica. También se evaluaron las bacterias heterótrofas cultivables para verificar la capacidad desinfectante del proceso, mientras se monitoreaba la dureza total. Se investigaron parámetros operativos como la velocidad de mezcla, la densidad de corriente, el pH inicial y la distancia entre electrodos. Se encontró que una mayor densidad de corriente y un pH más bajo mejoraron la eliminación de materia orgánica del agua de mar mediante electrocoagulación. El proceso eliminó el 70,8% del DOC y redujo la absorbancia en un 89,7%, mientras que la reducción de la dureza total fue limitada, alrededor del 10%. Concluyeron que la electrocoagulación muestra un alto potencial como pretratamiento para reducir la posible contaminación orgánica y la bioincrustación en membranas de ósmosis inversa, gracias a su eficacia en la eliminación de materia orgánica y microorganismos disueltos del agua de mar.

Xu et al. (2021), en su investigación titulada "Aplicación de Métodos de Electrocoagulación-Filtración Híbridos en el Pretratamiento de Aguas Residuales de Acuicultura Marina", desarrollaron un sistema de filtración-electrocoagulación (EC) de flujo continuo para el pretratamiento mejorado de un sistema de recirculación de acuicultura. Se investigaron diferentes modos de combinación de ánodos, tiempos de retención hidráulica (HRT) del reactor EC y tamaños de poros del filtro para evaluar su impacto en la capacidad de tratamiento del agua. Los resultados mostraron que la EC podría mejorar significativamente la eficiencia del tratamiento del equipo filtrante

utilizado en los pasos siguientes. El uso de electrodos de Al-Fe como ánodo, específicamente el ánodo $3\text{Al} + \text{Fe}$, demostró mejorar la capacidad de procesamiento del sistema. Aumentar el HRT y reducir el tamaño de los poros del filtro aumentó el efecto mejorado del proceso EC en el filtro. Se encontró que con una densidad de corriente de $19,22 \text{ A/m}^2$, un ánodo de $3\text{Al} + \text{Fe}$, un HRT de 4,5 minutos y un tamaño de poro del filtro de 45 m, el sistema logró eficiencias de eliminación del $69,55 \pm 0,93\%$ para Vibrio, $48,99 \pm 1,42\%$ para la demanda química de oxígeno, $57,06 \pm 1,28\%$ para el nitrógeno amoniacal total, y $34,09 \pm 2,27\%$, $18,47 \pm 1,88\%$ y $55,26 \pm 1,42\%$ para el nitrógeno nitrito (NO_2^- -N), nitrógeno nitrato (NO_3^- -N) y nitrógeno total, respectivamente. El consumo de energía fue de $(26,25 \pm 4,95) \times 10^{-3} \text{ kWh/m}^3$.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Contaminación de los recursos hídricos

La contaminación de los cuerpos de agua hace referencia a la introducción de elementos químicos, físicos o biológicos que afectan negativamente la composición y estructura óptima del agua respecto a un uso específico. La sensibilidad de un cuerpo de agua al deterioro varía según el tipo de recurso hídrico, localización y la utilización que puede tener. Mientras que algunas aguas pueden no ser adecuadas para el consumo humano, podrían serlo para otros fines, como pueden ser aguas destinadas para recreación, riego de cultivos y bebida de ganado. Aunque existen causas naturales de contaminación hídrica, en este contexto nos enfocaremos en las causas derivadas de la actividad humana. (Schweitzer & Noblet, 2018).

2.2.1.1. Fuentes de contaminación del recurso hídrico

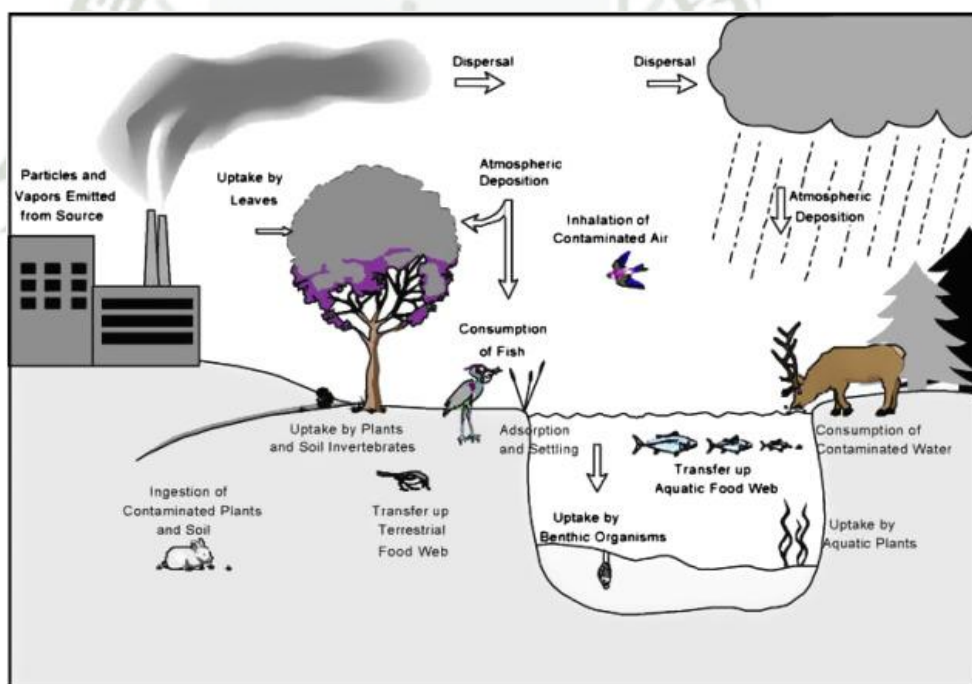
Generalmente, las fuentes de contaminación se clasifican en puntuales y no puntuales; las puntuales son aquellas fácilmente localizables e identificables, como por ejemplo plantas eléctricas, refinerías, minas, industrias, PTAR (plantas de tratamiento de aguas residuales), entre otras. Por otro lado, las no puntuales se dispersan en grandes áreas geográficas como cuencas hidrográficas, esta categoría puede abarcar fuentes en movimiento, como autos, buses y trenes. A pesar de que cada vehículo es una fuente puntual, al moverse distribuyen su contaminación a lo largo de una extensa área. Un ejemplo clásico de contaminación difusa es la escorrentía urbana, que puede

resultar de la combinación de múltiples fuentes puntuales menores distribuidas en un área (Schweitzer & Noblet, 2018).

Estas fuentes generan los procesos de destino y transporte del contaminante (Figura 1); cómo se transportan los productos químicos a diferentes escalas tanto en el aire, el agua, el suelo, los sedimentos y la biota; y cómo los productos químicos finalmente se descomponen y eliminan. La (Schweitzer & Noblet, 2018) muestra la distribución de elementos químicos dentro de un entorno natural. Algunos productos químicos son muy persistentes, mientras que otros se descomponen más fácilmente en el medio ambiente mediante procesos como la fotólisis, la hidrólisis y la biodegradación (metabolismo en los organismos).

Figura 1.

Representación del proceso de transportes de contaminantes asociados al recurso hídrico.



Nota. Schweitzer & Noblet (2018)

2.2.2. El Petróleo

2.2.2.1. Composición química de los hidrocarburos

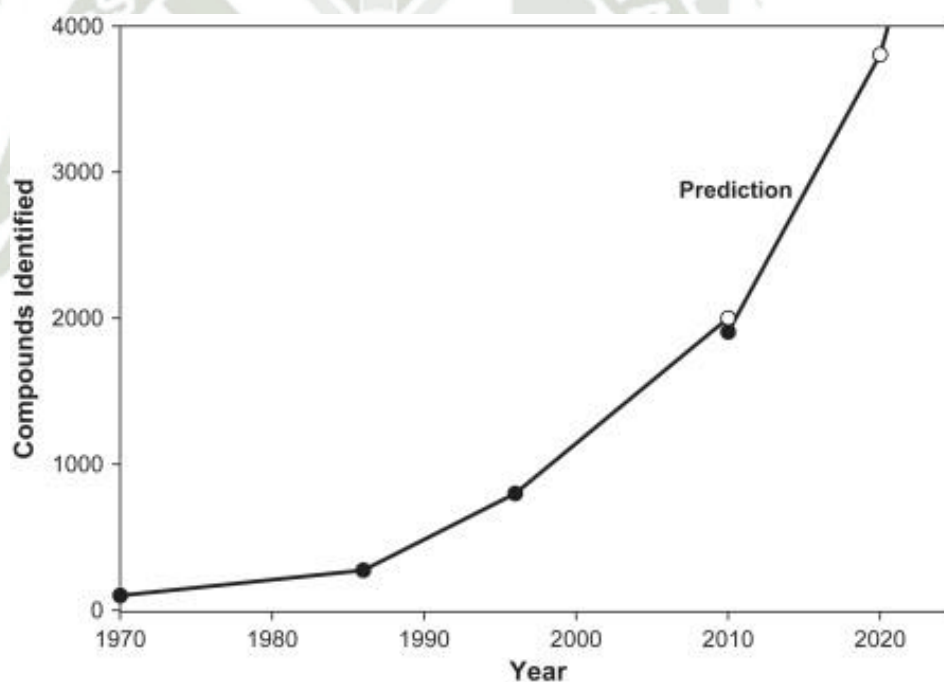
Los petróleos crudos son mezclas de compuestos de hidrocarburos que van desde compuestos volátiles más pequeños hasta compuestos no volátiles muy

grandes. Esta mezcla de compuestos varía según la formación geológica del área en la que se encuentra el petróleo e influye fuertemente en las propiedades del petróleo. Los petróleos crudos que consisten principalmente en compuestos grandes son viscosos y densos. Los productos que se obtienen a partir del petróleo, tales como la gasolina o el gasóleo, son mezclas de menos compuestos y, por lo tanto, sus propiedades son más específicas y menos variables (Fingas, 2011).

La Figura 2 muestra el número de compuestos que se identifican y cuantifican en los aceites por año, así como la predicción para el futuro. Algunos analistas han identificado preliminarmente hasta 17.500 compuestos en un aceite.

Figura 2.

El número de compuestos identificados y cuantificados en los crudos por año.



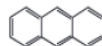




Nota. Fingas (2011)

Los hidrocarburos están compuestos por carbono y por hidrógeno, elementos fundamentales de los aceites. Además, los aceites incluyen variadas proporciones de azufre, nitrógeno y oxígeno, en ocasiones, también presentan sales minerales y trazas de metales como el níquel, vanadio y cromo (Fingas, 2011). En la Tabla 1, se presentan los principales componentes del petróleo.

Tabla 1.

Ejemplo de clases, nombres y componentes de hidrocarburos.

Grupos		Ejemplo de Clases, Nombres y Componentes		
	Clase química	Nombre alternativo	Descripción	Ejemplo
Saturados	Alcanos	Parafinas		Dodecano
	Ciclo de alcanos	Naftalenos	n - alcanos C18-C80	Decalina
	Ceras			
	Bencenos			Benceno 
Aromáticos	BTEX			
	PAHs	Benceno, tolueno, Etilbenceno, Xileno		Antraceno 
	Aromáticos de naftaleno	Combinación de aromáticos y cicloalcanos		Tetralina 
Resinas	Clase de compuestos polares en su mayoría anómalos que a veces contienen oxígeno, nitrógeno, azufre o metales			Carbazol 
Asfaltenos	Clase de grandes compuestos anómalos que a veces contienen oxígeno, nitrógeno, metales o azufre			Estructuras no conocidas

Nota. Adaptado de Fingas (2011)

2.2.2.2. Propiedades del petróleo

Las propiedades del petróleo discutidas aquí son viscosidad, densidad, gravedad específica, solubilidad, punto de inflamación, punto de fluidez, fracciones de destilación, tensión interfacial y presión de vapor. La Tabla 2 muestra las propiedades para los hidrocarburos señalados.

Tabla 2.
Propiedades típicas de los hidrocarburos.

Propiedad	Unidades	Gasolina	Diesel	Crudo ligero	Crudo Pesado	Aceite combustible intermedio	Búnker C
Viscosidad	mPa.s a 15°C	0.5	2	5 a 50	50 a 50,000	1000 a 15,000	10.000 a 50.000
Densidad	g/mL a 15°C	0.72	0.84	0,78 a 0,88	0,88 a 1,00	0,94 a 0,99	0,96 a 1,04
Punto de inflamabilidad	°C	-35	45	-30 a 30	-30 a 60	80 a 100	>100
Solubilidad en agua	ppm	200	40	10 a 50	5 a 30	10 a 30	1 a 5
Punto de fluidez	°C	NR	-35 a -10	-40 a 30	-40 a 30	-10 a 10	5 a 20
Gravedad API		65	35	30 a 50	10 a 30	10 a 20	5 a 15
Tensión interfacial	mN/m a 15°C	27	27	10 a 30	15 a 30	25 a 30	25 a 35
Fracciones de destilación % destilado a							
	100°C	70	1	2 a 15	1 a 10	—	—
	200°C	100	30	15 a 40	2 a 25	2 a 5	2 a 5
	300°C		85	30 a 60	15 a 45	15 a 25	5 a 15
	400°C		100	45 a 85	25 a 75	30 a 40	15 a 25
	residual			15 a 55	25 a 75	60 a 70	75 a 85

Nota. Adaptado de Fingas (2011)

2.2.3. Afectación a la salud humana o toxicología.

González & Vásquez (2022) indican que los vertidos de petróleo afectan el bienestar y la salud de aquellos que tienen contacto directo con los hidrocarburos o de manera indirecta mediante los procesos de biomagnificación y bioacumulación. Esto implica la transferencia del contaminante a lo largo de la cadena alimentaria mediante la ingesta, lo que repercute en la seguridad alimentaria.

Las personas expuestas a los hidrocarburos por ingestión o inhalación directa, o por el contacto con la piel pueden experimentar enfermedades respiratorias, dolor de cabeza, sensación de ardor, congestión nasal, dolor de garganta, sibilancias, mareos, dificultad para concentrarse, somnolencia, visión borrosa, pérdida de memoria, deterioro de la función renal, ataque cardíaco y efectos sobre los vasos sanguíneos, además, efectos negativos sobre la salud mental. Por ello es necesario el monitoreo de estos derrames mediante el estudio de la concentración de hidrocarburos residuales en las especies marinas, fluviales y terrestres utilizadas para el consumo humano que se ven afectadas por el derrame de petróleo (González y Vásquez 2022).

2.2.4. Afectación al medio ambiente o ecotoxicología.

La ecotoxicología se define como la rama científica que investiga el impacto de las sustancias y elementos químicos en los ecosistemas. Una particularidad de este campo es que se aplica el saber científico y las tecnologías que genera para abordar problemas ambientales específicos. Desde la perspectiva ecotoxicológica, en el evento de un vertido de hidrocarburos, las aguas se contaminan perjudicando a la biodiversidad, siendo los invertebrados marinos y algas las víctimas más infames. El periodo necesario para su rehabilitación y restauración es impredecible (V. Pulido et al., 2022).

El fitoplancton es el primero en sufrir el impacto negativo, ya que los hidrocarburos crean una barrera que impide la penetración de luz solar, esencial para su proceso fotosintético. Además, las microalgas unicelulares; vitales para los ecosistemas marinos por ser productores primarios y al estar al inicio de la cadena alimentaria, así como por su rol en la oxigenación del agua y en los ciclos biogeoquímicos de elementos tanto orgánicos como inorgánicos;

experimentan una drástica disminución poblacional en las primeras 24 horas tras la exposición a los hidrocarburos (Vera et al, 2008). El siguiente nivel afectado comprende a las macroalgas, que reducen su población significativamente en presencia de hidrocarburos por la reducción de actividad fotosintética y oxigenación, seguidamente, los invertebrados marinos, moluscos, crustáceos y poliquetos son intoxicados por los hidrocarburos muriendo por envenenamiento a las pocas horas de su exposición a dicho elemento, el siguiente nivel comprende fauna marina que integra lobos marinos, nutrias de mar y diversas especies de aves marinas que al tener contacto con el crudo de petróleo quedan atrapadas por dicha sustancia aceitosa, muriendo por envenenamiento, hipotermia y falta de oxígeno (V. Pulido et al., 2022).

2.2.5. Procesos de degradación del petróleo en el mar

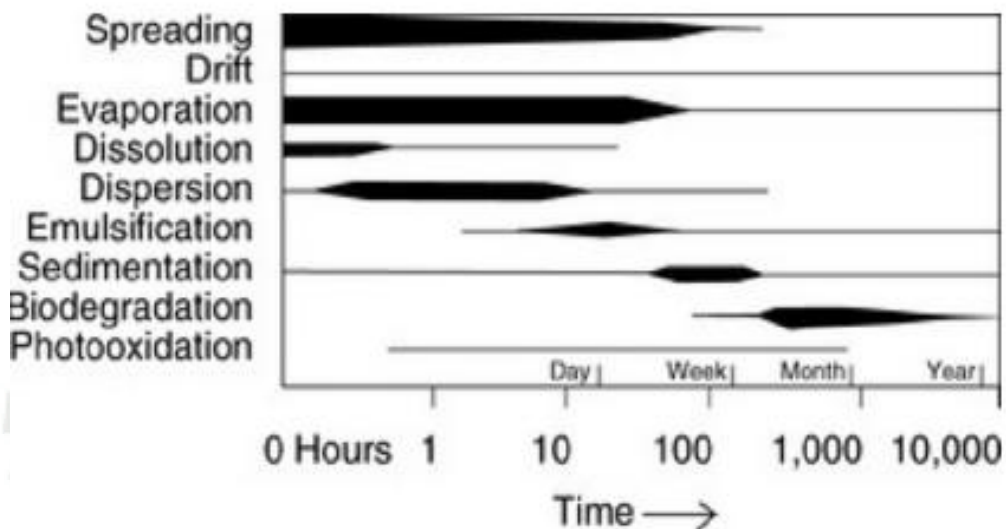
2.2.5.1. Meteorización del petróleo en el Mar

Químicamente, el petróleo crudo es un complejo de sustancias naturales (principalmente orgánicas). El componente básico (hasta el 98%) consiste en hidrocarburos alifáticos y cíclicos saturados e insaturados. En el mar, el sustrato de petróleo original desaparece rápidamente (en unas pocas horas o días) a medida que se descompone en fracciones (formas) en diferentes estados de agregación. Los agregados más comunes incluyen películas superficiales (slicks), formas disueltas y suspendidas, emulsiones (aceite en agua, agua en aceite), fracciones sólidas y viscosas precipitadas al fondo y compuestos acumulados en organismos marinos (Patin, 2013).

Los principales procesos, generalmente conocidos como meteorización, incluyen transporte físico, evaporación, disolución, emulsificación, sedimentación, biodegradación (descomposición por microorganismos) y oxidación (Figura 3).

Figura 3.

Procesos que actúan sobre una mancha de petróleo en función del tiempo posterior a un derrame. El grosor de línea indica la magnitud relativa de cada proceso.



Nota. Extraído de Patin (2013)

2.2.5.2. Degradación fotoquímica

La degradación fotoquímica de los componentes del petróleo, en películas superficiales delgadas expuestas a la luz solar representa un proceso relevante en los accidentes ocurridos por vertidos de petróleo en el mar. La irradiación con luz solar de las mezclas de petróleo erosionado degrada las moléculas de hidrocarburos aromáticos grandes y genera especies oxidadas con mayor solubilidad en el agua que los compuestos originales (King et al., 2014).

Los PAH se fotodegradaban fácilmente, mientras que los n-alcanos más grandes generalmente eran resistentes a la fotodegradación. La irradiación de la luz solar del petróleo en películas delgadas superficiales facilita la biodegradación de las mezclas meteorizadas, pero también aumenta la toxicidad del agua de mar en contacto con el petróleo debido a la mayor liberación de fotoproductos tóxicos solubles en agua (Ray et al., 2014).

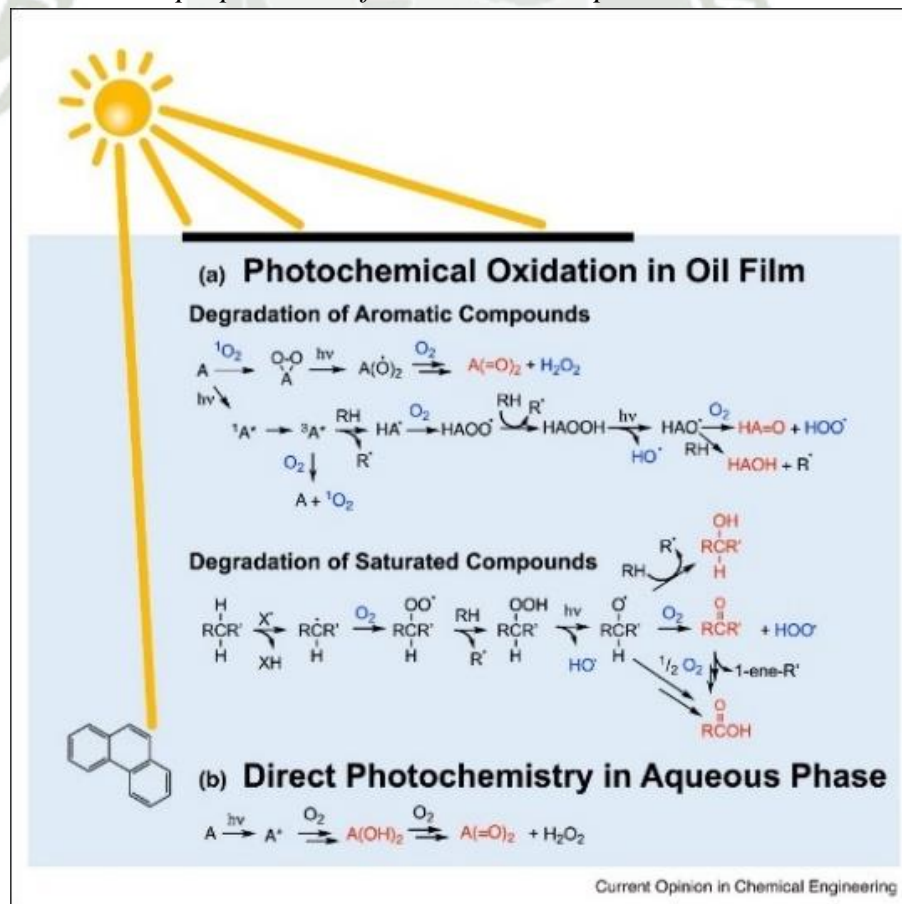
La Figura 4 presenta las vías principales de las reacciones fotoquímicas indirectas en una película de petróleo. Un compuesto absorbente de luz (por ejemplo, un PAH) absorbe la luz solar y puede producir oxígeno (O_2) o realizar una extracción de hidrógeno para formar un radical HA que reacciona

con el oxígeno y finalmente se transforma en productos oxigenados. Alternativamente, un compuesto aromático A reacciona con $^1\text{O}_2$ y produce compuestos oxigenados. Varias especies de radicales se generan durante estas reacciones. Estas especies de radicales inician la transformación de compuestos saturados, dando lugar a alcoholes (ROH), cetonas (R=O) y ácidos carboxílicos (R=OOH).

En la Figura 4 se muestra la fase acuosa, los PAH disueltos pueden absorber directamente la luz solar para alcanzar estados excitados electrónicamente, que pueden reaccionar con el oxígeno para formar compuestos oxigenados. Según la figura “A” es un aceptor de oxígeno o fotosensibilizador, RH es una especie de hidrógeno activo, R* representa una especie de radical orgánico que puede realizar la extracción de hidrógeno de compuestos saturados; las especies en azul son intermedios reactivos y los compuestos en rojo son fotoproductos de la degradación del petróleo.

Figura 4.

Mecanismos propuestos de fotooxidación del petróleo en el Mar.



Nota: Extraído de Aepli (2022)

2.2.5.3. Degradación Microbiológica

Los microorganismos nativos que descomponen hidrocarburos juegan un rol esencial en la biorremediación (Varjani et al., 2015). Se ha documentado que tanto las bacterias como los hongos y algunos tipos de algas tienen la habilidad de descomponer compuestos de carbono como los hidrocarburos. Especialmente, las bacterias actúan como principales degradadoras y son los agentes más eficientes en el proceso de descomposición de los agentes contaminantes derivados del petróleo. (Meckenstock et al., 2016).

Algunos microorganismos tienen la capacidad de degradar alifáticos, algunos pueden degradar monoaromáticos o poliaromáticos mientras que otros degradan resinas. Los microorganismos que degradan los contaminantes de hidrocarburos de petróleo y el tipo de hidrocarburo degradado por ellos se enumeran en la Tabla 3 se muestra especies bacterianas, hongos y levaduras que juegan un rol fundamental en la descomposición de los contaminantes de TPH. Es muy importante evaluar la biodegradación a la luz de una comunidad multidominio para comprender el potencial metabólico completo de la comunidad microbiana autóctona (Varjani, 2017).

Tabla 3.
Microorganismos degradadores de contaminantes de hidrocarburos de petróleo

Compuesto de hidrocarburo de petróleo	Nombre del microorganismo
Alifáticos	<i>Acinetobacter</i> sp.
	<i>Alcanivorax</i> sp .
	<i>Azoarcus</i> sp.
	<i>Bacilo</i> sp.
	<i>Brevibacterium</i>
	<i>Desulfosarcina</i> sp.
	<i>Desulfococcus</i> sp .
	<i>Marinobacter</i> sp .
	<i>Micrococcus</i> sp.
	<i>Ochrobactrum</i> sp.

Compuesto de hidrocarburo de petróleo	Nombre del microorganismo
	<p><i>Oleispira</i> sp. <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Rhodococcus</i> sp. <i>Stenotrophomonas</i> sp. <i>Thalassolitus</i> sp. <i>Aspergillus</i> sp. <i>Cándida</i> sp. <i>Penicillium</i> sp . <i>Pseudozyma</i> sp. <i>Acinetobacter</i> sp. <i>Un arqueoglobos brillante</i> <i>Aceite aromático</i> <i>Bacilo</i> sp.</p>
Monoaromáticos	<p><i>Halomonas</i> sp. <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Rhodococcus</i> sp. <i>Sphingobacterium</i> sp. <i>Achromobacter inusual</i> <i>Bacilo</i> sp. <i>Cycloclasticus</i> sp.</p>
Poliaromáticos	<p><i>Phanaerochaete chrysosporium</i> <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Vibrio</i> sp. <i>Penicillium janthinellum</i> <i>Pseudomonas</i> sp.</p>
Resinas	<p>Miembro de la familia <i>Vibrionaceae</i>, Miembros de la familia <i>Enterobacteriaceae</i>, <i>Moraxella</i> sp.</p>

Nota. Adaptado de Varjani (2017)

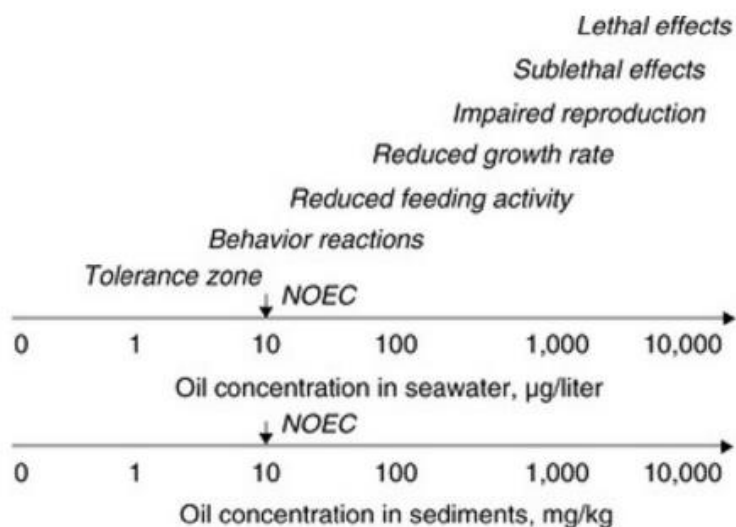
2.2.6. Impacto ambiental del derrame de petróleo

2.2.6.1. Impacto ambiental en el Mar

En un enfoque ecotoxicológico, el petróleo es un tóxico complejo multicomponente con efectos inespecíficos. Su componente básico es un grupo de los hidrocarburos aromáticos (PAH) más solubles y tóxicos. Los PAH de alto peso molecular con cinco o más anillos de benceno pueden producir efectos cancerígenos, especialmente en organismos bénticos, que habitan en sedimentos del fondo muy contaminados. Las respuestas primarias de la biota marina expuesta a niveles de fondo de PAH pueden detectarse de forma fiable mediante métodos bioquímicos específicos. Para diferentes grupos de biota marina, las concentraciones tóxicas de petróleo (principalmente hidrocarburos aromáticos) en ecosistemas marinos y en los remanentes sedimentarios del fondo varían en varios órdenes de magnitud. Estas diferencias son más pronunciadas en las comunidades bénticas de las zonas costeras contaminadas por hidrocarburos, incluidas aquellas afectadas por derrames (Patin, 2013). La Figura 5 representa una secuencia simplificada de respuestas biológicas en la biota marina, dependiendo de la cantidad de petróleo concentrada en el agua de mar y los sedimentos del fondo.

Figura 5.

Desarrollo de efectos y respuestas característicos en la biota marina, en función de las concentraciones de petróleo en el agua de mar y en los sedimentos del fondo.

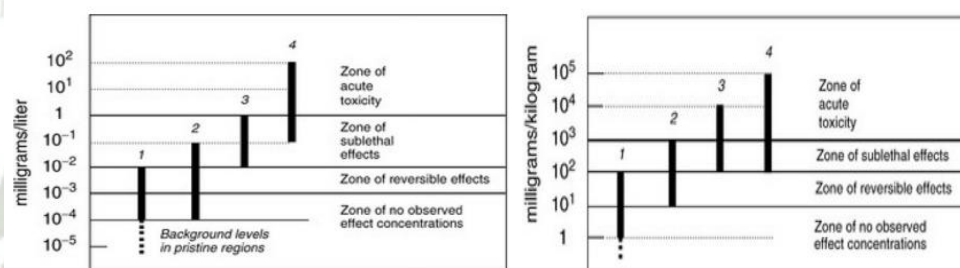


Nota. Extraído de Patin (2013)

Las áreas de los océanos en todo el mundo se dan en la Figura 6. Los límites superiores de la zona con "concentración sin efecto observado" (NOEC) y la zona de efectos reversibles, en la que las reacciones biológicas están ausentes o se manifiestan como respuestas fisiológicas y bioquímicas primarias, se encuentran dentro de los rangos de 10³ a 10² mg/l en agua de mar y 10–100 mg/kg en sedimentos del fondo. Estos rangos pueden considerarse aproximadamente como los límites de las concentraciones máximas permisibles (seguras) de TPH disueltos en el mar y acumulados en los sedimentos del fondo, respectivamente.

Figura 6.

Desarrollo de efectos y respuestas característicos en la biota marina, en función de las concentraciones de petróleo en el mar y en los remanentes sedimentarios.



Nota: Extraído de Patin (2013)

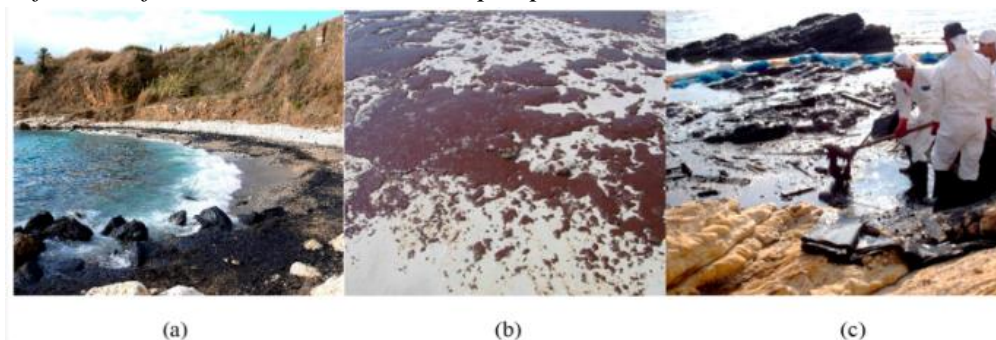
2.2.6.2. Impacto ambiental en las costas

Principalmente en las costas, el petróleo derramado se transporta a través de las olas del agua como petróleo liviano fresco, brillos delgados y petróleo residual (petróleo erosionado), cuando se mezcla con agua, el aceite residual se conoce como una mezcla emulsionada que presenta una alta viscosidad y puede resistir más el proceso de meteorización (Bhattacharjee & Dutta, 2022)

Este tipo de emulsión generado en las costas tiene un efecto sofocante en el hábitat costera durante la marea baja. La meteorización, en particular la oxidación, reduce la gruesa capa de aceite residual en pequeños grumos, a menudo llamados bolas de alquitrán (Suneel et al., 2019). En la Figura 7 se pueden observar ejemplos de otras formas de residuos de petróleo, como manchas de alquitrán, manchas de petróleo y láminas de petróleo en las costas.

Figura 7.

Diferentes formas de contaminación por petróleo en varias costas.



Nota. (a) Hoja de petróleo junto con bolas de alquitrán en una playa de grava, playa sur, Líbano, (b) Masa pegajosa de petróleo derramado en una playa de arena (c) Limpieza de una playa rocosa en Líbano derrame de petróleo por parte de los trabajadores.

En algunas condiciones, las olas que rompen en las costas pueden mezclar el crudo flotante con arena o sedimentos que están suspendidos en la zona de oleaje, formando aglomerados microscópicos y macroscópicos de varios tamaños (Gao et al., 2018). Los aglomerados de petróleo de sedimentos macroscópicos (APM) varían desde unos pocos centímetros hasta varios metros, clasificado como una capa aceitosa (>40 % de petróleo) y arenosa (<40 % de petróleo).

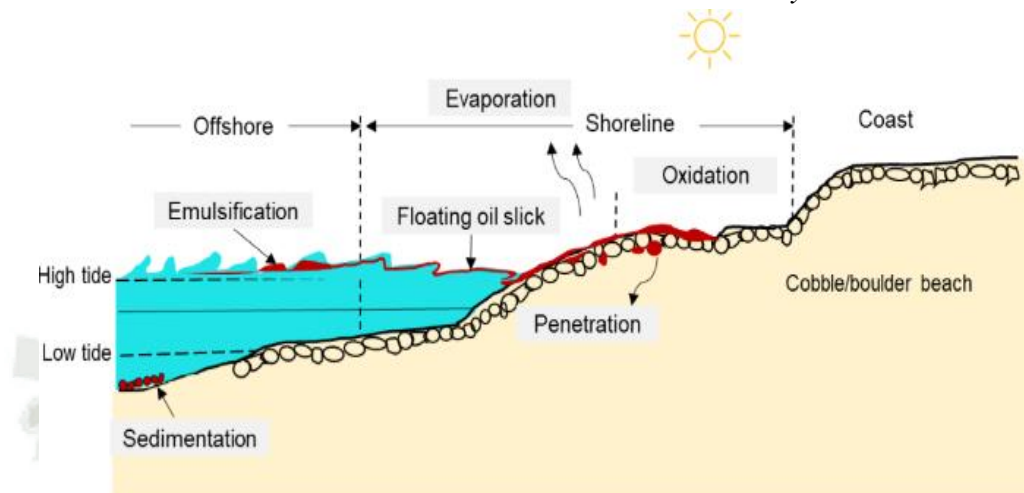
Muchas veces los hidrocarburos residuales pueden penetrar, según la porosidad relacionada con el sedimento, la viscosidad del hidrocarburo y la presencia de madrigueras de animales en la costa (Challenger et al., 2021). La permeabilidad y la penetración son altas para playas con sedimentos grueso con porosidad efectiva: 0,12–0,46; para sedimentos finos que tienen la misma porosidad efectiva, la penetración es baja pero la carga residual es alta. Estos sedimentos gruesos pueden formar una capa de petróleo superficial o subterránea que puede persistir durante más tiempo (Taylor et al., 2021).

Las variaciones espaciales y temporales influyen en la removilización de sedimentos en las costas a través de la energía de mezcla. El movimiento dependerá de la energía de las olas y de las características físicas del sedimento. En ambientes de energía relativamente baja, el petróleo varado que se adhiere a la superficie del sedimento puede formar pavimentos de asfalto (Wang et al., 2021). Si el petróleo residual en la costa no se transforma

significativamente después de varias olas y mareas de alta energía, se considera que hay retención. La Figura 8 ilustra algunos de los procesos de meteorización importantes en las costas.

Figura 8.

Dinámica de la interacción entre el derrame en las costas y los sedimentos.



Nota. Asif et al. (2022)

2.2.7. Estrategias para la mitigación de vertidos de petróleo en la costa

2.2.7.1. Métodos proactivos para proteger las costas de los derrames de petróleo

2.2.7.1.1. Barreras flotantes

Las costas pueden protegerse con barreras flotantes o barreras que delimiten la propagación de las mareas negras. Los materiales de estas barreras son de metales, plástico y otros, por lo que permite desviar el petróleo de hábitats sensibles y contenerlo en el espacio confinado por la barrera (Dhaka & Chattopadhyay, 2021). Si bien esta técnica es más efectiva en el mar antes de que la mancha se extienda por un área grande, en algunas situaciones puede usarse para reducir la contaminación de secciones específicas en la costa o el área costera (Grubestic et al., 2019). Con oleajes de alta energía pueden hacer que las barreras sean ineficaces y, por lo tanto, su éxito depende de diversos factores ambientales, así como del tamaño, forma y características de las barreras (Etkin & Nedwed, 2021). También se pueden usar adsorbentes de petróleo actuando como

esponjas hidrofobas para absorber el petróleo.

2.2.7.1.2. *Skimmers*

Los skimmers (embarcaciones u otros dispositivos autopropulsados) es un método que se utilizan con frecuencia con sistemas de barreras para recuperar físicamente el petróleo de la superficie de cuerpos de agua antes de arribar a las costas (Iskander et al., 2021). La eficacia de los skimmers depende de las condiciones del oleaje y del tiempo en calma.

2.2.7.1.3. *Dispersantes químicos*

Los dispersantes químicos, se pueden rociar a través de aviones y barcos para romper la mancha en gotas más pequeñas del petróleo y así mejorar la dilución y dispersión a concentraciones por debajo de los límites del umbral de toxicidad. Recientemente, White & Karras, (2021) proporcionaron ejemplos de dispersantes modernos (p. ej., "Corexit ® EC9500A" y "Finasol ® OSR 52") formulados con componentes químicos menos tóxicos para superar el riesgo potencial asociado con la toxicidad ecológica de los dispersantes.

2.2.7.2. Limpieza actual de petróleo en la costa

En caso de que una marea negra llegue a la costa, se pueden emplear diferentes técnicas de limpieza para recuperar el petróleo y evitar su impacto en los recursos de la costa. Se pueden construir barreras físicas en tierra para evitar el transporte de petróleo a un recurso sensible como humedales o manglares y así contener el petróleo para su posterior remoción (Lim et al., 2016). Una de las limitaciones en la construcción de tales barreras físicas es la perturbación del ecosistema costero que puede ser afectado potencialmente a los hábitats que dependen de su exposición a los movimientos de las mareas pudiendo alterar los sedimentos y la vegetación cercana a la costa (Iskander et al., 2021).

Los métodos mecánicos para remoción de petróleo remueven una gran cantidad de material con petróleo incluyendo sedimentos manchados (Feng

et al., 2021). La Figura 9 presenta el lavado a presión es un método que suministra agua bombeada de baja a alta presión a través de mangueras. Sin embargo, la alta presión del agua puede causar la destrucción del hábitat debido a la pérdida de sedimentos, la erosión de las superficies rocosas blandas, etc. (IPIECA-IOGP, 2016).

Figura 9.

Limpieza de rocas impregnadas de petróleo.



(a)



(b)

Nota. (a) mangueras de alta presión luego del vertido de petróleo del Exxon Valdez en 1989 en Prince William Sound, Alaska; (b) Petróleo pesado aspirado de una playa de arena después del derrame de petróleo de 1993, Bahía de Tampa. Extraído de (Asif et al., 2022)

El uso de este método solo se recomienda su uso en costas rocosas y de grava, en áreas muy contaminadas por hidrocarburos y donde el hidrocarburo ha penetrado en los sedimentos de grava. Existe la preocupación de que el lavado con agua caliente a alta presión (27–100 °C) pueda ser perjudicial, provocando la muerte directa de las poblaciones residentes, empujando el petróleo hacia los sedimentos de la costa donde queda atrapado y puede arrastrar la arena fina de la playa o limo (Iskander et al., 2021).

2.2.8. Tratamiento de aguas residuales

El agua, un recurso infinito y esencial que sustenta la vida, cubre más del 70% de la superficie terrestre en nuestro hermoso planeta. Sin embargo, solo el 3% de esta vasta cantidad de agua es dulce, y apenas el 0.06% está fácilmente

accesible para el consumo humano. En la naturaleza, el agua se encuentra en sus estados líquido, sólido y gaseoso. A temperatura ambiente, es insípida, inodora e incolora, con un leve matiz azul. Es reconocida como uno de los solventes más efectivos, con la capacidad de disolver más sustancias que cualquier otro líquido, lo que le otorga el título de "solvente universal". Estas propiedades solventes han influido significativamente en la pureza y las características del agua (Fernández, 2012).

La estructura única del agua, compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, le confiere diversas características que la convierten en el solvente ideal. Por ejemplo, los dos átomos de hidrógeno, con cargas positivas, se encuentran en un extremo del átomo de oxígeno, que posee una carga negativa (Brenes & Rojas, 2005).

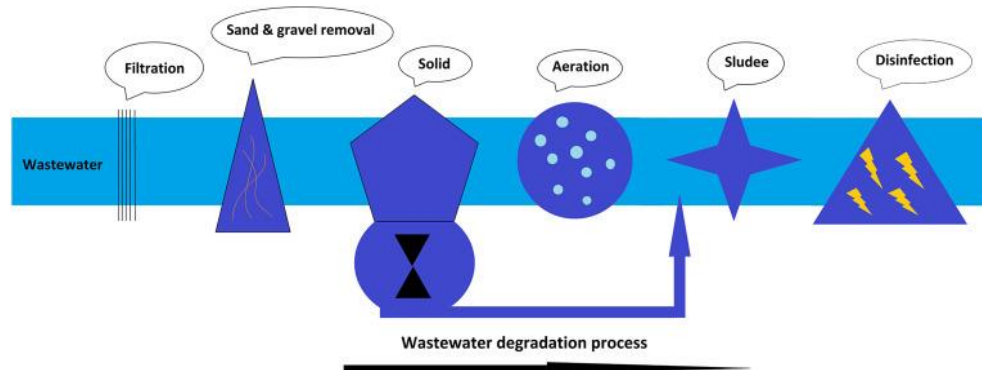
La escasez de agua es una de las consecuencias más preocupantes del cambio climático. El aumento de la temperatura global ha generado períodos de sequía más frecuentes en distintas partes del mundo, lo que ha llevado a que la escasez de agua sea un problema cada vez más relevante (AghaKouchak et al., 2015), por ello es esencial contar con herramientas de medición precisas para monitorear y neutralizar la composición química de las aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales puede convertirse en una valiosa fuente de agua en términos de cantidad y calidad, aunque antes de su uso, requiere de un proceso adecuado. Existen diferentes tipos de aguas residuales (domésticas, industriales y superficiales), cada una con sus propias técnicas de tratamiento para eliminar la contaminación. Es crucial comprender los procesos de tratamiento de aguas residuales para identificar el método más eficaz en cuanto a costo y tiempo, y así obtener conclusiones fundamentadas (Shojaei & Shojaei, 2021).

2.2.8.1. Métodos de tratamiento de aguas

El tratamiento de aguas residuales comprende una variedad de técnicas diseñadas por el ser humano para la generación, purificación y separación de desechos en el agua residual (Sonune & Ghate, 2004). En la Figura 10 se presentan ejemplos ilustrativos de estos procesos de tratamiento de aguas residuales.

Figura 10.
Proceso de degradación de aguas residuales.



Nota: Shojaei y Shojaei (2021)

2.2.8.2. Tipos de tratamiento de aguas

Al tratar aguas residuales se debe tener en cuenta el tiempo, la energía y el costo del proceso. Cualquier método que pueda optimizar el proceso de purificación de aguas residuales es relevante para conseguir el desarrollo sostenible a través de la reducción del consumo energético tanto mediante el uso de métodos físicos, químicos y biológicos (Shojaei & Shojaei, 2021).

a. Tratamiento físico de aguas residuales

El tratamiento mecánico de aguas residuales constituye una de las modalidades de tratamiento más comunes. Este enfoque se basa en el uso de procesos mecánicos fundamentados en principios físicos para eliminar los contaminantes presentes. Dichas operaciones físicas suelen ser directas y, en términos de eficiencia, superan a otros métodos de tratamiento de aguas residuales. La filtración, que constituye el primer paso en cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales, se encarga de eliminar los contaminantes no biodegradables que ingresan a una planta de tratamiento de aguas residuales (Shojaei & Shojaei, 2021).

b. Tratamiento químico de aguas residuales

En este método se utilizan productos químicos e incluye la separación o conversión de contaminantes como resultado de una reacción química. Este método de tratamiento es muy costoso. Todos los investigadores buscan nuevos métodos para reducir muchos pasos del tratamiento

químico, o esperan obtener los mejores resultados utilizando la cantidad óptima de productos químicos (contaminación). De esta forma, el objetivo de la neutralización es controlar la cantidad de pH. De esta manera, la dilución de entrada tiene un pH ajustado al rango óptimo para acelerar los metales como hidróxidos (Shojaei & Shojaei, 2021).

c. Tratamiento biológico de aguas residuales

El último método para tratar aguas residuales es conocido como tratamiento biológico de aguas residuales. Es frecuente el uso de microorganismos en este proceso. Los métodos basados en actividades biológicas se dividen en dos partes, aeróbicas y anaeróbicas. Se utilizan para eliminar sustancias biodegradables, solubles, orgánicas y nutrientes, y coloides. Aunque el tratamiento biológico no está totalmente comprendido en la intersección de la biología y la bioquímica, se basa en el uso de bacterias y nematodos para descomponer los desechos orgánicos a través de procesos celulares normales. La finalidad es crear un sistema que permita recoger fácilmente los productos de la descomposición para tener acceso adecuado a ellos (Sahu et al. 2021).

2.2.9. Tratamientos electroquímicos de aguas contaminadas con petróleo

La extracción de petróleo y gas en alta mar se realiza mediante complejos de plataformas, donde el agua que se extrae junto con el crudo se conoce como agua producida. Esta agua contiene diversos componentes, como sales, aceites y grasas, hidrocarburos poliaromáticos (PAH), fenoles, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, entre otros (Al-Ghouti et al., 2019).

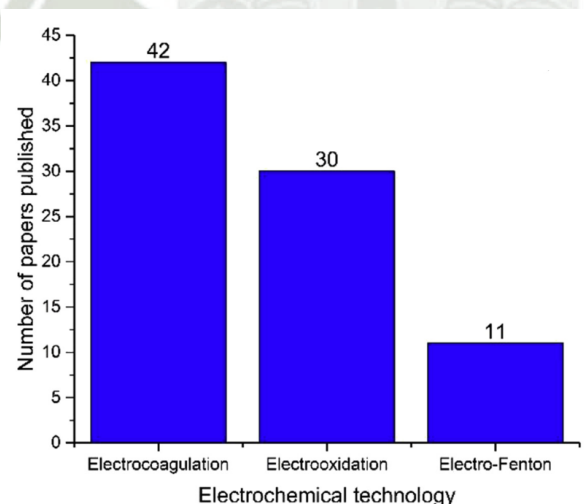
Como se ilustra en la Figura 11, la tecnología electroquímica ha sido ampliamente aplicada, tanto a nivel de laboratorio como a escala piloto, para tratar diferentes efluentes de la industria petrolera. Esto se debe a que la electrodisolución de ánodos de sacrificio, comúnmente de aluminio o hierro, produce flóculos (precipitados amorfos de hidróxidos, óxidos u oxihidróxidos de especies metálicas), junto con la generación de hidrógeno e iones hidroxilo (OH-) en el cátodo (Shahedi et al., 2020). Estos contribuyen a la separación efectiva de aceites, coloides y sólidos en suspensión mediante mecanismos de

neutralización de carga, atrapamiento y adsorción, seguidos de su precipitación o flotación, que son los principales constituyentes de estos efluentes (García-Segura et al., 2017).

La evaluación del rendimiento de los procesos electroquímicos en términos de eliminación de contaminantes orgánicos generalmente se realiza mediante la demanda química de oxígeno (DQO), el carbono orgánico total o los hidrocarburos totales de petróleo (TPH). Sin embargo, la cuantificación de fenoles, PAH o benceno, tolueno, etilbenceno y xileno podría proporcionar una mejor perspectiva sobre la eliminación de los diferentes constituyentes orgánicos de estos efluentes. La combinación de los mecanismos que contribuyen a la remoción de sólidos en suspensión y contaminantes inorgánicos también favorece la remoción de compuestos orgánicos durante la aplicación de técnicas electroquímicas (García-Segura et al., 2017).

Figura 11.

Número de publicaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales de la industria petrolera mediante electroquímica.



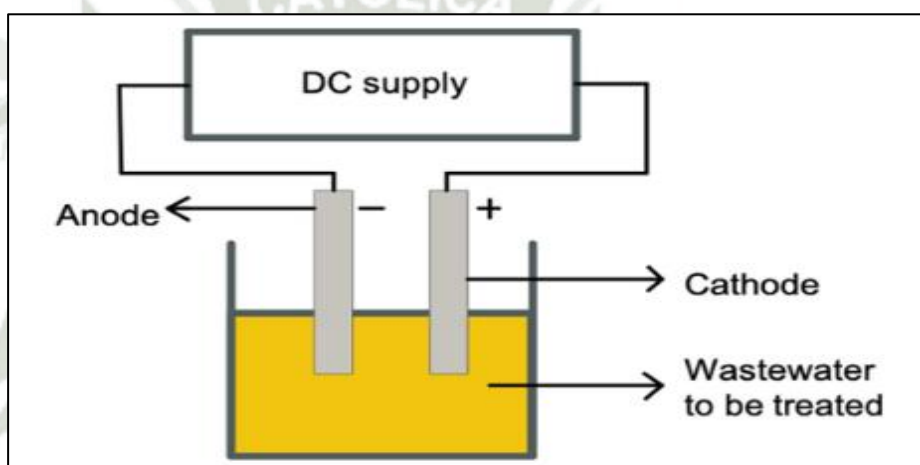
2.2.9.1. La Electrocoagulación

La electrocoagulación se fundamenta en el proceso físico-químico de coagulación de sistemas coloidales inducido por una corriente eléctrica continua, tal como se representa en la Figura 12. Durante la electrólisis de aguas residuales con ánodos de acero o aluminio, se produce la disolución

electroquímica del metal anódico. Los cationes de aluminio y hierro disueltos se hidrolizan y funcionan como coagulantes, iniciando así la adhesión y fusión de las partículas. En términos generales, la coagulación implica la pérdida de estabilidad de los agregados en sistemas dispersos, lo que conlleva a la separación de fases. Mediante el proceso de electrocoagulación, es posible eliminar una amplia variedad de contaminantes del agua (García et al., 2017).

Figura 12.

Diagrama esquemático del diseño de un electrocoagulador.

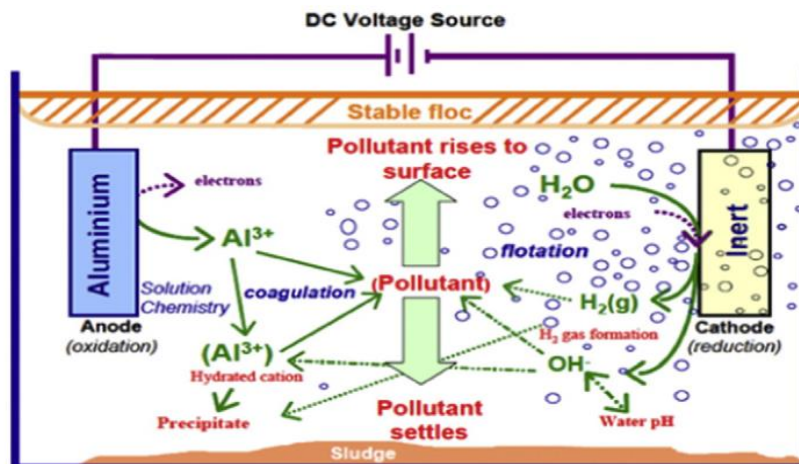


Nota. Tahreen et al. (2020)

La electrocoagulación (EC) integra diversos mecanismos que abarcan aspectos electroquímicos (como la disolución de metales y la reducción del agua, la electrooxidación o electrorreducción de contaminantes), químicos (involucrando equilibrios ácido-base con cambios de pH, la precipitación de hidróxidos y reacciones redox en masa) y físicos (como la adsorción física, coagulación y flotación). Estos mecanismos pueden ocurrir de manera secuencial y/o simultánea. La Figura 13 resume estos procesos, resaltando la complejidad y la interacción entre los diferentes mecanismos de la EC. A continuación, se detallan estos mecanismos en mayor profundidad.

Figura 13.

Interacciones que ocurren en el reactor del electrocoagulador.



Nota. Hakizimana et al., (2017)

2.2.9.2. Procesos involucrados en la electrocoagulación

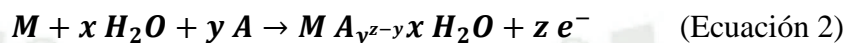
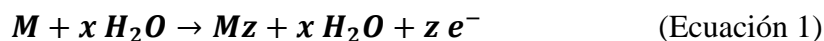
Existen 7 procesos involucrados en la electrocoagulación, los cuales son:

- ✓ Producción de cationes metálicos en los ánodos mediante la aplicación de corriente eléctrica.
- ✓ Hidrólisis en el cátodo generando iones hidroxilo.
- ✓ Reacción entre cationes metálicos e iones hidroxilo para formar hidróxidos metálicos.
- ✓ Oxidación de contaminantes tóxicos en productos intermedios.
- ✓ Neutralización de la carga de los contaminantes mediante la reacción con los hidróxidos metálicos.
- ✓ Adsorción de los contaminantes con carga neutralizada en los hidróxidos metálicos, lo que conduce a su eliminación mediante coagulación por barrido.
- ✓ Formación de gas H_2 en el cátodo, que eleva los flocos a la superficie de la solución mediante flotación por barrido.

El proceso de electrólisis del agua puede provocar la producción de gas, lo cual puede llevar a que algunos contaminantes coagulados asciendan hacia la superficie. Además, las especies aglomeradas podrían absorber otras especies. El potencial eléctrico aplicado entre los electrodos intensifica el proceso de adsorción, facilitando así la separación y eliminación de la mayoría de las especies en suspensión.

2.2.9.2.1. Reacciones químicas en la electrocoagulación

La disolución general de un metal anódico, que resulta en la formación de iones hidratados simples y iones metálicos complejos, se puede expresar de la siguiente manera (Shestakova & Sillanpaa, 2017):

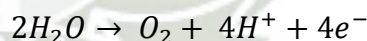
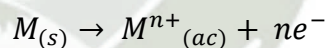


La cantidad de metal disuelto en la electrólisis está determinada por la ley de Faraday:

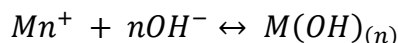
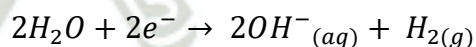
$$m = CE \frac{ltM}{Fz} \quad (\text{Ecuación 3})$$

El mecanismo de disolución electroquímica de metales involucra dos procesos distintos: la disolución anódica del metal bajo la aplicación de corriente eléctrica y la disolución química debido a la interacción del metal con el entorno. Las reacciones químicas, que tienen lugar en el proceso de electrocoagulación, se presentan mediante las siguientes reacciones principales (Ihan et al., 2007)

Oxidación en el ánodo:

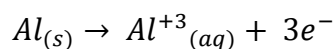


Reducción en el cátodo:

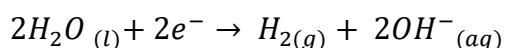


Las reacciones generales para electrodos de aluminio son las siguientes

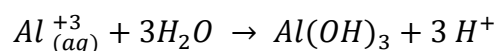
En la superficie del ánodo:



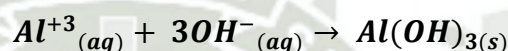
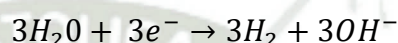
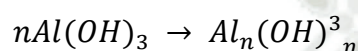
En la superficie del cátodo:



En general:



En este caso, las reacciones dan lugar a la generación de iones de aluminio (Al^{+3}) en el ánodo, e iones hidróxido (OH^-) en el cátodo, posteriormente los iones de aluminio reaccionan con los iones hidróxido y el agua, presentes en la solución para formar especies de hidróxido metálico, como el hidróxido de aluminio $Al(OH)_3$.



Los iones Al^{+3} recién formados actúan como coagulantes altamente eficaces para flocular partículas. Los iones de aluminio hidrolizados tienen la capacidad de formar extensas redes de Al-O-Al-OH, lo que les permite adsorber contaminantes químicos. La calidad final del agua tratada mediante electrocoagulación se ve afectada por diversos factores, como los materiales del ánodo, la distancia entre los ánodos, el caudal de agua entre los electrodos, la temperatura, el pH, la composición catiónica y aniónica del medio, la frecuencia de cambio de polaridad y la densidad de corriente, entre otros. A continuación, se detalla la influencia de estos parámetros en el proceso de electrocoagulación. (Alcivar & Rodriguez, 2020).

2.2.9.3. Factores que afectan la electrocoagulación (EC)

Los factores que influyen en la eficiencia de la electrocoagulación (EC) están asociados con las condiciones de operación, incluidos aspectos como la intensidad de corriente o el voltaje, el tiempo de funcionamiento, así como las propiedades del agua o aguas residuales, como el pH, la alcalinidad y la conductividad. Además, la geometría del reactor EC y los electrodos EC, que incluyen la superficie del electrodo y el espacio entre electrodos, también desempeñan un papel crucial en el proceso, (Hakizimana et al., 2017).

2.2.9.3.1. Densidad de corriente

La intensidad de corriente, representada por I , constituye un parámetro esencial en el proceso de electrocoagulación, a menudo diseñado en función de la densidad de corriente, que se define como la relación entre la corriente y el área de la superficie del electrodo. La ecuación de continuidad asegura la conservación de la corriente entre el ánodo y el cátodo, lo que puede resultar en diferentes densidades de corriente entre los electrodos (Hakizimana et al., 2017). Esta densidad de corriente determina la cantidad de coagulante liberado en el ánodo y la generación de gas hidrógeno (H_2) en el cátodo, según la ley de Faraday. Además, la densidad de burbujas influye en la dinámica hidrodinámica del sistema, lo que a su vez impacta en la transferencia de masa entre microburbujas de contaminantes, coagulantes y gases, afectando así la velocidad de colisión de las partículas coaguladas, lo que conduce a la formación de flóculos (Holt et al., 2002).

La densidad de corriente también incide en las especies de metales hidrolizados debido a los cambios en el pH durante el proceso de electrocoagulación, en función de la alcalinidad del agua. De este modo, la corriente crea un entorno dinámico físico/químico que influye directamente en los mecanismos de coagulación/floculación (Harif & Adin, 2011) y promueve la electromigración de iones y coloides cargados.

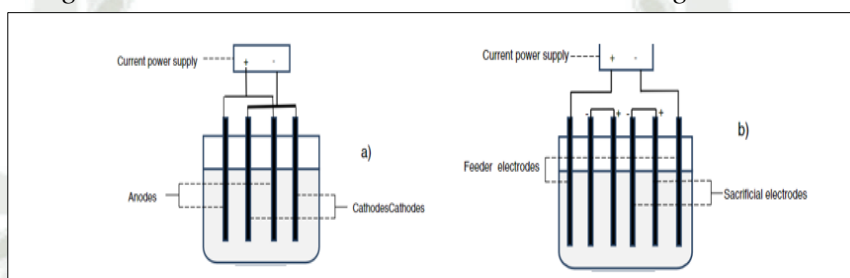
2.2.9.3.2. Tipo y arreglo de electrodos

La eficacia del proceso EC puede ser influenciada por el sistema de electrodos, que implica la disposición y la distancia entre ellos (ver Figura 14). Esta disposición puede variar desde un simple conjunto de ánodo y cátodo hasta un arreglo más complejo con múltiples ánodos y cátodos dispuestos de forma intrincada en la celda de electrocoagulación. Los arreglos complejos de electrodos se clasifican en electrodos monopolares y bipolares. Además de los populares electrodos rectangulares, existen otras formas

geométricas, como circulares o cilíndricas. Estos electrodos pueden ser ubicados tanto vertical como horizontalmente dentro de la celda de electrocoagulación (Fouad et al., 2009). Aunque los electrodos horizontales rara vez se utilizan, en los reactores de lotes de EC pueden mejorar la eficiencia de mezcla (Harif & Adin, 2011).

Figura 14.

Arreglos de los electrodos del sistema de electrocoagulación.



Nota: Hakizimana et al. (2017)

2.2.9.3.3. Tipo de fuente de alimentación

Se suele utilizar una fuente de alimentación de Corriente Continua (CC) en las células de electrocoagulación. No obstante, este tipo de corriente puede ocasionar la oxidación o el desgaste del ánodo, así como la creación de una capa de óxido en el cátodo, un fenómeno conocido como pasivación catódica. Esta pasivación genera un incremento en el potencial pasivo en comparación con el potencial, lo que resulta en un mayor consumo de energía. Además, la capa pasiva reduce el flujo de corriente entre los dos electrodos, disminuyendo así la eficiencia de la electrocoagulación. Según Yang y colaboradores (2014), el problema de la pasivación podría abordarse añadiendo una cantidad adecuada de iones de cloruro, los cuales descomponen la capa pasiva, o aplicando una corriente pulsada alterna (APC), que previene la formación de la capa pasiva cuando se utilizan electrodos de aluminio o hierro (Alcivar & Rodriguez, 2020).

2.2.9.3.4. Efecto de la conductividad del agua

La eficiencia de la densidad de corriente está estrechamente ligada

a la conductividad y la fuerza iónica del agua o aguas residuales. A medida que aumenta la conductividad electrolítica, la eficiencia de la densidad de corriente también aumenta debido a la reducción de la resistencia óhmica en el agua residual. Esto, a su vez, disminuye el tiempo necesario para alcanzar un determinado rendimiento de eliminación, lo que resulta en un menor consumo de energía (Chou, 2010). El cloruro de sodio (NaCl) se emplea con frecuencia para aumentar la conductividad electrolítica. Además de mejorar la conductividad, los aniones cloruro también ayudan a mitigar los efectos adversos de otros aniones, evitando la precipitación de carbonato de calcio en aguas duras, lo que podría dar lugar a la formación de una capa aislante en la superficie de los electrodos (Chou, 2010). En condiciones de densidades de corriente muy altas, los aniones cloruro también pueden oxidarse para formar formas activas de cloro, como los aniones de hipoclorito, que tienen la capacidad de oxidar compuestos orgánicos (Koby et al., 2003) y iones ferrosos, además de contribuir a la desinfección del agua o aguas residuales. Se recomienda que aproximadamente el 20% de los aniones presentes sean de cloruro para garantizar un funcionamiento adecuado de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales.

2.2.9.3.5. Tiempo de electrocoagulación

La eficacia en la eliminación de contaminantes está estrechamente relacionada con el tiempo de electrocoagulación (ECT_{time}). Con intervalos más extensos, se alcanza una mayor tasa de eliminación de contaminantes, ya que se generan más coagulantes metálicos y flóculos a una densidad de corriente constante (Naje et al., 2017). Sin embargo, la eficacia de la electrocoagulación alcanza un punto de saturación en marcos temporales específicos, ya que las tasas de eliminación de contaminantes se estabilizan debido a la ocupación de los sitios activos que forman flóculos de contaminantes coagulados (Lekhlif et al., 2014). Es crucial optimizar el tiempo de electrocoagulación, dado que la tasa de eliminación de

contaminantes se ve influenciada por la duración de la electrólisis, con el fin de evitar pérdidas de energía y recursos.

2.2.9.3.6. pH del agua:

El pH del agua afecta la carga superficial de los electrodos y la formación de especies químicas, lo que a su vez influye en la coagulación y floculación de los contaminantes. Generalmente, un pH cercano al punto de neutralización de los hidróxidos metálicos favorece la formación de coágulos (Koby et al, 2003).

2.2.9.3.7. Geometría del reactor EC:

La geometría del reactor, incluido el tamaño y la forma, puede influir en la distribución del campo eléctrico y en la eficiencia del proceso de electrocoagulación. Un diseño adecuado del reactor puede promover una distribución uniforme del campo eléctrico y una interacción efectiva entre los electrodos y el agua (Hakizimana, 2017).

2.2.9.3.8. Superficie del electrodo y espaciado del electrodo):

La superficie del electrodo y el espaciado entre los electrodos pueden afectar la eficacia de la electrocoagulación al influir en la formación y el tamaño de los coágulos. Una mayor superficie del electrodo aumenta la zona de contacto entre los electrodos y el agua, facilitando la formación de coágulos. El espaciado entre los electrodos también es importante, ya que puede afectar la uniformidad del campo eléctrico y la eficiencia de la remoción de contaminantes (Chou, 2010).

2.2.10. Método analítico para la medición de hidrocarburos

Comúnmente se emplea el método EPA 8015 C, Revisión 3, de 2007, para la cuantificación de hidrocarburos. Esta metodología analítica está diseñada para evaluar el contenido de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en muestras ambientales como suelos, sedimentos y otros medios. A continuación, se proporciona un resumen del procedimiento general utilizado en este método:

- **Preparación de la muestra:** La muestra se prepara extrayendo los hidrocarburos de la muestra de suelo o sedimento utilizando un solvente apropiado. Luego, se filtra la solución para eliminar los sólidos.
- **Concentración del extracto:** El extracto filtrado se concentra por evaporación del solvente en un matraz rotativo.
- **Cromatografía de gases:** El extracto concentrado se inyecta en un cromatógrafo de gases equipado con una columna de separación capilar. Los hidrocarburos se separan en la columna según sus propiedades físicas y se detectan mediante un detector de ionización de llama (FID).
- **Identificación y cuantificación:** Los hidrocarburos individuales se identifican por su tiempo de retención y se cuantifican mediante una calibración con estándares conocidos.

El método EPA 8015 C, Rev. 3. 2007, utiliza la extracción, concentración y cromatografía de gases para indicar la concentración de TPH en una muestra de suelo o sedimento. Este método es utilizado para la evaluación y gestión ambiental de sitios contaminados con hidrocarburos.

2.2.11. Teoría estadística de análisis de datos

2.2.11.1. Prueba de Shapiro - Wilk

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk es una herramienta estadística empleada para determinar si una muestra de datos se deriva de una distribución normal. Fue desarrollada por Samuel Shapiro y Martin Wilk en 1965, basándose en la relación entre los datos ordenados y los valores esperados bajo la suposición de una distribución normal. La hipótesis nula de esta prueba afirma que los datos se distribuyen normalmente en la población subyacente.

La prueba de Shapiro-Wilk es comúnmente utilizada en estadística para evaluar si una muestra aleatoria sigue una distribución normal. Proporciona un valor W , donde los valores más bajos indican que la muestra no se ajusta a una distribución normal, lo que implica que la hipótesis nula de una distribución normal en la población puede ser rechazada si los valores están por debajo de cierto umbral. Es importante destacar que esta herramienta

estadística puede presentar limitaciones cuando se aplican a muestras pequeñas (Benites, 2022). La fórmula para calcular el valor de W es la siguiente:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$a_i = (a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}}$$

Estos valores representan las expectativas de los estadísticos de orden derivados de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, muestreadas de una distribución normal estándar, y V es la matriz de covarianza de estos estadísticos de orden. El valor de W oscila entre cero y uno. Valores bajos de W sugieren la no normalidad de los datos, mientras que un valor de uno indica que los datos siguen una distribución normal (Mohd & Bee, 2011).

2.2.11.2. Método de Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis de varianza, también conocido como ANOVA, representa el método más preciso para evaluar la variabilidad dentro de un sistema de medición, ya que permite cuantificar la variabilidad resultante de la interacción entre operadores y componentes. Esta técnica se fundamenta en el mismo enfoque estadístico empleado para analizar los efectos de múltiples factores en el diseño experimental (M. Botero et al., 2007).

La formulación tradicional de este método estadístico se presenta de la siguiente manera (Vicens J. et al., 2005).

$$Y_{ij} = \mu + \tau + \varepsilon$$

Donde:

Y_{ij} = es la variable objeto de estudio

μ = es una constante e indica la respuesta media de todos los niveles

τ_j = es el efecto diferencial del nivel j. Recoge la importancia de cada

tratamiento y es el objetivo del análisis. Dado que los factores τ_j son efectos diferenciales sobre μ , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\sum \tau_j = 0$$

Donde:

$\sum \tau_j =$ es un término de error, considerado como variable aleatoria $N \sim (0, \sigma, 0)$.

2.3. Marco legal

2.3.1. Internacional

2.3.1.1. Objetivos del desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron establecidos por las Naciones Unidas como parte de una continuación de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). Este conjunto de 17 objetivos y 196 metas abarca una amplia gama de temas, que incluyen innovación, paz y justicia, cambio climático, consumo sostenible, agua y saneamiento, entre otros. Estos objetivos tienen como plazo de cumplimiento el período comprendido entre 2015 y 2030 (UN, 2023).

Objetivo 14: “*Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos.*”

Los océanos desempeñan un papel fundamental en los sistemas globales, contribuyendo a hacer de la Tierra un lugar habitable para la humanidad. Son responsables de proporcionar y regular una serie de aspectos vitales, como la lluvia, el suministro de agua dulce, el clima, las costas y el oxígeno atmosférico que respiramos. La gestión cuidadosa de este recurso global es crucial para garantizar un futuro sostenible. Sin embargo, en la actualidad, estamos presenciando un deterioro continuo de las aguas costeras debido a la contaminación y la acidificación de los océanos, lo que está teniendo un impacto adverso en el funcionamiento de los ecosistemas y la biodiversidad. Además, esta situación está teniendo consecuencias negativas en la pesca de pequeña escala (UN, 2023).

2.3.2. Nacional

2.3.2.1. Constitución Política del Perú 1993:

La Constitución conocida como la Carta Magna, es la ley fundamental de la Nación es ahí donde se indica en el artículo 2. Inciso 22 presenta los derechos fundamentales de la persona; lo cito: *“toda persona tiene derecho a la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo y al descanso, así como gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”* este artículo hace referencia a que toda persona tiene el derecho a vivir adecuadamente en un ambiente limpio para beneficio de su bienestar (Constitución política del Perú, 1993).

En el Capítulo 11 del título 111 denominado “Del Ambiente y los Recursos Naturales” nos indica en el artículo 66 que *“el Estado es soberano en el aprovechamiento de los recursos naturales renovables y no renovables, debido a que estos son considerados patrimonios de la nación. En cuanto a los artículos 67,68 y 69 estos establecen que el estado debe tomar cargo en promover el uso sostenible y la conservación de sus recursos naturales.”* (Constitución política del Perú, 1993).

2.3.2.2. Ley General del Ambiente N°28611

El propósito fundamental de esta legislación es promover la integración del desarrollo sostenible en el país, a través de acciones tanto públicas como privadas que sean respetuosas con el medio ambiente. Este enfoque debe centrarse en la sostenibilidad, conservación y protección de la diversidad.

Artículo 1. Su deber fundamental el cual citare: *“toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de proteger el ambiente, así como sus componentes asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva. La conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y desarrollo sostenible del país”*(Ley General del Ambiente, 2017).

2.3.2.3. Ley de Gestión Ambiental N°28245

El principal propósito de este Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (SNGA) es asegurar el cumplimiento más efectivo de los objetivos ambientales y de las entidades públicas. Esto implica fortalecer los mecanismos transversales en la gestión ambiental, tarea que recae en el Ministerio del Ambiente y en las entidades sectoriales, regionales y locales en el ejercicio de sus responsabilidades ambientales. Su objetivo es garantizar que estas entidades cumplan con sus funciones y evitar la superposición, omisión, duplicidad, vacíos o conflictos en su ejercicio (MINAM, 2004).

2.3.2.4. Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento ley N°29338

El propósito fundamental de esta ley es establecer normativas para el uso y la administración de los recursos hídricos, que abarcan tanto el agua superficial como la subterránea, así como los cuerpos de agua continentales y los recursos asociados a ellos. Además, se aplica a las aguas marítimas y atmosféricas en la medida en que sea pertinente. Asimismo, se incluye la disposición del reglamento correspondiente. Es importante destacar que el artículo 1 de esta ley establece que *“el reglamento tiene por objeto regular el uso y gestión de los recursos hídricos que comprenden el agua continental: superficial y subterránea y los bienes asociados a esta; así mismo, la actuación del estado y los particulares en dicha gestión”* (ANA, 2019).

2.3.2.5. OEFA (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental)

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) es la entidad encargada de dirigir el Sistema de Evaluación y Fiscalización Ambiental, que está adscrito al Ministerio del Ambiente (MINAM). Se trata de un organismo público técnico y especializado cuya responsabilidad principal es supervisar, fiscalizar, evaluar, controlar y sancionar en materia ambiental, según lo establecido por el MINAM en 2017.

Una de las funciones centrales del OEFA es fiscalizar a las Entidades de Fiscalización Ambiental (EFA), que incluyen a los gobiernos regionales,

provinciales y locales, así como a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y a los ministerios. Entre las responsabilidades de estas entidades se encuentra la gestión del sistema de saneamiento. (MINAM, 2017).

2.3.2.6. OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería)

La entidad gubernamental se encarga de garantizar que las empresas legalmente establecidas en los sectores de electricidad, hidrocarburos y minería proporcionen servicios seguros y de calidad de manera continua. Su principal responsabilidad es supervisar las concesionarias para asegurar que corrijan cualquier deficiencia dentro de plazos específicos y mantengan el servicio público dentro de los límites aceptables. El procedimiento actual, denominado 078-2007-OS/CD y sus modificaciones según lo establecido por OSINERMIN en 2019, establece las pautas y regulaciones para este propósito.

2.3.2.7. Autoridad Portuaria Nacional (APN)

Es una institución técnica especializada que forma parte del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, establecida por mandato de la Ley N° 27943, conocida como la Ley del Sistema Portuario Nacional. Su objetivo principal es fomentar el desarrollo sostenible del Sistema Portuario Nacional, fortaleciendo las labores de control y supervisión en los terminales portuarios de hidrocarburos. Esto se logra mediante la aplicación de normativas generales y contratos específicos suscritos por el sector privado, con el propósito de reducir los riesgos asociados a las operaciones y servicios portuarios. Además, busca facilitar la coordinación entre entidades públicas y privadas involucradas en estas actividades (SENACE, 2003).

2.3.2.8. Dirección General de Capitanías y Guardacostas

Se encarga, entre otras responsabilidades, de conceder el derecho de uso del área acuática y de supervisar el cumplimiento de las normativas relacionadas

con la protección y seguridad de la vida humana, del medio ambiente y la prevención de la contaminación en instalaciones acuáticas. Específicamente en lo que respecta a la protección y prevención de la contaminación en el medio acuático, en colaboración con los sectores pertinentes y en cumplimiento de acuerdos internacionales, emplea unidades aéreas y marítimas para monitorear el tránsito de buques y detectar cualquier descarga no autorizada (DICAPI, 2023).

2.3.2.9. Fiscalías Especializadas en Materia Ambiental (FEMA)

Se establecieron con el propósito de evitar y examinar infracciones relacionadas con el medio ambiente, las fiscalías especializadas tienen autoridad a nivel internacional para prevenir e investigar los delitos definidos en el Título XIII del Código Penal. Además, su objetivo primordial es proteger el medio ambiente y los recursos naturales, reconociendo que el acceso a un entorno sano y seguro es un derecho fundamental. (MPFN, 2023).

2.3.2.10. Ley N° 28804. Ley que regula la Declaratoria de Emergencia Ambiental

El artículo 1 presenta el objeto de la ley, el cual cita: *“La Ley que regula la Declaratoria de Emergencia Ambiental N° 28804 tiene por objeto regular, conforme a lo dispuesto en la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, el procedimiento para declarar en Emergencia Ambiental en una determinada área geográfica en caso de ocurrencia de algún daño ambiental súbito y significativo ocasionado por causas naturales, humanas o tecnológicas que deteriore el ambiente, ocasionando un problema de salud pública como consecuencia de la contaminación del aire, el agua o el suelo; que amerite la acción inmediata sectorial a nivel local o regional”* (MINAM, 2017b).

En su artículo 4 indica establecer medidas de limpieza necesarias para la recuperación de la calidad ambiental y de los recursos naturales en las áreas afectadas.

2.3.2.11. Decreto Supremo N° 039-2014-EM. Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos

Según el artículo 66, las zonas que se contaminen o se vean afectadas por incidentes o emergencias relacionadas con las actividades de hidrocarburos deben ser limpiadas o restauradas lo más rápidamente posible, considerando la gravedad de la contaminación, el impacto ambiental y el riesgo asociado con mantener esa condición (MINEM, 2014).

2.3.2.12. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua

Este decreto supremo establece los niveles aceptables de elementos, sustancias y parámetros físicos, químicos y biológicos en el agua, considerando su importancia como parte esencial de los ecosistemas acuáticos y su papel como receptor natural. Su objetivo es asegurar que no represente un riesgo significativo para el medio ambiente ni para la salud humana.

Categoría 1: Uso poblacional y recreativo

Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable. Se refiere a aquellas aguas que, después de ser tratadas, se destinan al suministro de agua para consumo humano:

A1. Aguas potabilizables mediante desinfección: Se trata de aguas que, debido a su calidad, pueden destinarse al suministro de agua para consumo humano con un proceso de desinfección simple, conforme a la normativa vigente.

A2. Aguas potabilizables mediante tratamiento convencional: Son aquellas aguas destinadas al suministro de agua para consumo humano que requieren un tratamiento convencional, que incluye procesos como coagulación, floculación, decantación, sedimentación y/o filtración, junto con su desinfección, según lo establecido por la normativa vigente.

A3. Aguas potabilizables mediante tratamiento avanzado: Son aquellas aguas destinadas al suministro de agua para consumo humano que

requieren un tratamiento convencional avanzado, que incluye procesos físicos y químicos más sofisticados como precloración, microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, carbón activado, ósmosis inversa u otros procesos equivalentes definidos por la autoridad competente (D.S. N° 004-2017-MINAM, 2017).

2.3.2.13. Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA, Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales

El propósito del Protocolo es uniformizar los criterios y métodos técnicos utilizados para evaluar la calidad de los recursos hídricos, incluyendo aquellos de origen marino-costero. Esto implica establecer pautas específicas de muestreo que garanticen la fiabilidad de las muestras. (R.J. N° 010-2016-ANA, 2016).



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Tipo

La presente investigación pertenece al tipo de investigación aplicada, pues busca generar nuevo conocimiento respecto a la remoción de TPH en agua de mar mediante la aplicación directa de la electrocoagulación, basado en antecedentes y estudios relacionados (Hernández et al., 2014).

3.1.2. Nivel

El nivel explicativo de la investigación hace referencia al nivel de análisis en el que se busca explicar un fenómeno o evento en un estudio o investigación particular (Ñaupas et al., 2014), la presente investigación pertenece al nivel explicativo - causal, ya que estudia el efecto de un sistema de electrocoagulación para remover hidrocarburos presentes en agua de mar.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de investigación se define como el esquema o plan diseñado para llevar a cabo un estudio e investigar las interrogantes planteadas. Este proceso es fundamental en la investigación, dado que el diseño determina en gran medida la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. En este estudio, se emplea un diseño experimental, lo que implica la manipulación de la variable independiente para examinar su influencia sobre la variable dependiente (Ñaupas et al., 2014).

3.3. Operacionalización de Variables

3.3.1. Variable independiente

Sistema de electrocoagulación: Un sistema de electrocoagulación constituye una técnica empleada para purificar aguas residuales mediante la aplicación de corriente eléctrica, con el propósito de coagular, precipitar y separar los agentes contaminantes presentes en el agua. Este procedimiento implica la conducción de electricidad a través de un electrodo, lo que desencadena la generación de iones que interactúan con los contaminantes, dando origen a la formación de flóculos. Estos

flóculos pueden ser separados del agua posteriormente mediante métodos físicos como sedimentación o filtración. Esta metodología se ha comprobado como efectiva en el tratamiento de aguas residuales que contienen una variedad de contaminantes, incluyendo metales pesados, aceites, grasas y otros compuestos tanto orgánicos como inorgánicos (Arango, 2005).

Factores físico-químicos: Los factores físico-químicos son aquellos que alteran simultáneamente la composición interna o molecular de las sustancias, junto con su estado físico, es decir, su configuración o la disposición de sus componentes (Coluccio, 2016).

3.3.2. Variable Dependiente

Remoción de hidrocarburos en el agua de mar: La remoción de hidrocarburos en el agua implica el proceso de eliminar los compuestos de hidrocarburos que se encuentran en este recurso hídrico. Estos hidrocarburos pueden originarse a partir de derrames accidentales, escapes en equipos de almacenamiento o transporte de petróleo, o como resultado de la descarga de aguas residuales industriales. Dado que estos compuestos pueden tener efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana, es fundamental su eliminación (Villegas et al., 2017).

En la Tabla 4 se observa la operacionalización de las variables independientes y dependientes.

Tabla 4
Operacionalización de las variables.

	Variable	Dimensión	Indicador	Escala
Independiente	Factor físicoquímico	Análisis físicoquímico	TPH	mg/L
	Aplicación del sistema de electrocoagulación	Análisis físicoquímico	Densidad de corriente Tiempo	A/m2 minutos
Dependiente	Remoción de hidrocarburos	Eficacia de remoción de hidrocarburos	Porcentaje de remoción	%
			ECA TPH (final)	mg/L

3.4. Área de estudio

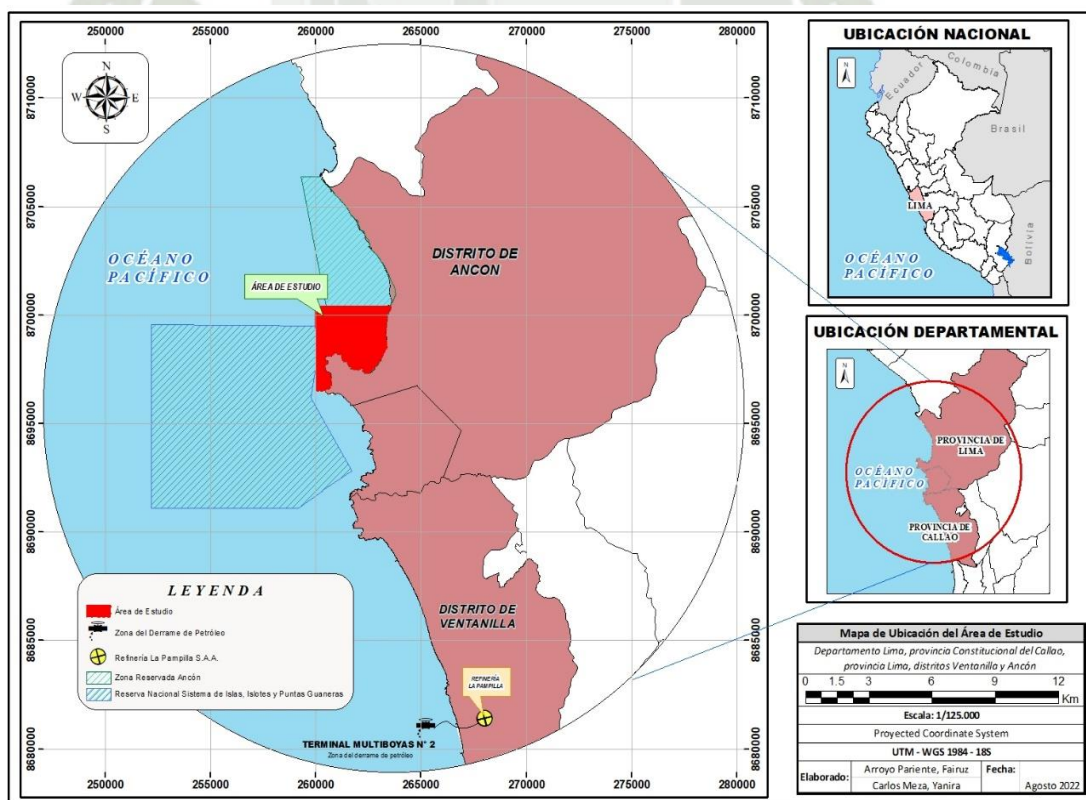
Se determinó la extensión y la localización de la zona afectada por la contaminación de petróleo a partir de imágenes satelitales de la plataforma Google Earth. La Figura 15 muestra la localización geográfica del área de estudio, así como sus coordenadas. El área de estudio se ubica en las costas del distrito de Ancón, declaradas en emergencia por la contaminación de hidrocarburos en el agua, las coordenadas geográficas para el área de estudio se detallan en la Tabla 5:

Tabla 5.
Localización geográfica del área estudio.

Dato	Descripción
Coordenadas UTM (Zona 18 L)	E: 0260312
	N: 8697799

Nota: Elaboración Propia

Figura 15.
Mapa de ubicación del Área de Estudio.



Nota. ArcGis, coordenadas UTM.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población consiste en el conjunto total de individuos, objetos, eventos o situaciones que son estudiadas en una investigación. Es decir, es el grupo de referencia al cual se desea generalizar los resultados obtenidos de una investigación (Ñaupas et al., 2014).

La población está determinada por toda el agua de mar que haya sido contaminada con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú, 2022.

Se debe tener en cuenta que la población no incluye los organismos y seres vivos que habitan en las áreas marinas contaminadas, como los peces, crustáceos, aves marinas y otros animales, así como las comunidades humanas que dependen del uso de las áreas marinas afectadas.

3.5.2. Muestra

Para investigar el impacto de un sistema de electrocoagulación en la eliminación de crudo de petróleo del agua de mar, se seleccionó como muestra de estudio un volumen específico de agua de mar contaminada con crudo de petróleo, el cual fue sometido a tratamiento mediante el sistema de electrocoagulación. Esta muestra de agua de mar contaminada con crudo de petróleo se consideró representativa del área de estudio y consistió en un total de 60 litros.

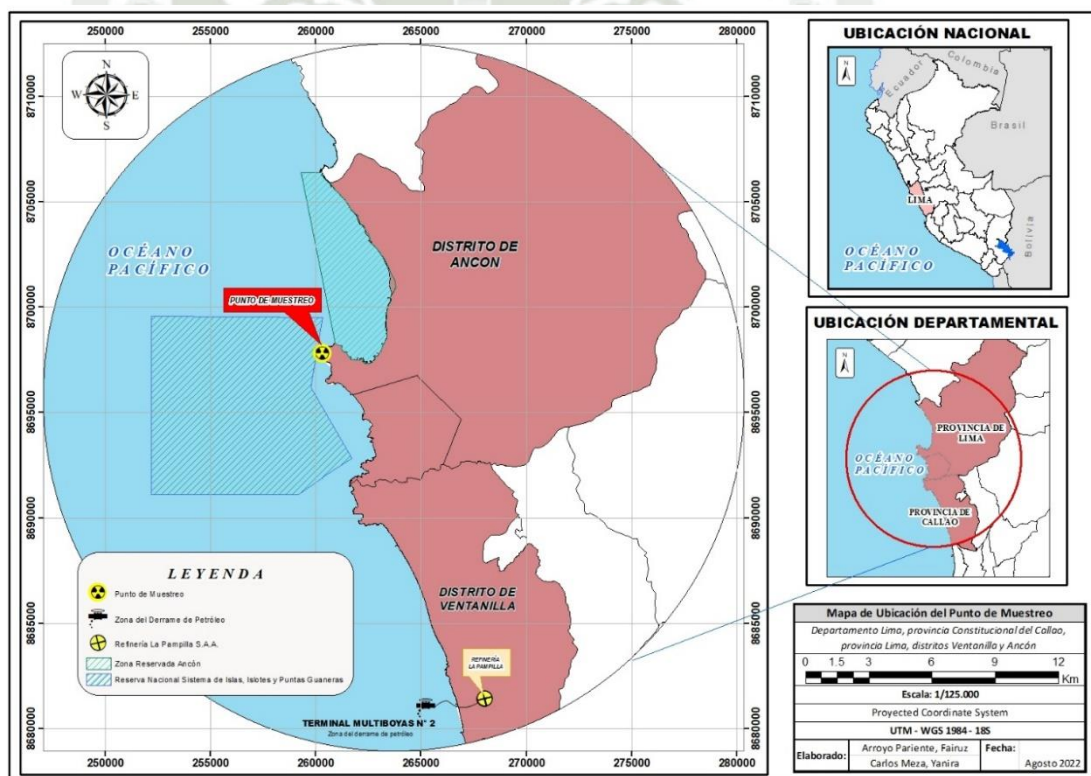
3.5.3. Tipo de muestreo

La presente investigación posee un muestreo no probabilístico, ya que no todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser seleccionados en la muestra, su elección se basa en criterios subjetivos o de conveniencia, en lugar de utilizar un procedimiento aleatorio y objetivo (Ñaupas et al., 2014).

Los métodos de muestreo no probabilístico pueden ser útiles cuando la población de estudio es pequeña, heterogénea o difícil de acceder, o cuando se desea explorar características específicas de la población, incluyen el muestreo por conveniencia, en el que se seleccionan elementos que son fáciles de acceder o disponibles en el momento del estudio, y el muestreo por juicio, en el que se

seleccionan elementos en función del criterio subjetivo del investigador, el muestreo de bola de nieve, en el que se seleccionan elementos adicionales a partir de recomendaciones o contactos de elementos ya incluidos en la muestra (Ñaupas et al., 2014). En esta investigación se ha desarrollado un muestreo por conveniencia, debido a la accesibilidad a las zonas contaminadas con petróleo, actualmente las zonas contaminadas se encuentran en mitigación debido al derrame de crudo de petróleo de REPSOL, sólo se encuentra rezagos flotantes en el agua de Mar que están alejados de la costa. La ubicación del punto representativo de muestreo se muestra a continuación en la Figura 16.

Figura 16.
Mapa de ubicación del Punto de Muestreo.



Nota. ArcGis, coordenadas UTM.

3.6. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas

- Registro de datos in situ
- Análisis de datos por terceros

3.6.2. Instrumentos

- Hojas de Microsoft Excel 2016
- Cuaderno de laboratorio
- Informes de laboratorio
- Software SPSS v22

3.6.3. Materiales y equipos


3.6.3.1. Materiales

- 12 vasos de precipitado de 1 L
- Vaguetas
- Almohadillas absorbentes
- Galoneras de 20 litros para residuos
- Pipetas
- Guantes de látex
- Pastillas magnéticas

3.6.3.2. Equipos

La Tabla 6 muestra el listado de los equipos usados en el laboratorio para poder analizar y tratar la muestra.

*Tabla 6.
Equipos usados en laboratorio.*

Equipo	Marca	Foto
Fuente de poder	BAKKU-BK-305D	

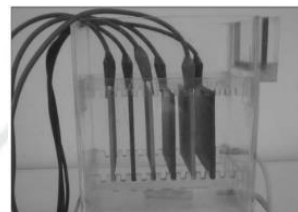
Agitador magnético

Benchmark Scientific
H3760-S



Celda electrolítica
con placas de
aluminio

Elaboración propia



3.7. Métodos de investigación

3.7.1. *Etapa 1. Identificación de los valores iniciales de concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol – Perú, 2022.*

3.7.1.1. Muestreo de agua de mar

Según la Guía Técnica del Procedimiento de Toma de Muestra del Agua de Mar en Playas de Baño y Recreación (MINSA, 2010) y el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016), las muestras se recolectaron en las áreas con mayor concentración de contaminantes, siguiendo las siguientes pautas:

- A) En playas con oleaje tranquilo, la muestra se debe tomar en una zona donde la profundidad del agua sea aproximadamente de 1 metro (a la altura de la cintura del muestreador). La muestra debe tomarse a contracorriente del flujo entrante y a una profundidad de 30 cm bajo la superficie del agua.
- B) En playas con rompientes cercanas a la orilla, se debe superar la rompiente hasta alcanzar una profundidad de agua de 1 metro. El muestreador debe posicionarse a contracorriente del flujo entrante y tomar la muestra a 30 cm bajo la superficie del agua. Si la pendiente del

fondo es pronunciada, la muestra se tomará en la orilla, donde la profundidad del agua esté entre el tobillo y la rodilla, asegurándose de que el frasco de muestreo contenga la menor cantidad de arena posible.

C) Para realizar la respectiva toma de muestra se debe tener las siguientes consideraciones:

- Aflojar levemente la tapa del frasco y el papel de protección, manejándolos como una unidad y evitando que se contamine la tapa o el cuello del frasco.
- Introducir el frasco con la boca hacia abajo hasta la profundidad de 30 cm de la superficie.
- Llenar el frasco hasta que quede $\frac{1}{3}$ del frasco del volumen libre y tapar.
- En la orilla de la playa se deben realizar las anotaciones en la cadena de custodia, la codificación de campo de la muestra y la hora.
- Llenar los datos en la etiqueta del envase con fecha y hora del muestreo, identificación de la muestra e iniciales del muestreador.
- Realizar la medición de la temperatura del agua y del ambiente y registrar en la cadena de custodia.
- Los frascos con las muestras son guardados en la caja conservadora, para ser transportados al laboratorio, las muestras deben mantenerse a 4°C durante su transporte al laboratorio.
- Las muestras deben ser enviadas inmediatamente al laboratorio.

- **Selección de puntos de muestreo:** Se seleccionó un punto de muestreo representativo de la zona afectada con la ayuda de pescadores artesanales, quienes identificaron sitios aún contaminados.

El punto de muestreo se ubicó en la superficie del mar debido a la baja densidad del petróleo como se muestra en la Figura 17. Teniendo como referencia las coordenadas Norte: 8697799 y Este: 0260312.

Figura 17.
Coordenadas del Punto de Muestreo.



- **Recolección de la muestra:** Las muestras de agua contaminada con petróleo se obtuvieron de los rezagos del derrame de petróleo de la Refinería La Pampilla. S.A.A. REPSOL, ubicada en el distrito de Ventanilla donde se evidenció presencia de petróleo crudo en flotación, de acuerdo a lo estipulado en la Guía de Muestreo de Aguas Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (2016). A continuación, la Figura 18 muestra la preparación de envases para la toma de muestra.

Figura 18.
Preparación de envases y toma de muestra.



- **Transporte y almacenamiento de la muestra:** Las muestras fueron transportadas y almacenadas de manera adecuada para evitar su deterioro o contaminación antes de ser analizadas en el laboratorio, para la caracterización inicial del agua residual se tomaron los parámetros de

TPH (mg/L), de acuerdo a lo estipulado en la Guía de Muestreo de Aguas Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (2016).

- **Análisis de la muestra:** El análisis de TPH en las muestras recolectadas se realizó en el laboratorio ALAB Analytical Laboratory E.I.R.L., acreditado por INACAL, cuyo certificado de calibración se encuentra adjunto en el Anexo 6, así como el método 8015C Compuestos Orgánicos no Halogenados por Cromatografía de Gases adjunto en el Anexo 7.

3.7.2. Etapa 2. Determinación de los valores óptimos de densidad de corriente y tiempo mediante la aplicación de un sistema de electrocoagulación a escala laboratorio para la remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminada con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú 2022.

3.7.2.1. Diseño experimental

Se estudiaron y optimizaron las dos variables, como son la densidad de corriente (A/m^2) y el tiempo de electrocoagulación (min), en dos niveles (mínimo y máximo) como se observa en la Tabla 7 haciendo un total de cuatro tratamientos con tres repeticiones como se observa en la Tabla 8, proporcionando así un análisis más completo de los efectos de estas variables en el proceso de electrocoagulación.

La elección de dos variables y dos niveles para cada una se basó en la necesidad de comprender cómo diferentes condiciones afectan el rendimiento del tratamiento de agua mediante electrocoagulación. Al explorar una gama de combinaciones de densidad de corriente y tiempo, buscamos identificar las configuraciones más eficaces para este proceso. Además, esta elección se realizó considerando los recursos disponibles, como el presupuesto y la capacidad experimental. Al haber limitado el estudio a dos variables y dos niveles, se garantizó la eficiencia de la experimentación y se enfocó en obtener resultados significativos dentro de los medios disponibles. Así mismo, en el Anexo 5, se adjunta el diagrama de bloques del proceso de electrocoagulación.

Tabla 7.

Factores y Niveles del Diseño Experimental.

Factores	Unidades	Niveles	
		Mínimo	Máximo
Densidad de corriente	A/m ²	9	20
Tiempo de electrocoagulación	min	5	30

Tabla 8.

Detalle del diseño experimental.

Tratamiento	Repetición	Densidad de corriente (A/m ²)	Tiempo de electrocoagulación (min)
		FACTOR 1	FACTOR 2
T1	T1R1	9	5
	T1R2	9	5
	T1R3	9	5
T2	T2R1	9	30
	T2R2	9	30
	T2R3	9	30
T3	T3R1	20	5
	T3R2	20	5
	T3R3	20	5
T4	T4R1	20	30
	T4R2	20	30
	T4R3	20	30

3.7.2.2. Diseño de ingeniería y configuración del sistema de electrocoagulación

El diseño del sistema de electrocoagulación se basó en investigaciones previas (Suarez et al., 2009) realizado a escala laboratorio, siendo el material de fabricación acrílico de 3 mm. de espesor. La cámara de electrocoagulación fue diseñada con placas rectangulares, de acuerdo a lo establecido por Domínguez et al. (2008) con un número de placas de electrodos 6 (unidades).

Siguiendo lo establecido por Aguilar (2015), la determinación de la corriente se realizó a través de ecuaciones en las que se pudo determinar el área requerida para generar la corriente, luego de lo cual se calculó la densidad de corriente mínima de 5 A/m^2 , además, el área de superficie encontrada mediante ecuaciones matemáticas se dividió por el número deseado de electrodos, que constaba de tres ánodos, y posteriormente, se utilizó el cociente del área encontrada para los electrodos y el diámetro deseado para determinar la longitud de cada electrodo. La corriente continua se condujo desde la fuente de poder a través de 2 cables de uso eléctrico de calibre 18 rojo y negro conectados por pinzas cocodrilo distribuidos en serie conectándose a su vez con los electrodos de aluminio mediante pinzas eléctricas. En la Tabla 9, se detallan las dimensiones del sistema de electrocoagulación:

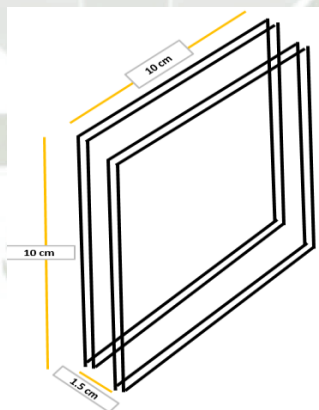
Tabla 9.
Dimensiones del Sistema de Electrocoagulación.

Componente	Descripción	Dimensiones
Celda de electrocoagulación	Material de acrílico de 3 mm	Volumen: 1.2 L Altura: 15 cm Base: 10 cm
Electrodos	Electrodos de aluminio	Número: 6 (3 ánodos, 3 cátodos) Espesor: 3 mm Largo: 10 cm Ancho: 10 cm

Fuente de Poder	Suministro de corriente continua (DC)	Tamaño: 25 cm x 15 cm x 10 cm Peso: 2 kg
Sistema de Agitación	Agitador magnético	Diámetro: 12 cm Altura: 6 cm Peso: 1.5 kg
Sistema de Separación	Vasos de precipitados	Vaso: Volumen 1 L
Conexiones y Tubos	Conexiones eléctricas y tubo de salida	Longitud total: 2 m Diámetro de tubos: 1 cm

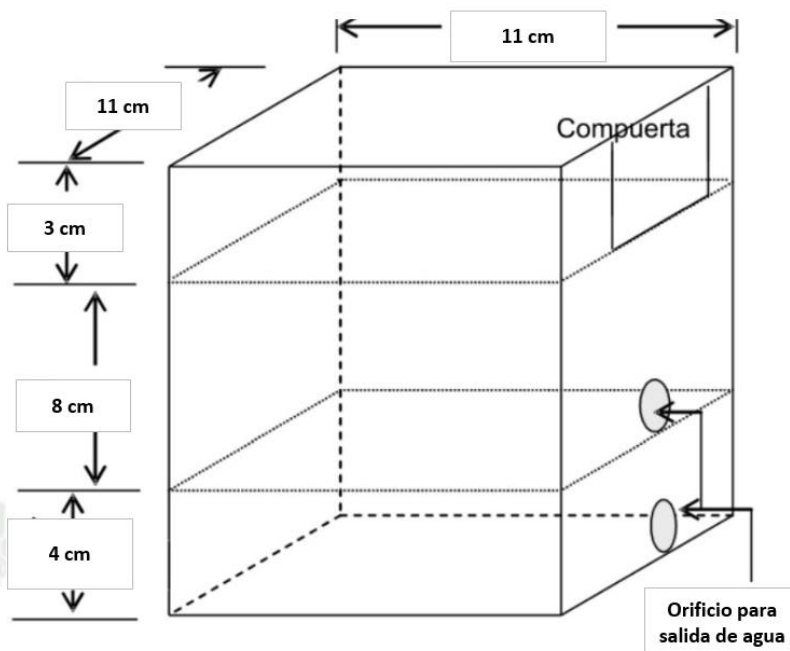
Los electrodos de Aluminio cuentan con 10 cm de base por 10 cm de altura, con una separación de 1.5 cm entre cada electrodo, como se detalla en la figura 19.

Figura 19.
Medidas de los electrodos de Aluminio.



La celda de electrocoagulación de forma prismática, se diseñó y se imprimió en 3D en el material de acrílico de 3 mm de espesor, teniendo de base 11 cm de ancho por 15 cm de altura, como se observa en la figura 20.

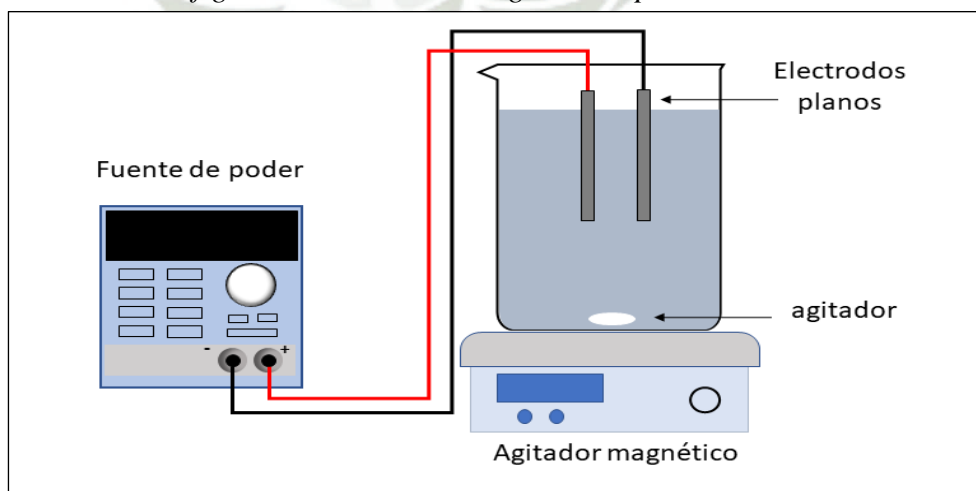
Figura 20.
Diseño de la Celda de Electrocoagulación.



3.7.2.3. Operación del sistema de electrocoagulación

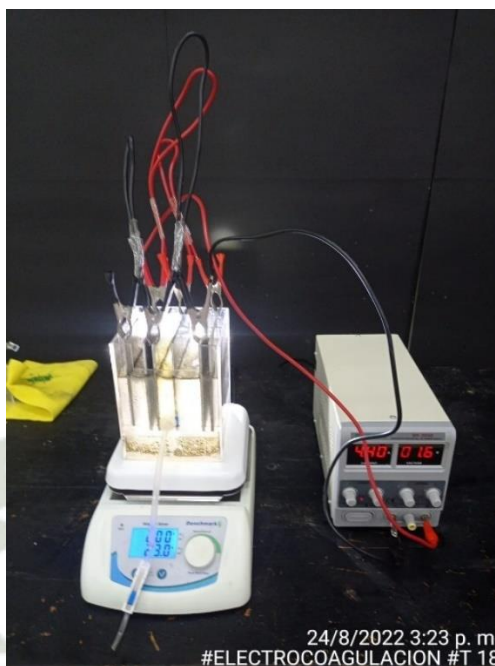
Para operar el sistema de electrocoagulación, se realizaron las pruebas experimentales con una configuración de electrocoagulador modo Batch (Mejía, 2005) como se muestra en la Figura 21.

Figura 21.
Modelo de configuración de electrocoagulador tipo batch.



El volumen del electrocoagulador fue de 1.2 L. y el rango de la fuente fue de 30 voltios y 5 amperios, se utilizó agitación magnética con una velocidad máxima de 500 rpm, como se muestra en la Figura 22.

Figura 22.
Sistema de electrocoagulación.



Para el proceso experimental de electrocoagulación, el agua de mar contaminada con petróleo se distribuyó en vasos de precipitados de 1 L hasta alcanzar 20 vasos, mezclados uniformemente (Figura 23).

Se determinaron los parámetros fijos para las condiciones básicas de funcionamiento del electrocoagulador (Mejía, 2005).

Figura 23.
Preparación de vasos para las pruebas de electrocoagulación.



3.7.2.4. Determinación de factores que afectan la electrocoagulación de TPH.

- **Reducción de hidrocarburos totales de petróleo**

Se realizó el análisis de laboratorio de contenido de TPH en los cuatro tratamientos y en sus respectivas repeticiones.

- **Densidad de corriente y TPH**

Se utilizaron diferentes densidades de corriente entre 9-20 A/m² entre los electrodos de aluminio de la celda de electrocoagulación para eliminar TPH del agua de mar contaminada con petróleo (Del Águila et al., 2011).

- **Tiempo de electrocoagulación y TPH**

Se aplicó el tratamiento de electrocoagulación a las muestras de agua contaminada en el lapso de 5 minutos hasta un máximo de 30 minutos (Del Águila et al., 2011).

3.7.2.5. Análisis ANOVA del Tratamiento de electrocoagulación

Después de ejecutar los cuatro tratamientos determinados por el Método de Superficie de Respuesta con tres repeticiones, cuatro puntos axiales y cuatro puntos centrales, en función al TPH residual (mg/L), tiempo de electrocoagulación (min) y densidad de corriente (A/m²), los efectos de los factores continuos y sus interacciones en las respuestas se analizaron mediante un análisis ANOVA de dos factores, mediante el cual se buscó determinar el efecto de la influencia de la variable independiente frente a la variable dependiente (Monleón, 2016).

3.7.3. Etapa 3. Evaluación de la eficacia de remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú 2022 de acuerdo a la normativa nacional vigente.

3.7.3.1. Comparación del TPH residual del agua de mar tratada con la normatividad vigente

Para el cumplimiento normativo los resultados de los tratamientos de electrocoagulación y sus respectivas repeticiones se compararon con los valores de referencia de Estándar de Calidad Ambiental para agua (ECA-agua), Categoría 4 E3, esta categoría tiene como valor máximo para TPH de 0.5 mg/L (D.S. N° 004-2017 Ministerio del Ambiente, 2017).

Para evaluar el TPH de acuerdo con la normativa, se desarrolló como primer análisis una prueba de normalidad usando el método Shapiro-wilk.

- Prueba Shapiro Wilk

De acuerdo a la metodología probada por Flores y Flores (2021), para realizar la prueba de Shapiro-Wilk, se establecieron la hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1), se ordenaron los datos de menor a mayor y finalmente se calculó la estadística de prueba de Shapiro-Wilk utilizando los coeficientes y los datos ordenados, calculando el valor p correspondiente a la estadística de prueba y se compara con un nivel de significancia predefinido.



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la identificación de los valores iniciales de concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú, 2022.

4.1.1. Muestreo de agua de mar

La Tabla 10 muestra las características fisicoquímicas iniciales del agua de mar contaminada con petróleo de REPSOL en las costas del distrito de Ancón.

Tabla 10.
Concentración inicial de TPH de la muestra del agua de mar.

Descripción	TPH (mg/L)
Punto muestreo Norte	316.5
ECA – categoría 4- E3 marinos	0.5

Los resultados presentados en la Tabla 10 muestran que el cuerpo de agua analizado presenta una concentración inicial de TPH de 316.5 mg/L, cifra que supera el límite establecido en el Estándar de Calidad Ambiental, que es de solo 0.5 mg/L establecido en el D.S. N° 004-2017 del Ministerio del Ambiente (2017), para la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, Subcategoría E3: Ecosistemas costeros y marinos, según la clasificación oficial del cuerpo de agua marino-costero aprobada mediante Resolución Jefatural N.° 030-2016-ANA. Estos resultados pueden compararse con Aruhuanca (2019), donde al analizar el agua de mar se halló concentraciones de 20 mg de TPH por cada litro de agua, resaltando que durante su análisis no se había suscitado un evento de derrame de petróleo, lo que resalta la importancia de un constante monitoreo de los ecosistemas marinos por las trazas de contaminantes remanentes.

Por otro lado Chen et al. (2015) indica que los derrames de petróleo pueden ocurrir durante diversas etapas, como la transferencia del petróleo en las refinerías, debido a fallos en los oleoductos y plataformas petrolíferas durante su transporte, en la fase de extracción del petróleo, así como por accidentes como colisiones o hundimientos de buques petroleros, entre otros eventos, causando un impacto ambiental significativo en los ecosistemas costeros, con consecuencias tanto inmediatas como a largo plazo.

4.2. Resultados de la determinación de los valores óptimos de densidad de corriente y tiempo mediante la aplicación de un sistema de electrocoagulación para la remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Repsol, Lima – Perú, 2022.

4.2.1. Porcentaje de remoción de TPH en los cuatro tratamientos en estudio

En la Tabla 11 se muestran los resultados de las unidades de estudio con respecto al TPH residual y su respectivo porcentaje de remoción, encontrando que el tratamiento dos (T2) presenta los factores óptimos para la remoción de TPH, los cuales son de 9 A/m² de densidad de corriente y 30 minutos de tiempo de electrocoagulación, pues brindan un porcentaje de remoción de 99.93%, partiendo de una concentración inicial de TPH de 316.5 mg/L.

Tabla 11.
Porcentaje de remoción de TPH

	Repetición 1 (mg/L)	Repetición 2 (mg/L)	Repetición 3 (mg/L)	Promedio (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
Tratamiento 1					
(9 A/m ² – 5 min)	0.6672	0.566	0.285	0.51	99.84
Tratamiento 2					
(9 A/m ² – 30 min)	0.279	0.228	0.168	0.23	99.93

Tratamiento 3

(20 A/m ² – 5 min)	0.704	0.965	0.827	0.83	99.74
----------------------------------	-------	-------	-------	------	--------------

Tratamiento 4

(20 A/m ² – 30 min)	2.998	1.199	2.742	2.31	99.27
-----------------------------------	-------	-------	-------	------	--------------

Como se observa en la Tabla 11, los resultados más efectivos se obtuvieron utilizando una densidad de corriente de 9 A/m² y un tiempo de tratamiento de 30 minutos, logrando una eficacia del 99.93% de remoción de TPH (Hidrocarburos Totales de Petróleo); así mismo, Favero et al. (2019) también emplearon una densidad de corriente de 9 A/m², para tratar efluentes de una empresa de aceites lubricantes, obteniendo una eficacia del 70.29% en 90 minutos; aunque el tiempo de tratamiento fue mayor, la similitud en el valor de densidad de corriente respalda la idea de que valores bajos pueden ser suficientes para lograr altas eficacias de remoción de contaminantes. La reducción del tiempo de tratamiento en nuestra investigación a 30 minutos sin sacrificar la eficacia indica que la optimización de otros parámetros operativos puede jugar un papel crucial; en contraste, Gousmi et al. (2016) utilizaron una densidad de corriente de 60 A/m² para tratar aguas residuales aceitosas sintéticas típicas de refinerías de petróleo, logrando un porcentaje de remoción del 83.52%, pese a que este valor de densidad de corriente es significativamente mayor, la eficacia obtenida es menor comparada con la nuestra, señalando que a una mayor densidad de corriente no necesariamente se traduce en una mayor eficacia.

El alto porcentaje de remoción de TPH en nuestro estudio con una densidad de corriente menor indica que factores como la naturaleza del contaminante, la configuración del reactor y los materiales de los electrodos, tal como señalan Rojas y Tierradentro (2018) y Younker et al. (2011), son cruciales para la eficacia del tratamiento. Rojas y Tierradentro (2018) enfatizaron que el material de los electrodos es fundamental, ya que suministran los agentes

coagulantes necesarios para neutralizar los contaminantes en el agua, en su estudio, los electrodos de aluminio comparados con los de hierro presentaron mejor remoción. Además, Arabian et al. (2021) investigaron el tratamiento de aguas residuales de la industria petroquímica con una densidad de corriente de 10 A/m^2 , logrando una remoción de contaminantes del 94.67%; a pesar de que estos resultados son inferiores a los nuestros, se alinean con la tendencia observada en nuestra investigación que sugiere que densidades de corriente relativamente bajas pueden ser altamente eficaces, así mismo, Bayramoglu (2010), citado por Paitan y Cifuentes (2018), respalda esta idea, al indicar que aumentar excesivamente la densidad de corriente puede no mejorar la eficiencia y podría reducirla, siendo fundamental considerar otros factores como la temperatura y el pH.

Por otro lado, Hasan et al. (2021) demostraron que una densidad de corriente de 4.6 A/m^2 logró una eficiencia de remoción del 93.9% para el Cromo, observando que al aumentar la densidad de corriente incrementó la turbidez del agua tratada. Este fenómeno se debe a la formación de hidróxidos metálicos que, a densidades de corriente más altas, pueden desestabilizar los flóculos y reducir la eficacia de remoción. La electrocoagulación genera especies coagulantes in situ a partir de la disolución anódica, lo que puede ser más eficiente a densidades de corriente optimizadas que evitan la pasivación del ánodo y la formación excesiva de productos secundarios, de la misma manera Khan et al. (2023) lograron una eficacia de eliminación de DQO del 85.7% en aguas residuales municipales utilizando una densidad de corriente de 10 A/m^2 y un tiempo de tratamiento de 20 minutos, confirmando que los valores de densidad de corriente bajas, pueden ser altamente efectivas para la remoción de una amplia variedad de contaminantes, igualmente Laxmi Das et al. (2022) encontraron que una densidad de corriente de 10 A/m^2 y un tiempo de tratamiento de 5.8 minutos fueron óptimos para la remediación de aguas subterráneas contaminadas con Arsénico, logrando una eficiencia de eliminación del 95.6%.

Por lo expuesto anteriormente confirmamos que a menores valores de densidad de corriente puede favorecer a la formación de flóculos más estables y reducir la generación de productos secundarios no deseados, resultando en una remoción más efectiva de contaminantes.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) de los cuatro tratamientos bajo estudio, considerando los dos factores analizados: Densidad de corriente y tiempo, en el proceso de electrocoagulación. Estos resultados se muestran en la Tabla 12.

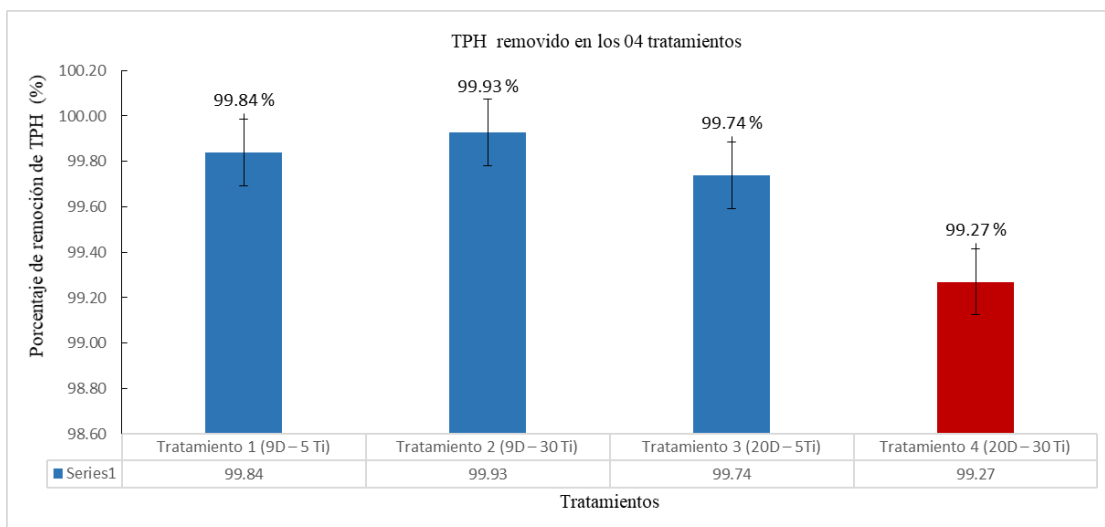
Tabla 12.
Análisis de Varianza de los tratamientos en estudio.

F. de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft 5%	p	Sig.
Tratamientos	3	7.78	2.59	10.306	4.07	0.016	☀☀
Factor	01						
(min) T	1	1.08	1.08	4.291	5.32	0.072	NS
Factor	02						
(A/m ²) D	1	4.37	4.37	17.371	5.32	0.003	☀☀
Interacción							
D x T	1	2.33	2.33				
Dentro del grupo	8	2.01	0.25				
TOTAL	11	9.79					

La Figura 24 muestra el porcentaje de remoción de TPH obtenido en los cuatro tratamientos de estudio.

Figura 24.

Porcentaje de remoción de TPH en los cuatro tratamientos.



Los datos presentados en la Tabla 11 y la Figura 24, muestran los resultados de los cuatro tratamientos en estudio, donde se aplicaron densidades de corriente de 9 y 20 A/m² durante 5 minutos y 30 minutos de tiempo de electrocoagulación por cada densidad de corriente revelan diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la remoción de TPH entre los diferentes tratamientos, como lo confirman los análisis de ANOVA y Tukey con un nivel de confianza del 95%, donde se obtuvo un valor de p de 0.016. Estos hallazgos subrayan la importancia de la selección y aplicación adecuadas de los tratamientos en la remoción de TPH.

La electrocoagulación ha demostrado ser un método eficaz para la eliminación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) del agua de mar. Los resultados de este estudio revelan que la densidad de corriente aplicada juega un papel crucial en la eficiencia del proceso. Se observó que una densidad de corriente de 9 A/m² logra una remoción de TPH del 99.93%, mientras que una densidad de corriente de 20 A/m² reduce la eficiencia a un 99.27%. Esta diferencia se atribuye a la formación más eficiente de flóculos y la generación de burbujas de gas en condiciones de menor densidad de corriente, lo que facilita la coagulación y sedimentación de los contaminantes.

El tiempo de electrocoagulación también es un factor importante, aunque los resultados indican que tiempos más largos no siempre mejoran la remoción de

TPH. Los tratamientos con 5 minutos de electrocoagulación mostraron remociones promedio superiores al 99.8%, mientras que los tratamientos con 30 minutos presentaron una ligera disminución en la eficiencia. Este comportamiento puede deberse a la pasivación de los electrodos y la formación de capas aislantes que disminuyen la eficacia del proceso en tiempos prolongados.

Los análisis estadísticos mediante ANOVA y pruebas de Tukey confirmaron que la densidad de corriente tiene una influencia significativa en la remoción de TPH ($p = 0.003$), mientras que el tiempo no alcanzó una significancia estadística ($p = 0.072$). Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar la densidad de corriente para mejorar la eficiencia del proceso de electrocoagulación.

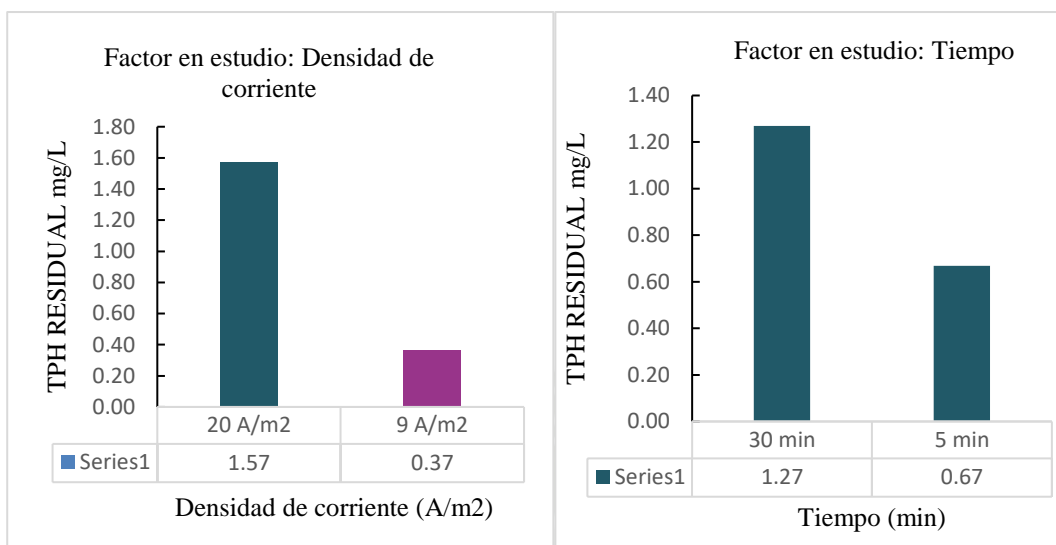
Comparando estos resultados con estudios previos, se evidencia que la elección de la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento depende del tipo de contaminante y las condiciones específicas de operación. En este caso, se concluye que una densidad de corriente de 9 A/m^2 y un tiempo de electrocoagulación de 30 minutos son las condiciones óptimas para la remoción de TPH, cumpliendo con los estándares ambientales y demostrando la efectividad del método.

4.2.2. Efecto de los factores de estudio en la remisión de TPH

La Figura 25 muestra el análisis estadístico a nivel de factores (Densidad de corriente y Tiempo de electrocoagulación).

Figura 25.

Factores de remoción de TPH en función al TPH residual después del tratamiento.



Los resultados de la presente investigación indican que la electrocoagulación se revela como un método eficaz para la eliminación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) del agua de mar. Este estudio revela una relación inversamente proporcional entre la densidad de corriente aplicada y la efectividad de la remoción de TPH, evidenciado en la Figura 25, donde se observan diferencias estadísticamente significativas al analizar el factor de densidad de corriente mediante un análisis de varianza ANOVA y la prueba de comparaciones múltiples Tukey al 95%, con un valor de p de 0.003 (Tabla 11). Se observó que la aplicación de una densidad de corriente de 9 A/m² logró un porcentaje de remoción de TPH del 99.93%, mientras que una densidad de corriente de 20 A/m² resultó en un porcentaje ligeramente menor, del 99.27%. Por lo tanto, a menor densidad de corriente aplicada, se logra un mayor porcentaje de remoción de TPH, caso contrario a las investigaciones enfocadas en la desalinización de agua de mar como en el caso estudiado por Hakizimana (2017), donde se muestra una relación directamente proporcional entre el porcentaje de remoción de Carbono Orgánico Disuelto (COD) y la densidad de corriente aplicada, pues examinaron la viabilidad de un proceso híbrido de electrocoagulación/electroflotación/electrodesinfección (EC/EF/ED) utilizando electrodos de aluminio y sus resultados experimentales mostraron que la eficiencia de eliminación de Carbono Orgánico Disuelto (DOC)

aumentó cuando la densidad de corriente aumentó, mostrando un porcentaje de remoción de DOC de 69.0% con una densidad de corriente de 20 mA/cm² y 320 s de tiempo de residencia, así mismo, las bacterias heterótrofas fueron completamente eliminadas para las densidades de corriente más altas 20 mA/cm².

Khan et al. (2019) resalta la importancia del impacto de la corriente aplicada en las interacciones químicas entre los contaminantes, los hidróxidos y el aluminio, lo cual resulta fundamental para la formación y crecimiento de flóculos, responsables de la eliminación de contaminantes. En este sentido, la densidad de corriente juega un papel crucial al influir en la liberación de iones de aluminio, la formación de burbujas de gas y la creación de los mencionados flóculos, lo que destaca su relevancia en el proceso de electrocoagulación (Hakizimana, 2017). Para comprender a fondo la relación entre la densidad de corriente y la eficacia del tratamiento, es esencial considerar la disolución anódica conforme a la ley de Faraday. Esta ley establece que la cantidad de material disuelto en el electrodo es directamente proporcional a la carga eléctrica que atraviesa el electrodo, lo que proporciona una base teórica sólida para entender la dinámica subyacente en el proceso electroquímico. Por consiguiente, al aumentar la densidad de la corriente, se incrementa la eficiencia de eliminación debido a una mayor disolución del electrodo. Los resultados positivos logrados en la remoción de TPH al utilizar una densidad de corriente menor y un tiempo de tratamiento más corto pueden atribuirse a diversos factores interrelacionados. Entre estos factores se encuentran la distribución del campo eléctrico durante el proceso, la formación mejorada de flóculos y la generación más eficiente de burbujas de gas. Es posible que estas condiciones menos agresivas hayan creado un ambiente más propicio para que los flóculos se formen y crezcan de manera más efectiva, lo que a su vez contribuyó a una mayor remoción de TPH. Sadi et al. (2022) resalta la importancia de una selección minuciosa de la densidad de corriente adecuada en el proceso de electrocoagulación. Destaca que es esencial considerar diversos factores, como el tiempo de retención y el pH, al determinar la densidad de corriente óptima para el tratamiento del agua de mar contaminada con hidrocarburos. Controlar meticulosamente la densidad de corriente es

crucial para evitar efectos adversos, como la generación excesiva de gases o la formación de subproductos no deseados. La elección cuidadosa de la densidad de corriente, basada en un análisis exhaustivo de los factores operativos relevantes, puede maximizar la eficiencia del proceso y contribuir significativamente a la restauración de los ecosistemas marinos afectados por derrames de petróleo.

Los porcentajes de remoción encontrados en esta investigación destacan frente a los porcentajes obtenidos empleando otras tecnologías de tratamiento, por ejemplo, Aruhuanca (2019) evaluó la remoción de TPH de agua de mar, utilizando carbón activado derivado de plumas de pollo, logrando una remoción de TPH del 94.66%, por otro lado, Martínez (2013), reportó un porcentaje de remoción de hidrocarburos presentes en agua de mar del 97% al utilizar *Pennisetum clandestinum*.

Las investigaciones previamente citadas presentan un notable porcentaje de remoción de TPH en agua de mar, no obstante, el tratamiento de electrocoagulación utilizado en este estudio sugiere una efectividad superior en la adsorción de petróleo en agua de mar, al lograr porcentajes de remoción de TPH de 99.93%, por ello, en comparación con las tecnologías mencionadas, la electrocoagulación se presenta como una mejor alternativa de tratamiento para la remoción de TPH del agua de mar.

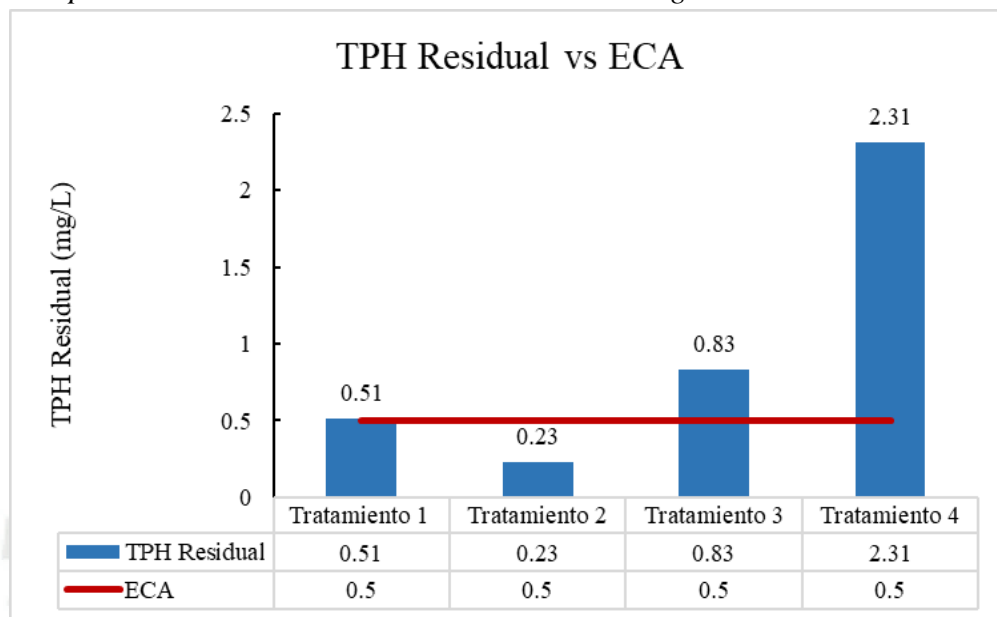
4.3. Resultados de la evaluación de la eficacia de remoción de hidrocarburos presentes en el agua de mar contaminado con crudo de petróleo de Lima – Perú 2023, de acuerdo a la normativa nacional vigente.

4.3.1. Comparación del TPH residual del agua de mar tratada con la normatividad vigente.

Los resultados presentados en la Figura 26 revelan el nivel residual de TPH en las muestras de agua de mar después de la aplicación de los cuatro tratamientos, así como el Estándar de Calidad Ambiental de Agua (ECA) establecido en el D.S. N° 004-2017 del Ministerio del Ambiente (2017).

Figura 26.

Comparación del TPH residual con la normativa vigente.



Se observa que los Tratamientos 1, 2 y 3 muestran niveles de TPH residual cercanos al valor del ECA, siendo el Tratamiento 2 el más efectivo al tener el nivel más bajo de TPH residual (0.23 mg/L), este resultado sugiere que el Tratamiento 2 logra cumplir con los estándares ambientales establecidos, lo que indica una eficacia considerable en la remoción de TPH (Anexo 6), sin embargo, el Tratamiento 4 muestra un nivel de TPH residual significativamente más alto (2.31 mg/L), excediendo en gran medida el límite establecido por el ECA. Esto sugiere una eficacia limitada o insuficiente en la remoción de TPH para este tratamiento en particular.

Comparando los resultados antes mencionados, con los obtenidos por Hakizimana (2017), el mejor rendimiento de eliminación de hidrocarburos fue de 69.0% al imponer una densidad de corriente de 20 mA/cm² y un tiempo de residencia de 320 segundos cuando el pH de entrada fue de 4, lo que logró una concentración final de hidrocarburos de 0.45 mg/L, el cual se acerca a la concentración permitida por el Estándar de Calidad Ambiental para cuerpos de agua, sin embargo, no logra alcanzar los niveles obtenidos en el Tratamiento 2 del presente estudio. Esto puede deberse a que, como indican Sadi et al (2022) y Arhuanca (2019), la concentración residual de hidrocarburos en el agua después de un tratamiento de electrocoagulación depende de eficacia del proceso por condiciones específicas de operación, como la densidad de

corriente, el tiempo de tratamiento, el pH del agua, la concentración inicial de contaminantes y la composición del agua de entrada, por lo que el control de estas condiciones es imperativo para lograr una mayor eliminación de los hidrocarburos. Además, según Martínez (2013), algunos hidrocarburos pueden formar emulsiones o estar adsorbidos en partículas sólidas en el agua, lo que dificulta su remoción mediante electrocoagulación, por lo que, en tales casos, es posible que se requieran técnicas adicionales, como la floculación o la filtración, para eliminar completamente los hidrocarburos residuales.

Finalmente, los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan en que los factores óptimos para la electrocoagulación son de 9 A/m² de densidad de corriente y 30 minutos de tiempo de electrocoagulación, pues logran un mayor porcentaje de remoción de TPH que permite el cumplimiento del Estándar de Calidad Ambiental que permite una concentración máxima de TPH de 0.5 mg/L establecido en el D.S. N° 004-2017 del Ministerio del Ambiente (2017), para los cuerpos de agua ubicados en la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, Subcategoría E3: Ecosistemas costeros y marinos, según la clasificación oficial del cuerpo de agua marino-costero aprobada mediante Resolución Jefatural N.° 030-2016-ANA. Resaltando al tratamiento dos (T2) como la opción más efectiva para la descontaminación de cuerpos de agua marinos afectados por hidrocarburos, dado que logró reducir significativamente la concentración de TPH, de 316.5 mg/L a tan solo 0.23 mg/L.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

PRIMERO: Se identificó la concentración inicial de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH), seleccionando el punto idóneo de muestreo realizando el muestreo de agua de mar en base a la Guía de Muestreo de Aguas Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (2016), las cuales fueron analizadas por un laboratorio certificado, determinándose que la concentración inicial de TPH fue de 316 mg/L, dicha concentración supera ampliamente el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Agua en la categoría 4 conservación del ambiente acuático, subcategoría E3 perteneciente a los ecosistemas costeros y marinos.

SEGUNDO: Se determinaron los parámetros óptimos de densidad de corriente y tiempo de electrocoagulación mediante la aplicación de un sistema de electrocoagulación a escala laboratorio, con electrodos de Aluminio, siendo éstos de 9 A/m² y de 30 min respectivamente. Cabe resaltar que estadísticamente se determinó que el factor densidad de corriente influyó de manera significativa en la remoción de TPH, el cual obtuvo un valor de $p < 0.05$; en oposición al tiempo, el cual no alcanzó un valor significativo.

TERCERO: Se evaluó la eficacia del sistema de electrocoagulación a escala laboratorio, comprobando estadísticamente que el Tratamiento T2 resultó ser el más efectivo alcanzando una concentración 0.168 mg/L, lo que significa un 99.95% de remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en agua de mar contaminada cumpliendo con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Agua en la Categoría 4 conservación del ambiente acuático, subcategoría E3 perteneciente a los ecosistemas costeros y marinos. Por lo tanto, el sistema de electrocoagulación a escala laboratorio demostró ser una tecnología eficaz y prometedora para tratar agua de mar contaminada con crudo de petróleo reduciendo significativamente los valores de TPH.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda continuar con el estudio para evaluar a más detalle la eficiencia de remoción comparando otros tipos de electrodos, el Aluminio usado como electrodo tienen a tener un alto consumo de energía.
- Se recomienda trabajar con menores intervalos de tiempo de contacto para analizar a mayor profundidad de cómo se comporta el tiempo de contacto con relación a la remoción del TRH, siendo para esto necesario estudiar la cinética e isothermas de adsorción tales como Freundlich y Langmuir ya que permitirían profundizar y comprender mejor el mecanismo de remoción.





CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, S., Mirghorayshi, M., Zinadini, S., Zinatizadeh, A. (2020). A novel single continuous electrocoagulation process for treatment of licorice processing wastewater: Optimization of operating factors using RSM, Process Safety and Environmental Protection, (Vol 134, Pages 323-332) ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.12.005>.
- Adams, R., Morales-Garcia, F., & ZaVala-Cruz, J. (2008). Concentración Residual de hidrocarburos en suelo del trópico II: Afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia*, 483-489. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700005&lng=es&tlng=es.
- Aeppli, C. (2022). Recent advance in understanding photooxidation of hydrocarbons after oil spills. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 36, 100763. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100763>
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2016). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs161.html
- AghaKouchak, A., Feldman, D., Hoerling, M., Huxman, T., & Lund, J. (2015). Water and climate: Recognize anthropogenic drought. *Nature*, 524(7566), 409–411.
- Akkaya, G. K. (2022). Treatment of petroleum wastewater by electrocoagulation using scrap perforated (Fe-anode) and plate (Al and Fe-cathode) metals: Optimization of operating parameters by RSM. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 261–275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.048>
- Akpan, E. (2022) Environmental Consequences of Oil Spills on Marine Habitats and the Mitigating Measures—The Niger Delta Perspective. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10, 191-203. doi: 10.4236/gep.2022.106012.
- Alcivar, G., & Rodriguez, J. (2020). *Aplicación de tratamientos electroquímicos como electrocoagulación y ozonización para aguas de sentina de los buques de la armada del Ecuador*. Guayaquil - Ecuador.

- Al-Ghouti, M. A., Al-Kaabi, M. A., Ashfaq, M. Y., & Da'na, D. A. (2019). Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 222–239.
- AlJaberi, F. Y., Ahmed, S. A., & Makki, H. F. (2020). Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization. *Heliyon*, 6(6), e03988.
- Almache L., & Sinchiguano L. (2019). Islas Flotantes Artificiales con PASTO GUINEA (*Panicum máximum*) como alternativa para la remoción de TPH (Hidrocarburos Totales de Petróleo) en el agua procedente del río Cutuchi (Bachelor's thesis, Ecuador, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)). <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6262>
- A Mollah, M., Schennach, R., Parga, J., & I Cocke, D. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *ScienceDirect*, 29-41.
- An, C.; Huang, G.; Yao, Y.; Zhao, S. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. *Science of the Total Environment*. 2017, 537–556
- ANA. (2016). *R.J. N° 010-2016-ANA .- “Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales.”*
- ANA. (2019). *Ley N° 29338.- Ley de los Recursos Hídricos.*
<https://www.ana.gob.pe/publicaciones/ley-no-29338-ley-de-recursos-hidricos#:~:text=Contiene la Ley N° 29338,reglamento de la mencionada ley>
- Arabameri, A., Alavi Moghaddam, M. R., Azadmehr, A. R., & Payami Shabestar, M. (2022). Less energy and material consumption in an electrocoagulation system using AC waveform instead of DC for nickel removal: Process optimization through RSM. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 174, 108869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108869>
- Arabian, D., Bolhasani, A., Karamian, S., and Honarvar, E., (2021). Design and construction of a novel electrocoagulation reactor and process optimization for petrochemical spent caustic treatment. *Desalination and Water Treatment*, vol. 239, pp. 150–161,. doi:10.5004/dwt.2021.27718.

- Arango Ruiz, Álvaro (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales Revista Lasallista de Investigación, vol. 2, núm. 1, enero-junio, 2005, pp. 49-56 Corporación Universitaria Lasallista Antioquia, Colombia. Obtenido de. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>
- Aruhuanca, M. (2019). Eficiencia del carbón activado obtenido de biopolímeros naturales, en la adsorción de petróleo en agua de mar a nivel laboratorio Callao-2018. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/41522>
- Aruhuanca Paucar, Maria Elena (2019). “EFICIENCIA DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DE BIOPOLÍMEROS NATURALES, EN LA ADSORCIÓN DE PETRÓLEO EN AGUA DE MAR A NIVEL LABORATORIO CALLAO-2018”. https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrErt0X8QVmPo0Ng8x7egx.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1711694232/RO=10/RU=http%3a%2f%2frepositorio.ucv.edu.pe%2fhandle%2f20.500.12692%2f41522/RK=2/RS=vlGQBeAVGUx8WAFOZ5cFZktB08s-
- Asif, Z., Chen, Z., An, C., & Dong, J. (2022). Environmental Impacts and Challenges Associated with Oil Spills on Shorelines. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 10, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/jmse10060762>
- Azaña R., & Román A. (2019). Almohadilla de pluma de pollo para la remoción de agua contaminada por desembarque de petróleo crudo-Muelle Dársena, Callao 2019. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/58029>
- Bajpai, M., & Katoch, S. S. (2020). Techno-economical optimization using Box–Behnken (BB) design for chemical oxygen demand and chloride reduction from hospital wastewater by electro-coagulation. *Water Environment Research*, 92(12), 2140–2154.
- Bande, R., Prasad B., Mishra I., Wasewar K. (2008). Oil field effluent water treatment for safe disposal by electroflotation. *Chemical Engineering Journal* (Vol. 137, Issue 3). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.05.003>.
- Bejarano, A. C., & Michel, J. (2016). Oil spills and their impacts on sand beach invertebrate communities: A literature review. *Environmental Pollution*, 218, 709–722.

- Benites (2022). Prueba de Shapiro - Wilk: Definicion, como ejecutarla en SPSS.
- Bhattacharjee, S., & Dutta, T. (2022). An overview of oil pollution and oil-spilling incidents. *Advances in Oil-Water Separation*, 3–15.
- Botero, M. Arbeláez, O. Mendoza, J. (2007). Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. Pereira. Recuperado de 10 diciembre 2007 de. Contaminación de agua en países de bajos y medianos recursos es un problema de salud pública global
- Box, G. E. P. (1951). P and Wilson KB On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*, 13, 1–45.
- Brenes, R., & Rojas, L. (2005). El agua: sus propiedades y su importancia biológica. *Revista acta academica*, 167-196.
- Capurro, Víctor Pulido, Martínez, José Cruz, Bustamante, César Arana, & Carhuaz, Edith Olivera. (2022). Daño ambiental en el litoral marino peruano causado por el derrame de petróleo (enero 2022) en la refinería La Pampilla. *Manglar*, 19(1), 67-75. Epub 15 de marzo de 2022. <https://dx.doi.org/10.17268/manglar.2022.009>
- Challenger, G. E., Gmur, S., & Taylor, E. (2021). A review of Gulf of Mexico coastal marsh erosion studies following the 2010 Deepwater Horizon oil spill and comparison to over 4 years of shoreline loss data from Fall 2010 to Summer 2015. *Marine Pollution Bulletin*, 164, 111983.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11–41.
- Chen, H., An, W., You, Y., Lei, F., Zhao, Y., & Li, J. (2015). Numerical study of underwater fate of oil spilled from deepwater blowout. *Ocean Engineering*, 110, 227-243.
- Chou, W.; Wang, C.; Chang, W. and Chang, S. (2010). “Adsorption treatment of oxide chemical mechanical polishing wastewater from a semiconductor manufacturing plant by electrocoagulation”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 180, No. 1-3, pp. 217-224

- CNN. (2022). *Derrame de petróleo en Ventanilla es “el peor desastre ecológico” de Lima, dice Cancillería*. <https://cnnespanol.cnn.com/2022/01/19/derrame-petroleo-ventanilla-desastre-ecologico-orix/>
- Coluccio, A. L. (2016). Fenómenos fisicoquímicos. Enciclopedia de ejemplos.
- Constitución política del Perú. (1993). Constitución política del Perú. *Lima, Perú*.
<https://diariooficial.elperuano.pe/pdf/0001/1-constitucion-politica-del-peru-1.pdf>
- Cuadras, C. (2016). Problemas de probabilidades y estadística. Vol. 1. Publicado por UNIVERSITAT DE BARCELONA, España, 2016. ISBN 10: 8447539903 ISBN 13: 9788447539901. Recuperado de.
<https://es.scribd.com/document/375747945/Estadistica-Avanzada-Distancias-pdf#>
- D.S. N° 004-2017-MINAM Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias, 10 (2017).
- Data-tab Team (2023). Prueba de Wilcoxon. Online Statistics Calculator. DATA tab e.U. Graz, Austria. Recuperado de: <https://datatab.es/tutorial/wilcoxon-test>
- Das, L., Bhatti, M.S., Gilhotra, V., Sarkar, S., Ahmad Kazmi, A. (2022). Remediation of arsenic contaminated groundwater by electrocoagulation: Process optimization using response surface methodology, *Minerals Engineering*, Volume 189, 107881, ISSN 0892-6875,
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107881>.
- Del Águila, et al. (2011). *Agroindustrial Science*, 2 (2011), 64-75, ISSN-e 2226-2989. Trujillo Perú, Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria. Nataly Del Águila, Andrés Mendocilla, Víctor Vásquez. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6583459>
- Dhaka, A., & Chattopadhyay, P. (2021). A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills. *Journal of Environmental Management*, 288, 112428.

- Diario Gestión. (2022). *A un mes del derrame de petróleo de Repsol, ¿cuál es el impacto económico?* PERU | GESTIÓN. NOTICIAS GESTIÓN. <https://gestion.pe/economia/empresas/repsol-derrame-de-petroleo-ventanilla-cual-es-el-impacto-economico-que-se-genera-en-los-pescadores-negocios-restaurantes-y-turismo-rmmn-noticia/>
- Diario Gestión. (2022). *Cancillería: “El derrame de petróleo de Repsol en Ventanilla es el peor desastre ecológico ocurrido en Lima.”* PERU | GESTIÓN. NOTICIAS GESTIÓN. <https://gestion.pe/peru/cancilleria-el-derrame-de-petroleo-de-repsol-en-ventanilla-es-el-peor-desastre-ecologico-ocurrido-en-lima-nndc-noticia/>
- Diario Gestión (2022). *Dicapi: derrame de petróleo en mar de Ventanilla no fue ocasionado por un fenómeno natural.* Recuperado en 12 de mayo de 2023, de <https://gestion.pe/peru/dicapi-derrame-de-petroleo-en-mar-de-ventanilla-no-fue-ocasionado-por-un-fenomeno-natural-derrame-de-petroleo-noticia/#:~:text=Lo%20que%20origin%C3%B3%20el%20derrame,del%20terminal%E2%80%9D%2C%20dijo%20Dicapi.&text=Lima%2C%202020%2F02%2F2022,m.>
- DICAPI. (2023). *Normas generales.* <https://www.dicapi.mil.pe/normas-generales>
- Dominguez, A. M., Huerta, M. D. L. R., Soberanis, M. P. & Castrejón, S. P., 2008. *Incidencia del gradiente de velocidad en la eficiencia de la electrocoagulación para remover arsénico en un reactor a flujo pistón.* Interciencia, Julio, 33(7), pp. 496-502.
- El Comercio. (2022). *OEFA: Nos enteramos que el derrame de petróleo estaba por las playas por noticias y redes sociales.* NOTICIAS EL COMERCIO PERÚ. <https://elcomercio.pe/lima/derrame-de-petroleo-en-ventanilla-oefa-nos-enteramos-que-el-derrame-de-petroleo-estaba-dispersado-por-todas-las-playas-por-noticias-y-redes-sociales-repsol-refineria-la-pampilla-nndc-noticia/>
- El-Naas, M. H., Alhaija, M. A., & Al-Zuhair, S. (2014). Evaluation of a three-step process for the treatment of petroleum refinery wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 56–62.

Energiminas. (2022). *OEFA: Área afectada por derrame de petróleo equivale a más de 1,500 campos de fútbol – Energiminas.*

Esmailirad, N., Terry, C., Kennedy, H., Li, G., & Carlson, K. (2015). Optimizing metal-removal processes for produced water with electrocoagulation. *ResearchGate*, 87-96.

Espinoza P., & Llatas J. (2022). Aportes de los adsorbentes como alternativas de solución frente a los derrames de petróleo crudo. Revisión sistemática 2022. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/96162>

Etkin, D. S., & Nedwed, T. J. (2021). Effectiveness of mechanical recovery for large offshore oil spills. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 111848.

Favero, A. C., Favero, B. M., Souza, F. S., & Taffarel, S. R. (2019). Treatment of re-refining effluent from lubricating oils by combining electrocoagulation and coagulation-flocculation processes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 55(4), 402–410. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1702407>

Feng, Q., An, C. J., Cao, Y., Chen, Z., Owens, E., Taylor, E., Wang, Z., & Saad, E. A. (2021). An analysis of selected oil spill case studies on the shorelines of Canada. *J. Environ. Inform. Lett*, 5, 39–47.

Fernandez, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 147-170.

Fingas, M. (2011). *Chapter 3 - Introduction to Oil Chemistry and Properties* (M. B. T.-O. S. S. and T. Fingas (ed.); pp. 51–59). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-943-0.10003-6>

Flores Tapia, C. E., & Flores Cevallos, K. L. (2021). PRUEBAS PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE DATOS EN PROCESOS PRODUCTIVOS:: ANDERSON-DARLING, RYAN-JOINER, SHAPIRO-WILK Y KOLMOGÓROV-SMIRNOV. *Societas*, 23(2), 83–106. Recuperado a partir de <https://matriculapre.up.ac.pa/index.php/societas/article/view/2302>

Forbes (2022), Derrame de petróleo de Repsol: ¿Cuál es su impacto ambiental y económico?. 15 de mayo de 2023. Recuperado de

- Fouad, Y.O.A., et al., Performance of an electrocoagulation cell with horizontally oriented electrodes in oil separation compared to a cell with vertical electrodes. *Chem. Eng. J.*, 2009. 436-440
- Gao, Y., Zhao, X., Ju, Z., Yu, Y., Qi, Z., & Xiong, D. (2018). Effects of the suspended sediment concentration and oil type on the formation of sunken and suspended oils in the Bohai Sea. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(10), 1404–1413.
- Garcia, S., Maesia, M., Vieria, J., & Martinez, C. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *ScienceDirect*, 267-299. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.04>
- Garcia & Palacios (2021). EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE ADSORBENTES MINERALES Y ORGÁNICOS EN EL TRATAMIENTO DE DERRAMES PETROLEROS (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR).
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/GARCIA%20RODRIGUEZ%20KELLY.pdf>
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., de Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801(July), 267–299. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>
- Garzón W. (2022). Estudio sobre la combinación de mezclas naturales y químicas para el proceso de coagulación/floculación en la remoción de la turbidez del agua desde una perspectiva química en el tratamiento del agua.
<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/44813>
- Gómez (2018). Contaminación de agua en países de bajos y medianos recursos es un problema de salud pública global. Gómez-Duarte, Oscar, *Revista de la Facultad de Medicina* (2018),66(1): 7 <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.70775>

- Gong, C., Shen, G., Huang, H., He, P., Zhang, Z., & Ma, B. (2017). Removal and transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons during electrocoagulation treatment of an industrial wastewater. *Chemosphere*, 168, 58–64.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.044>
- Gonzales, O. (2022). Derrame de petróleo en Ventanilla: consecuencias en el medioambiente y la salud. Obtenido de: <https://usil.edu.pe/novedades/derrame-de-petroleo-en-ventanilla-consecuencias-en-el-medioambiente-y-la-salud#:~:text=Da%C3%B1a%20completamente%20los%20ecosistemas%20marino,lenta%20por%20intoxicaci%C3%B3n%20e%20hipotermia>.
- González y Vásquez (2022). Derrame de petróleo en ventanilla, Callao, enero del 2022.
- Gousmi, N., Sahmi, A., Li, H. Z., Poncin, S., Djebbar, R., & Bensadok, K. (2016). Purification and detoxification of petroleum refinery wastewater by electrocoagulation process. *Environmental Technology*, 37(18), 2348–2357.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1150349>
- Grubestic, T., Wei, R., & Nelson, J. (2019). Protecting sensitive coastal areas with exclusion booms during oil spill events. *Environmental Modeling & Assessment*, 24, 479–494.
- Hakizimana, J., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *ScienceDirect*, 1-21.
- Hakizimana, J., Gourich, B., Vial, C., Drogui, P., Ouamani, A., Naja, J., & Hilali, L. (2016). Assessment of hardness, microorganism and organic matter removal from seawater by electrocoagulation as a pretreatment of desalination by reverse osmosis. *Desalination*, 393, 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.025>
- Hakizimana, J., Najid, N., Gourich, B., Vial, C., Stiriba, Y., & Naja, J. (2017). Hybrid electrocoagulation/electroflotation/electrodisinfection process as a pretreatment for seawater desalination. *Chemical Engineering Science*, 170, 530-541.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.04.029>
- Hansen, H. K., Peña, S. F., Gutiérrez, C., Lazo, A., Lazo, P., & Ottosen, L. M. (2019). Selenium removal from petroleum refinery wastewater using an

- electrocoagulation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 364, 78–81.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.090>
- Harif, T., Adin, A., 2011. Size and structure evolution of kaolinAl(OH)₃ flocs in the electroflocculation process: a study using static light scattering. *Water Research* 45 (18), 6195- 6206
- Hasan, M. A., Hashem, M. A., Arman, M. N., & Momen, M. A. (2021). Batch Electrocoagulation Process for Removal of Chromium from Tannery Wastewater. *Journal of Engineering Science*, 12(1), 29–34.
<https://doi.org/10.3329/jes.v12i1.53098>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación*, editorial Mcgraw Hill. México, DF.
- Holt, P.K., Barton, G.W., Wark, M., Mitchell, C.A., 2002. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects* 211, 233-248
- Huda, A.S., J. Ispinanto, F. Bahri, O. Decamp (2013). Successful production in semi-bifloc in Indonesia. *Aq. As. Pac.* 2:8-12. Recuperado en 25 de julio de 2023, de https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/877/1/moreno_1.pdf
- Hussain, A., Anwar, F., Sherazi, S., & Przybylski, R. (2008). Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of basil (*Ocinum basilium*) essential oils depends on seasonal variations. *Food Chemistry*, 986-995.
- Ibrahim, H. M., & Salman, R. H. (2022). Real wastewater Treatment by Electrocoagulation-Electro-oxidation Combined System: Optimization using Taguchi Approach. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(3), 135–145.
- IMARPE (2022), Monitoreo de los impactos ocasionados sobre los recursos hidrobiológicos por el derrame de petróleo en el sector litoral de Ventanilla. Callao; febrero de 2022. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2912447/Evaluaci%C3%B3n%20impacto%20derrame%20petr%C3%B3leo%20Ventanilla%20%28inf.%20t%C3%A9cn.%20monit.%20inicial%20IMARPE%29%20-%20feb.%202022.pdf>

- IPIECA-IOGP. (2016). Impacts of Oil Spills on Shorelines: Good Practice Guidelines for Incident Management and Emergency Response Personnel. *IPIECA-IOGP Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP)*.
- Iskander, L., Khalil, C. A., & Boufadel, M. C. (2021). Fate of crude oil in the environment and remediation of oil spills. *STEM Fellowship Journal*, 6(1), 69–75.
- Iturriaga, M. y Astudillo, C. (2017). Modelo predictivo de los rasgos fenotípicos del trigo: una metodología sistemática. Editorial : Universidad de Talca (Chile). Escuela de Ingeniería Civil en Computación. Obtenido de <http://dspace.otalca.cl/handle/1950/12121>
- Jiangsu Kintep Enviromental Protection Co., (17 de 11 de 2021). KINTEP. Obtenido de <https://es.kintep.net/The-source-and-harm-of-oily-wastewater.html>
- Juarez, D. y Ramirez, J. (2019). El supuesto de normalidad en el cálculo del valor en riesgo. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey-Campus Ciudad de México. Asistente General del Programa de Investigación en Regulación Económica. CIGEO, ITESMCCM. E-mail: david.juarez@itesm.mx
- Juárez, Villatoro & López (2011). Apuntes de estadística inferencial. Calzada México, 31
- Kamaraj, R., Ganesan, P., Lakshmi, J., & Vasudevan, S. (2013). Removal of copper from water by electrocoagulation process—effect of alternating current (AC) and direct current (DC). *Environmental Science and Pollution Research*, 20(1), 399–412.
- Keramati, M., & Ayati, B. (2019). Petroleum wastewater treatment using a combination of electrocoagulation and photocatalytic process with immobilized ZnO nanoparticles on concrete surface. *Process Safety and Environmental Protection*, 126, 356–365.
- Khan, M., Khalique, H., & Shams S., (2023). Treatment of Public Sewage Wastewater Using Electrocoagulation Process. *International Journal of Environmental Science and Development* vol. 14, no. 2, pp. 119-124. doi: 10.18178/ijesd.2023.14.2.1423

- Khan, S. U., Islam, D. T., Farooqi, I. H., Ayub, S., & Basheer, F. (2019). Hexavalent chromium removal in an electrocoagulation column reactor: Process optimization using CCD, adsorption kinetics and pH modulated sludge formation. *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 118–130.
- King, S. M., Leaf, P. A., Olson, A. C., Zito, P., & Tarr, M. A. (2014). Photolytic and photocatalytic degradation of surface oil from the Deepwater Horizon spill. *Chemosphere*, 95, 415–422.
- Kobyas, M., & Delipinar, S. (2008). Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 1133–1140.
- Kobyas, M., Can, O.T., Bayramoglu, M., 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *J. Hazard. Mater. B* 100, 163–178
- Kobyas, M., Demirbas, E., Dedeli, A., & Sensoy, M. T. (2010). Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1–3), 326–334.
- Larios G. (2019). Evaluación de tres métodos de tratamiento químico de la fibra de coco para su uso como adsorbente de diésel en agua.
<https://hdl.handle.net/20.500.12893/4960>
- Lekhlif, B., Oudrhiri, L., Zidane, F., Drogui, P. y Blais, JF (2014). Estudio de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria galvánica cargadas con níquel (II) y cromo (VI). *J.Mater. Reinar. Sci* , 5 (1), 111-120.
- Ley General del AmbienteL. (2017). *Ley N° 28611. Ley General del Ambiente*. Lima.
<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley>.
- Ihan, O., Arslankaya, E., Kurt, U., & Gönüllü, T. (9 de 08 de 2007). Treatment of Leachate by Electrocoagulation and Electrooxidation Processes. Houston—Texas, USA: Conference on Environmental Science and Technology (ICEST).
- Mamani A. (2023). Análisis de técnicas de remediación de aguas contaminadas por hidrocarburos, revisión sistemática, 2022.
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/106492>

- Mansoorian, H. J., Mahvi, A. H., & Jafari, A. J. (2014). Removal of lead and zinc from battery industry wastewater using electrocoagulation process: influence of direct and alternating current by using iron and stainless steel rod electrodes. *Separation and Purification Technology*, 135, 165–175.
- Maroto, M., & Rogel, J. (2004). Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contamiandas por hidrocarburos. *GEOCISA*, 297-305.
- Martínez Altamirano, María Elena (2013). Remediación de agua contaminada con petróleo utilizando pennisetum clandestinum como bioadsorbente.
https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrFZldI8wVmXUUObU17egx.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1711694793/RO=10/RU=https%3a%2f%2fwww.dspace.uce.edu.ec%2fentities%2fpublication%2f3580da52-0ce0-4a66-a8a5-f8667627e05c/RK=2/RS=dBSFnXOFeNHSVppxIE4DV9b0oxM-
- Meckenstock, R. U., Boll, M., Mouttaki, H., Koelschbach, J. S., Tarouco, P. C., Weyrauch, P., Dong, X., & Himmelberg, A. M. (2016). Anaerobic degradation of benzene and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Microbial Physiology*, 26(1–3), 92–118.
- Mejía G., A. (2005). Tratamiento de efluentes líquidos a través de procesos acoplados de electrofloculación y generación in situ del reactivo de Fenton. Obtenido de. <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/377/1/Tratamiento%20de%20efluentes%20l%C3%ADquidos%20a%20trav%C3%A9s%20de%20procesos%20acoplados%20de%20Electrofloculaci%C3%B3n.pdf>
- Mendoza, H. (2017). Métodos de regresión, Universidad Nacional de Colombia.
http://red.unal.edu.co/cursos/ciencias/2007315/html/un6/cont_11_72.html
- MINAM. (2004). *Ley N° 28245 .- Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-marco-sistema-nacional-gestion-ambiental>
- MINAM. (2017a). *Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N°-29325.pdf>

- MINAM. (2017b). *LEY N° 28804.- Ley que regula la Declaratoria de Emergencia Ambiental*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N°-28804.pdf>
- Minam (2011). Áreas naturales protegidas del Perú. Conservación para el desarrollo sostenible. Recuperado en 12 de mayo de 2023 de. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/06/ANP240516.pdf>
- MINEM. (2014). *DECRETO SUPREMO N° 039-2014-EM.- Aprueban Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos*. [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/DS-039-2014-EM\(2\).pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/DS-039-2014-EM(2).pdf)
- Mohamed, T., & Moulai-Mostefa, N. (2008). Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. *ScienceDirect*, 107-115.
- Mohammadi, L., Rahdar, A., Bazrafshan, E., Dahmardeh, H., Susan, M. A., & Kyzas, G. Z. (2020). Petroleum Hydrocarbon Removal from Wastewaters: A Review. In *Processes* (Vol. 8, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/pr8040447>
- Mohd & Bee (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*. https://www.nbi.dk/~petersen/Teaching/Stat2017/Power_Comparisons_of_Shapiro-Wilk_Kolmogorov-Smirn.pdf
- Mohtashami, R., & Shang, J. Q. (2019). Electroflotation for treatment of industrial wastewaters: a focused review. *Environmental Processes*, 6(2), 325–353.
- Monleón, G. (2016). Novedades en el ANOVA, Diseño de experimentos, su análisis y diagnóstico. Recuperado en 25 de julio de 2023, de https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Monleon-Getino/publication/304283596_Diseño_de_experimentos_su_análisis_y_diagnóstico/links/576b8cea08aefcf135bd5977/Diseño-de-experimentos-su-analisis-y-diagnostico.pdf
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.

- Moussavi, G., Khosravi, R., & Farzadkia, M. (2011). Removal of petroleum hydrocarbons from contaminated groundwater using an electrocoagulation process: Batch and continuous experiments. *Desalination*, 278(1), 288–294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.039>
- MPFN. (2023). *Fiscalías especializadas*. https://www.mpfm.gob.pe/fiscalias_especializadas/
- Naje, A., Chelliapan, S., Zakaria, Z., Ajeel, M. y Alaba, P. (2017). Una revisión de la tecnología de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales textiles. *Reseñas en Ingeniería Química*, 33 (3), 263-292. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0019>
- Nápoles J., Bahín L., Gutiérrez M., Del Toro D., & Abalos A. (2019). Degradación de diesel en agua de mar utilizando un consorcio bacteriano. *Tecnología Química*, 39(2), 403-420. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v39n2/2224-6185-rtq-39-02-403.pdf>
- Nasrullah, M., Singh, L., Mohamad, Z., Norsita, S., Krishnan, S., Wahida, N., Zularisam, A. (2017). Treatment of palm oil mill effluent by electrocoagulation with presence of hydrogen peroxide as oxidizing agent and polialuminum chloride as coagulant-aid. *Water Resources and Industry* (Vol 17, Pages 7-10) <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.11.001>.
- Nassiri Mahallati, M. (2020). Chapter 9 - Advances in modeling saffron growth and development at different scales. In A. Koocheiki & M. B. T.-S. Khajeh-Hosseini (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition* (pp. 139–167). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818638-1.00009-5>
- Ñaupas, H., Mehía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la investigación Cuantitativa-cualitativa y redacción de la Tesis* (Ediciones de la U (ed.); 4 Edición).
- Nawarkar, C., & Salkar, V. (2019). Solar powered Electrocoagulation system for municipal wastewater treatment. *ScienceDirect*, 222-226.
- Ndimele, P., Saba, A., Ojo, D., Ndimele, C., Anetekhai, M., & Erondy, E. (2018). Chapter 24 - Remediation of Crude Oil Spillage. *ScienceDirect*, 369-384.

- Ñústez Cuartas, Diana Cristina, Paredes Cuervo, Diego, & Cubillos Vargas, Janneth. (2014). Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 37(1), 20-28. Recuperado en 03 de agosto de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702014000100004&lng=es&tlng=es
- Onyije, F. M., Hosseini, B., Togawa, K., Schüz, J., & Olsson, A. (2021). Cancer incidence and mortality among petroleum industry workers and residents living in oil producing communities: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4343.
- OSINERMING. (2019). *Rol y Funciones del Osinergmin*. [https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/OficinaComunicaciones/EventosRealizados/ForoMoquegua/1/Rol y Funciones del Osinergmin.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/OficinaComunicaciones/EventosRealizados/ForoMoquegua/1/Rol_y_Funciones_del_Osinergmin.pdf)
- Panikulam, P. (2015). *Electrocoagulation for the Treatment of Oilsands Tailings Water* (Master's thesis, University of Calgary, Calgary, Canada). Retrieved from <https://prism.ucalgary.ca>. doi:10.11575/PRISM/25860
- Patin, S. (2013). Environmental impact of crude oil spills. In *Reference module in earth systems and environmental sciences*.
- Paitan De La Cruz, M. A., & Sifuentes Cateño, G. (2018). Remoción de contaminantes de aguas residuales de un matadero de equinos por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4376>
- Pinzón O. (2022). *Evaluación de intermediarios de la degradación electrocatalítica de hidrocarburos presentes en aguas residuales de la industria petroquímica, utilizando cromatografía de gases con espectrometría de masas* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82330>
- Quevedo, N. (2022). *Impactos Socioeconómicos Inmediatos Percibidos por el Derrame de Petróleo en la Comunidad Pesquera de Ventanilla*. Licenciatura. Universidad

César Vallejo. LIMA PERÚ. Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo.

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/97071/Quevedo_UNC-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Quispe Y., & Ticona J. (2022). Revisión Sistemática: Tecnologías de fitorremediación para el tratamiento de aguas contaminadas por derrame de hidrocarburos.

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/105200>

Rahmer et al. (2019). Revista Ingeniería Industrial-Año 18 N°1: 27-42, 2019 Uso de la Función de Deseabilidad para la optimización de un proceso de producción de poliestireno. <https://doi.org/10.22320/S07179103/2019.02>.

Ramírez, S. (2004). La explotación de hidrocarburos en el subsuelo marino conflicto ambiental y minero. Bogotá.

Ramírez Ríos, A. y Polack Peña, A.M. (2020) 'Estadística inferencial. Elección de una prueba estadística no paramétrica en Investigación Científica', Horizonte de la Ciencia, 10(19). doi:10.26490/uncp.horizonteciencia.2020.19.597. Recuperado de. <https://revistas.uncp.edu.pe/index.php/horizontedelaciencia/article/view/597>

Ramos R. (2023). Degradación de contaminantes presentes en las aguas residuales de la industria petrolera usando un biorreactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) a escala laboratorio (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84148>

Ray, P. Z., Chen, H., Podgorski, D. C., McKenna, A. M., & Tarr, M. A. (2014). Sunlight creates oxygenated species in water-soluble fractions of Deepwater horizon oil. *Journal of Hazardous Materials*, 280, 636–643.

Resolución Jefatural N.º 030-2016-ANA

Rojas, D. y Tierradentro, E. (2018). Evaluación técnico-financiera del método de electrocoagulación para tratamiento de agua asociada a procesos petroleros (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. Retrieved

<http://hdl.handle.net/20.500.11839/6829>

- Rojas M., & Rengifo N. (2021). Biodegradación de petróleo por *Pseudomonas aeruginosa* en aguas de derrame de la actividad petrolera, Ucayali-2020.
<http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/5316>
- Rui, X. et al. (2011) 'Reduced graphene oxide supported highly porous V2O5 spheres as a high-power cathode material for lithium ion batteries', *Nanoscale*, 3(11), p. 4752. doi:10.1039/c1nr10879d.
- Sahu, J. N., Karri, R. R., Zabed, H. M., Shams, S., & Qi, X. (2021). Current perspectives and future prospects of nano-biotechnology in wastewater treatment. *Separation & Purification Reviews*, 50(2), 139–158.
- Salas S., & Ventura G. (2020). Remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) en aguas dulces mediante biomasa animal de cascos y cuernos de caprinos 2020.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/65680>
- Schmidt-Etkin, D. (2011). *Chapter 2 - Spill Occurrences: A World Overview* (M. B. T.-O. S. S. and T. Fingas (ed.); pp. 7–48). Gulf Professional Publishing.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-943-0.10002-4>
- Schweitzer, L., & Noblet, J. (2018). *Chapter 3.6 - Water Contamination and Pollution* (B. Török & T. B. T.-G. C. Dransfield (eds.); pp. 261–290). Elsevier.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00011-X>
- SENACE. (2003). *Ley N° 27943.- Ley del Sistema Portuario Nacional*.
<https://www.senace.gob.pe/wp-content/uploads/2016/10/NAS-4-11-01-LEY-27943.pdf>
- SERNANP. (24 de enero de 2022). *MINAM*. Obtenido de
<https://www.gob.pe/institucion/sernanp/noticias/578878-sernanp-afectacion-por-derrame-de-petroleo-avanza-hasta-punta-salinas-en-la-provincia-de-huaura>
- Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 22(June), 154–169.
<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.05.009>

- Shestakova, M., & Sillanpaa, M. (2017). *Electrochemical Water Treatment Methods - Chapter 4*. Finland: Butterworth Heinemann.
- Shojaei, S., & Shojaei, S. (2021). *Chapter 23 - Optimization of Process Conditions in Wastewater Degradation Process* (R. R. Karri, G. Ravindran, & M. H. B. T.-S. C. T. in S. W. and W. M. Dehghani (eds.); pp. 381–392). Elsevier.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824463-0.00010-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824463-0.00010-0)
- Soares, M. de O., Peres Teixeira, C. E., Arruda Bezerra, L. E., Vieira Paiva, S., Lopes Tavares, T. C., Martins Garcia, T., Thé de Araújo, J., Campos, C. C., Ferreira, S. M. C., & Matthews-Cascon, H. (2020). Oil spill in South Atlantic (Brazil): Environmental and governmental disaster. *Marine Policy*, *115*, 103879
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, *167*, 55–63.
- Suarez, S., Lema, J. M., & Omil, F. (2009). Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation. *Bioresource Technology*, *100*(7), 2138–2146.
- Suneel, V., Rao, V. T., Suresh, G., Chaudhary, A., Vethamony, P., & Ratheesh, R. (2019). Oil pollution in the Eastern Arabian Sea from invisible sources: A multi-technique approach. *Marine Pollution Bulletin*, *146*, 683–695.
- Tahreen, A., Jami, M. S., & Ali, F. (2020). Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, *37*, 101440.
- Taylor, E., Owens, E. H., Lee, K., An, C. J., & Chen, Z. (2021). A review of numerical models for oil penetration, retention, and attenuation on shorelines. *J. Environ. Inform. Lett*, *5*, 27–38.
- UN. (2023). *Goal 14: Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/oceans/>
- Urteaga, Patricia. Vázquez, Ian. Kahhat, Ramzy. Silva, Jose Carlos. (2022). Los derrames de petróleo en las “zonas de sacrificio” en el Perú. *IDEHPUCP*. Recuperado en 12 de mayo de 2023, de

<https://idehpucp.pucp.edu.pe/analisis1/los-derrames-de-petroleo-en-las-zonas-de-sacrificio-en-el-peru/>

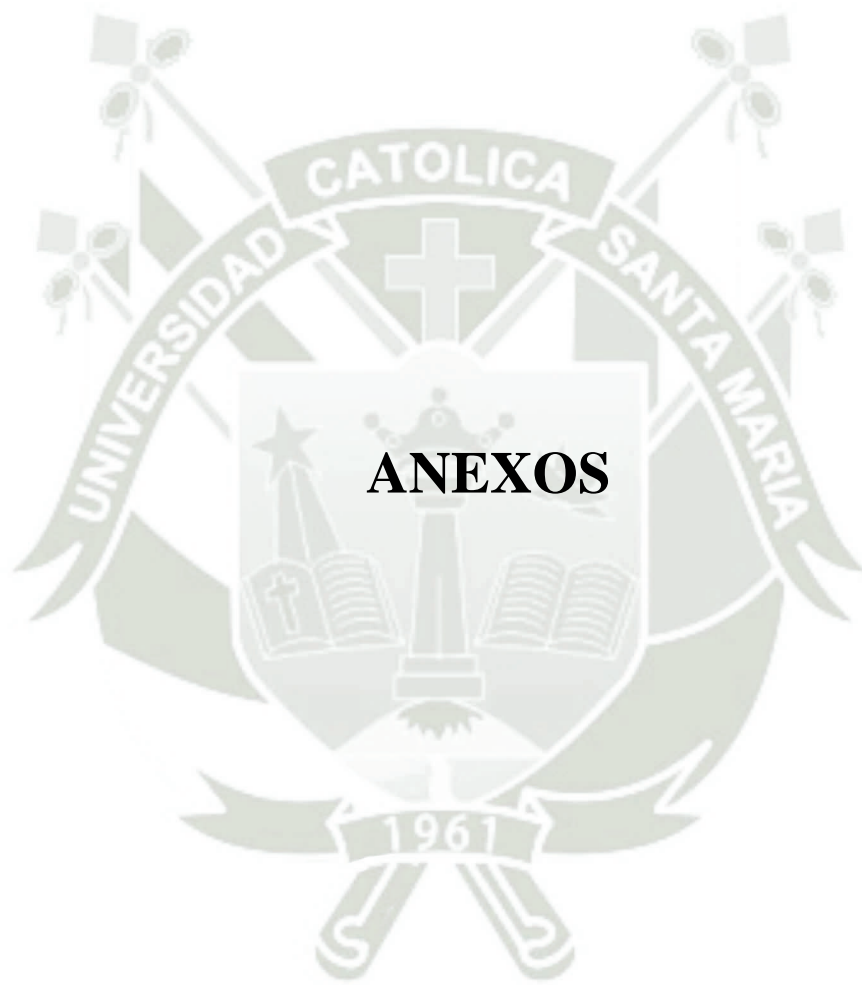
- V. Pulido et al. (2022). Daño ambiental en el litoral marino peruano causado por el derrame de petróleo (enero 2022) en la refinería La Pampilla. *Manglar* 19(1): 67-75
- Varjani, S. J., Rana, D. P., Jain, A. K., Bateja, S., & Upasani, V. N. (2015). Synergistic ex-situ biodegradation of crude oil by halotolerant bacterial consortium of indigenous strains isolated from on shore sites of Gujarat, India. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 116–124.
- Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277–286.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- Vasudevan, S., Lakshmi, J., & Sozhan, G. (2011). Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water. *Journal of Hazardous Materials*, 192(1), 26–34.
- Vera, G. Tam, J. Pinto, E. (2008). EFECTOS ECOTOXICOLÓGICOS DEL PETRÓLEO CRUDO, DIESEL Y KEROSENE SOBRE EL CRECIMIENTO POBLACIONAL DE LA MICROALGA *Chaetoceros gracilis* SCHUTT. *Biotempo* 2008, Volumen 8, 65-75. Recuperado en 12 de mayo de 2023 de <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo/article/download/866/782/1885>
- Vicens, J. Errante, A. Medina, E. (2005). Análisis de la varianza (ANOVA).
- Villalobos E. (2022). ESTUDIO DEL MECANISMO DE TRANSPORTE EN LA MOVILIDAD DE HIDROCARBUROS EN MEDIO ACUOSO.
<https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5316>
- Villamizar J. (2020). Evaluación del efecto del Quitosano como alternativa para la depuración de aguas residuales provenientes de la industria de hidrocarburos.
http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5378/1/Villamizar_2020_TG.pdf

- Villegas, J.P. et al. (2017) 'Remoción de Hidrocarburos de Aguas de Producción de la Industria petrolera Utilizando Nanointermedios compuestos por SiO₂ funcionalizados con nanopartículas Magnéticas', *DYNA*, 84(202), pp. 65–74. doi:10.15446/dyna.v84n202.63686. Obtenido de. <https://www.redalyc.org/journal/496/49655539008/html/>
- Wang, Z., An, C., Lee, K., Owens, E., Chen, Z., Boufadel, M., Taylor, E., & Feng, Q. (2021). Factors influencing the fate of oil spilled on shorelines: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 1611–1628.
- White, H. K., & Karras, S. (2021). The Use of Dispersants in Marine Oil Spill Response. *International Oil Spill Conference*, 2021(1), 689431.
- Xu, J., Du, Y., Qiu, T., Zhou, L., Li, Y., Chen, F., & Sun, J. (2021). Application of hybrid electrocoagulation–filtration methods in the pretreatment of marine aquaculture wastewater. *Water Science and Technology*, 83(6), 1315–1326. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.044>
- Xu, J., Qiu, T., Chen, F., Sun, M., Zhou, L., Sun, J., & Du, Y. (2022). Enhancing the Performance of the Electrocoagulation– Filtration System Treating Mariculture Tailwaters by Using Alternating Pulse Current: Effects of Current Density and Current Conversion Period. *Water*, 14(8), 1181. <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/8/1181>
- Yang, X. et al. (2014) 'A conserved interaction that is essential for the biogenesis of histone locus bodies', *Journal of Biological Chemistry*, 289(49), pp. 33767–33782. doi:10.1074/jbc.m114.616466.
- Younker, J., Lee, S. Y., Gagnon, G. A., & Walsh, M. E. (2011). Atlantic Canada offshore R&D: Treatment of oilfield produced water by chemical coagulation and electrocoagulation. *Offshore Technology Conference*, Obtenido de 3122–3126. <https://doi.org/10.4043/22003-ms>
- Zhang, B., Matchinski, E., Chen B., Ye X., Jing L., Lee K., (2019) Chapter 21 - Marine Oil Spills—Oil Pollution, Sources and Effects, Editor(s): Charles Sheppard, *World Seas: An Environmental Evaluation (Second Edition)*, Academic Press,

Pages 391-406, ISBN 9780128050521, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00024-3>.

Zouboulis, I., & Avranas, A. (2000). Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation. *ScienceDirect*, 153-161.





Anexo 1. Informes de Ensayo



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15792

N° Id.: 0000059469

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: ARROYO PARIENTE FAIRUZ
2.-DIRECCIÓN	: URB. LAS BUGANVILLAS MZA. P. LOTE. 4 A MEDIA CUADRA DE LA DERRAMA MAGISTERIAL CERRO COLORADO - AREQUIPA - AREQUIPA
3.-PROYECTO	: EVALUACION DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACION EN LA REMOCION DE HIDROCARBUROS DE AGUA DE MAR CONTAMINADO CON PETROLEO
4.-PROCEDENCIA	: SIN DETALLE
5.-SOLICITANTE	: ARROYO PARIENTE FAIRUZ
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000004062-2022-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2022-09-26

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Agua
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 1
2.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2022-09-13
3.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2022-09-13 al 2022-09-26



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.

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.1 de 3



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15792

N° Id.: 0000059469

III. MÉTODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Hidrocarburos Totales de Petróleo (C8-C40) (**)	EPA Method 8015 C, Rev. 3, 2007.	Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography.

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

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:

Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 982646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:

Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.2 de 3



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15792

N° Id.: 0000059469

IV. RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-22-48027
CÓDIGO DEL CLIENTE:				MUESTRA NORTE
COORDENADAS:				NO APLICA
UTM WGS 84:				NO APLICA
PRODUCTO:				Agua Salina
SUB PRODUCTO:				Agua de Mar
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO :				24-08-2022 09:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Hidrocarburos Totales de Petróleo (C8-C40)				
Hidrocarburos totales de petróleo (C8-C40) (**)	mg/L	0,003	0,010	316,512

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " \leq "= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, " \leq "= Menor que el L.D.M.

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR

P (+073) 616843
Cel.: 982646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.3 de 3



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15490

N° Id.: 000059167

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: ARROYO PARIENTE FAIRUZ
2.-DIRECCIÓN	: URB. LAS BUGANVILLAS MZA. P. LOTE. 4 A MEDIA CUADRA DE LA DERRAMA MAGISTERIAL CERRO COLORADO - AREQUIPA - AREQUIPA
3.-PROYECTO	: EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS DE AGUA DE MAR
4.-PROCEDENCIA	: NO INDICA
5.-SOLICITANTE	: ARROYO PARIENTE FAIRUZ
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000003839-2022-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2022-09-21

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Agua
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 16
2.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2022-09-08
3.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2022-09-08 al 2022-09-21



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.

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR

P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.1 de 6



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15490

N° Id.: 0000059167

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.
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

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.2 de 6



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15490

N° Id.: 0000059167

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-46902	M-22-46903	M-22-46904	M-22-46905			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	T1	T2	T3	T4			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina			
SUB PRODUCTO:	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	25-08-2022 13:30	24-08-2022 10:30	24-08-2022 17:00	24-08-2022 11:45			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (**)	mg/L	0,0050	0,0100	0,2898	0,6672	3,4870	0,7043
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (*)	mg/L	0,0050	0,0100	-	-	-	-

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

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " \leq "= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, " \leq "= Menor que el L.D.M.

*-: No ensayado

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:

Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:

Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.3 de 6



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15490

N° Id.: 000059167

ITEM	5	6	7	8			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-46906	M-22-46907	M-22-46908	M-22-46909			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	T5	T6	T7	T8			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina			
SUB PRODUCTO:	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	25-08-2022 16:40	25-08-2022	24-08-2022 12:46	25-08-2022 18:15			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (**)	mg/L	0,0050	0,0100	0,1901	0,2791	0,5664	0,3108
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (*)	mg/L	0,0050	0,0100	-	-	-	-

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

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

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

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

-: No ensayado

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:

Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:

Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.4 de 6



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15490

N° Id.: 000059167

ITEM	9	10	11	12			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-46910	M-22-46911	M-22-46912	M-22-46913			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	T9	T10	T11	T12			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina			
SUB PRODUCTO:	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	25-08-2022 19:19	08-09-2022 11:00	06-08-2022 04:00	29-08-2022 14:42			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (**)	mg/L	0,0050	0,0100	1,1991	0,7850	0,2278	0,9651
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (*)	mg/L	0,0050	0,0100	-	-	-	-

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

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " \leq " Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, " \leq " Menor que el L.D.M.

*: No ensayado

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:

Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:

Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.5 de 6



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15490

N° Id.: 000059167

ITEM	13	14	15	16			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-46914	M-22-46915	M-22-46916	M-22-46917			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	T13	T14	T15	T16			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina			
SUB PRODUCTO:	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	07-09-2022 06:10	29-08-2022 11:20	07-09-2022 12:30	25-08-2022			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (**)	mg/L	0,0050	0,0100	0,0888	1,0941	-	0,1682
Hidrocarburos Totales de Petróleo(C10 C40)-Agua (*)	mg/L	0,0050	0,0100	-	-	0,3251	-

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

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " \leq "= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, " \leq "= Menor que el L.D.M.

*-: No ensayado

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR

P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.6 de 6



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15492

N° Id.: 000059169

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: ARROYO PARIENTE FAIRUZ
2.-DIRECCIÓN	: URB. LAS BUGANVILLAS MZA. P LOTE. 4 A MEDIA CUADRA DE LA DERRAMA MAGISTERIAL CERRO COLORADO - AREQUIPA - AREQUIPA
3.-PROYECTO	: EVALUACION DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACION EN LA REMOCION HIDROCARBUROS DE AGUA DE MAR CONTAMINADO CON CRUDO DE PETRÓLEO
4.-PROCEDENCIA	: NO INDICA
5.-SOLICITANTE	: ARROYO PARIENTE FAIRUZ
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000004062-2022-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2022-09-19

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Agua
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 5
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2022-09-08
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2022-09-08 al 2022-09-19



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.

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR

P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.1 de 4



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15492

N° Id.: 0000059169

III. MÉTODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Conductividad ⁽¹⁾	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B 23rd Ed. 2017	Conductivity. Laboratory Method.
pH ⁽¹⁾	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 23 rd Ed. 2017	pH Value Electrometric Method
Alcalinidad por Carbonatos ⁽¹⁾	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 23 rd Ed. 2017	Alkalinity. Titration Method
Aniones (Salino) ²	EPA 300.0 Rev. 2.1, 1993, (VALIDATED - Applied out of reach, 2020).	Determination of inorganic anions by ion chromatography
Hidrocarburos Totales de Petroleo (C8-C40) ^(*)	EPA Method 8015 C, Rev. 3. 2007.	Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography.
Hidrocarburos Totales de Petroleo (C8-C40) ^(**)	EPA Method 8015 C, Rev. 3. 2007.	Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography.

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

*SMEWW : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

^(*) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:

Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:

Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág. 2 de 4



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15492

N° Id.: 0000059169

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-46919	M-22-46920	M-22-46921	M-22-46922			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	MUESTRA SUR	T17	T18	T19			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina	Agua Salina			
SUB PRODUCTO:	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar	Agua de Mar			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	24-08-2022 09:00	07-09-2022 14:00	24-08-2022 15:32	24-08-2022 16:05			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Conductividad (*)	µS/cm	NA	0,01	40 590,00	-	-	-
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	7,58	-	-	-
Alcalinidad por Carbonatos (**)	mg CaCO ₃ /L	2,00	5,00	<5,00	-	-	-
Aniones (Salino)							
Cloruro ²	mg/L	NA	NA	22 451	-	-	-
Hidrocarburos Totales de Petróleo (C8-C40)							
Hidrocarburos totales de petróleo (C8-C40) (*)	mg/L	0,003	0,010	-	-	-	-
Hidrocarburos Totales de Petróleo (C8-C40)							
Hidrocarburos totales de petróleo (C8-C40) (**)	mg/L	0,003	0,010	<0,010	2,742	0,227	0,280

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

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " \leq " Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, " \leq " Menor que el L.D.M.

-: No ensayado

NA: No Aplica

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 982646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.3 de 4



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



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-15492

N° Id.: 000059169

ITEM				5
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-22-46923
CÓDIGO DEL CLIENTE:				T20
COORDENADAS:				NO APLICA
UTM WGS 84:				NO APLICA
PRODUCTO:				Agua Salina
SUB PRODUCTO:				Agua de Mar
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO :				07-09-2022 04:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Conductividad (*)	µS/cm	NA	0,01	-
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	-
Alcalinidad por Carbonatos (**)	mg CaCO ₃ /L	2,00	5,00	-
Aniones (Salino)				
Cloruro ²	mg/L	NA	NA	-
Hidrocarburos Totales de Petroleo (C8-C40)				
Hidrocarburos totales de petróleo (C8-C40) (*)	mg/L	0,003	0,010	0,373
Hidrocarburos Totales de Petroleo (C8-C40)				
Hidrocarburos totales de petróleo (C8-C40) (**)	mg/L	0,003	0,010	-

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

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<= Menor que el L.D.M.

*-: No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR

P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.4 de 4

Anexo 2. Panel fotográfico



Fotografía 1: Monitoreo de agua de mar contaminada con crudo de petróleo.



Fotografía 2: Monitoreo del agua de mar contaminada con crudo de petróleo.



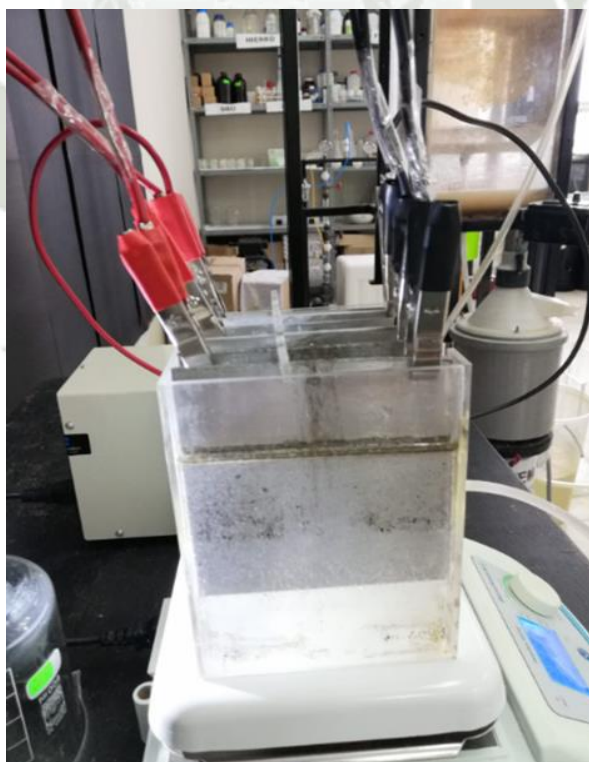
Fotografía 3: Monitoreo de agua de mar contaminada con crudo de petróleo.



Fotografía 4: Monitoreo de agua de mar contaminada con crudo de petróleo.



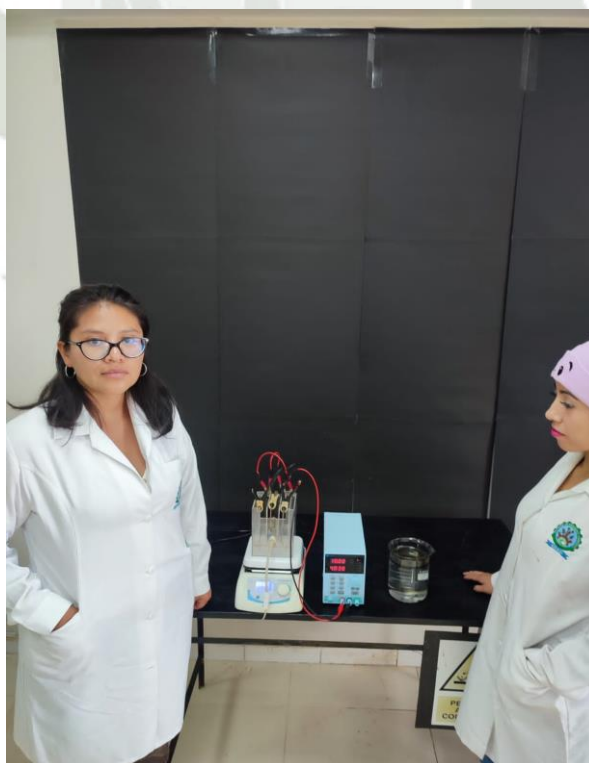
Fotografía 5: Preparación de vasos para las pruebas de Electrocoagulación.



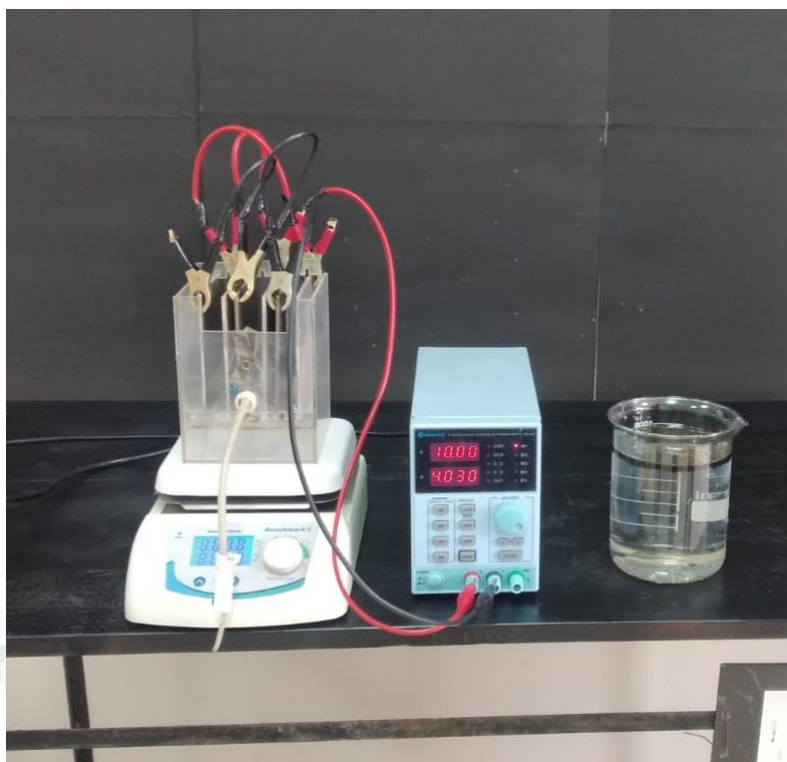
Fotografía 6: Preparación del Sistema de Electrocoagulación.



Fotografía 7: Preparación del Sistema de Electrocoagulación.



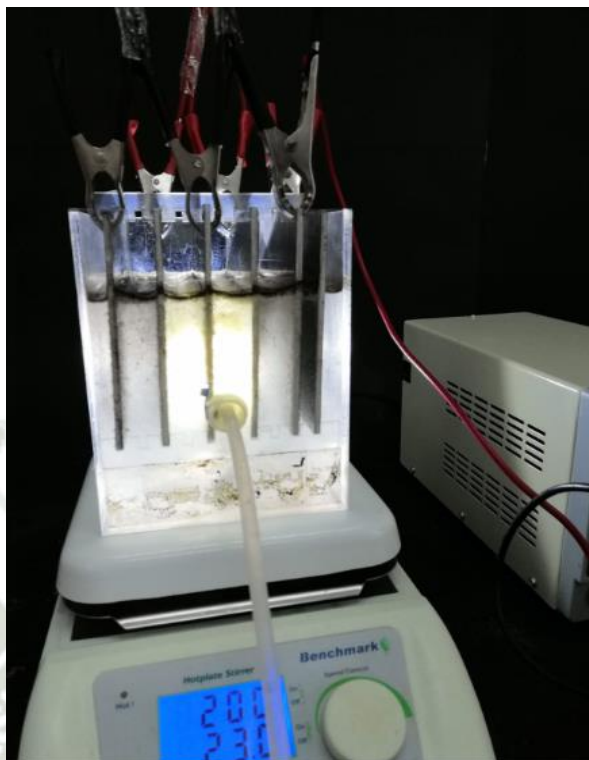
Fotografía 8: Armado del Sistema de Electrocoagulación en Laboratorio.



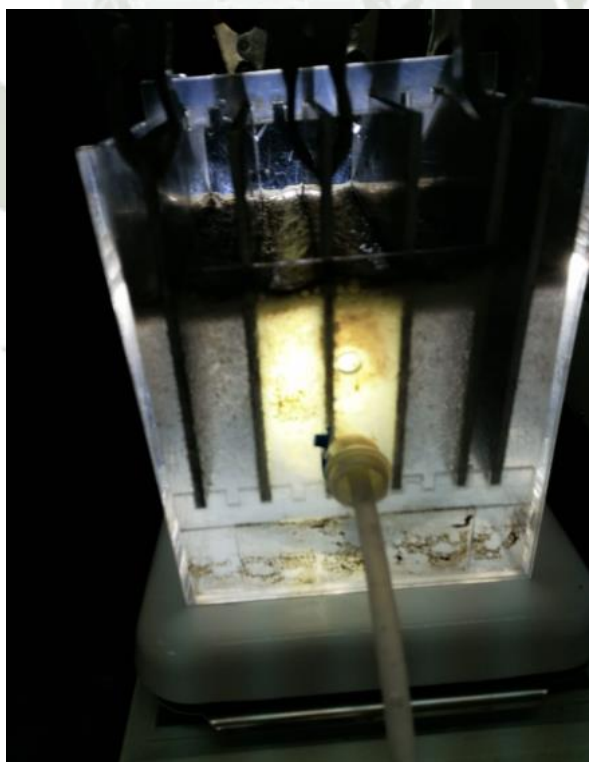
Fotografía 9: Armado del Sistema de Electrocoagulación en Laboratorio.



Fotografía 10: Armado del Sistema de Electrocoagulación en Laboratorio.



Fotografía 11: Funcionamiento del Sistema de Electrocoagulación.



Fotografía 12: Funcionamiento del Sistema de Electrocoagulación.

Anexo 3. Análisis de Varianza

a) Diseño factorial 2^2

	D1	D2
Ti1	0.667	0.704
	0.566	0.965
	0.285	0.827
Ti2	0.279	2.998
	0.228	1.199
	0.168	2.742

b) Configuración experimental:

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
Tratamiento 1 (9D – 5 Ti)	0.6672	0.566	0.285	0.51
Tratamiento 2 (9D – 30 Ti)	0.279	0.228	0.168	0.23
Tratamiento 3 (20D – 5Ti)	0.704	0.965	0.827	0.83
Tratamiento 4 (20D – 30 Ti)	2.998	1.199	2.742	2.31

c) Análisis de Varianza de los Tratamientos en estudio:

F. de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft 5%	Ft 1%	Sig.
Tratamientos	3	7.78	2.59	10.306	4.07	7.59	☀☀
Factor 01 (min) T	1	1.08	1.08	4.291	5.32	11.26	NS
Factor 02 (A/m ²) D	1	4.37	4.37	17.371	5.32	11.26	☀☀
Interacción D x T	1	2.33	2.33				
Dentro del grupo	8	2.01	0.25				
TOTAL	11	9.79					

TRAT.	CLAVE	PROM.	5%	n	Información Adicional
T4	20 D 30 T	2.31	a	4	Densidad 20 A/m ² durante 30 minutos
T3	20 D 5 T	0.83	b	3	Densidad 20 A/m ² durante 5 minutos
T1	9 D 5T	0.51	b	1	Densidad 9 A/m ² durante 5 minutos
T2	9 D 30 T	0.23	b	2	Densidad 9 A/m ² durante 30 minutos

Diferencia Mínima Significativa (Tukey):

		5%	1%
Tratamientos	Di x Ti	1.31	1.80
Efectos	T	0.67	0.97
Principales	D	0.67	0.97

EFECTOS PRINCIPALES

TIEMPO	Prom.	NS	Información Adicional
30 T	1.27	a	30 MINUTOS
5 T	0.67	a	5 MINUTOS

DENSIDAD DE CORRIENTE	Prom.	5%	Información Adicional
20D	1.57	a	20 A/m ²
9D	0.37	b	9 A/m ²

Anexo 4. Fundamento matemático para el diseño experimental

De acuerdo con Montgomery (2017):

A. Configuración del Diseño Factorial

El diseño factorial 2^2 demuestra que tenemos dos factores (Densidad de Corriente y Tiempo) y cada factor tiene dos niveles.

- **Factor A: Densidad de Corriente**
 - Nivel 1: 9 A/m²
 - Nivel 2: 20 A/m²
- **Factor B: Tiempo**
 - Nivel 1: 5 minutos
 - Nivel 2: 30 minutos

B. Para hallar el número de Tratamientos

Para nuestro diseño factorial 2^2 :

$$\text{Número de tratamientos} = \text{Niveles Factor A} \times \text{Niveles Factor B} = 2 \times 2 = 4$$

C. Réplicas

Cada tratamiento se replicó tres veces, lo que significa que cada combinación de niveles se probó en tres unidades experimentales.

D. Número Total de Unidades Experimentales

Número total de observaciones = Número de tratamientos \times Número de réplicas
 $= 4 \times 3 = 12$

Unidades experimentales que se detallan en la Tabla 8.

E. Estructura del Modelo Matemático

El modelo matemático general para un diseño factorial 2^2 es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} es la respuesta observada.
- μ es la media general.
- α_i es el efecto del i -ésimo nivel del factor A.
- β_j es el efecto del j -ésimo nivel del factor B.
- $(\alpha\beta)_{ij}$ es la interacción entre el i -ésimo nivel del factor A y el j -ésimo nivel del factor B.
- ϵ_{ijk} es el error experimental.

Anexo 5. Fundamento matemático para el diseño experimental

El TPH (Total de Hidrocarburos del Petróleo) residual es la cantidad de contaminante que queda después de un proceso de tratamiento o limpieza. Para determinar cuánto se ha eliminado en términos porcentuales, se siguió un procedimiento sistemático, desarrollado de forma empírica y avalado por autores como Moussavi (2011) y Hakizimana (2016).

El procedimiento inició al calcular el promedio de TPH residual que se obtuvo luego de aplicar los tratamientos de electrocoagulación con sus respectivas repeticiones, seguidamente, se procedió a multiplicar el TPH residual promedio por 100, que representa el total o 100%, ya que este paso convierte el promedio del TPH residual en un valor porcentual relativo al TPH inicial, el cual se divide entre el TPH inicial.

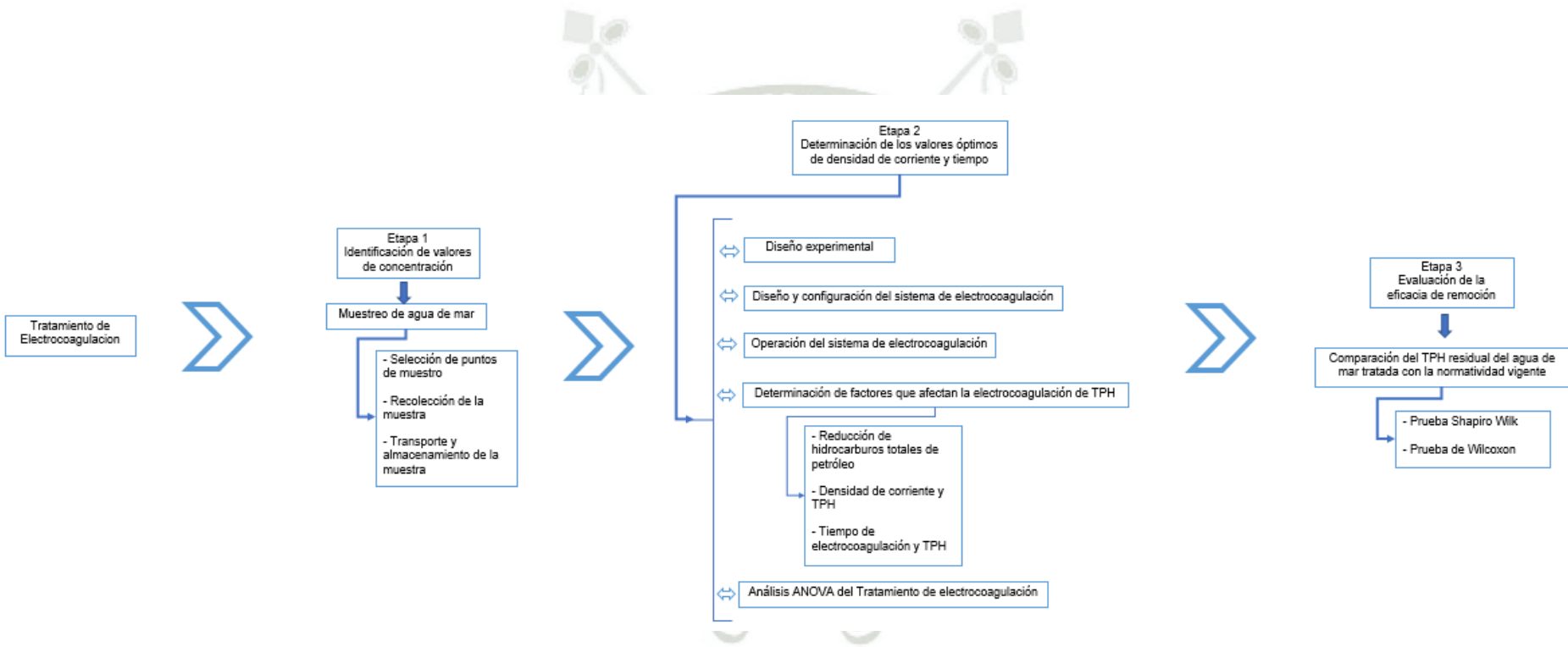
Cabe resaltar que, el TPH inicial es la concentración total de hidrocarburos antes de cualquier tratamiento. Al dividir el valor obtenido en el paso anterior por el TPH inicial, se obtiene una fracción que representa la proporción del TPH residual en comparación con el TPH original.

Finalmente se procedió a restar esta fracción obtenida de 100%, y es así como se obtuvo el porcentaje de remoción de TPH, como se resumen en la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de remoción} = 100 - (\text{Tph residual} * 100 / \text{TPH inicial})$$

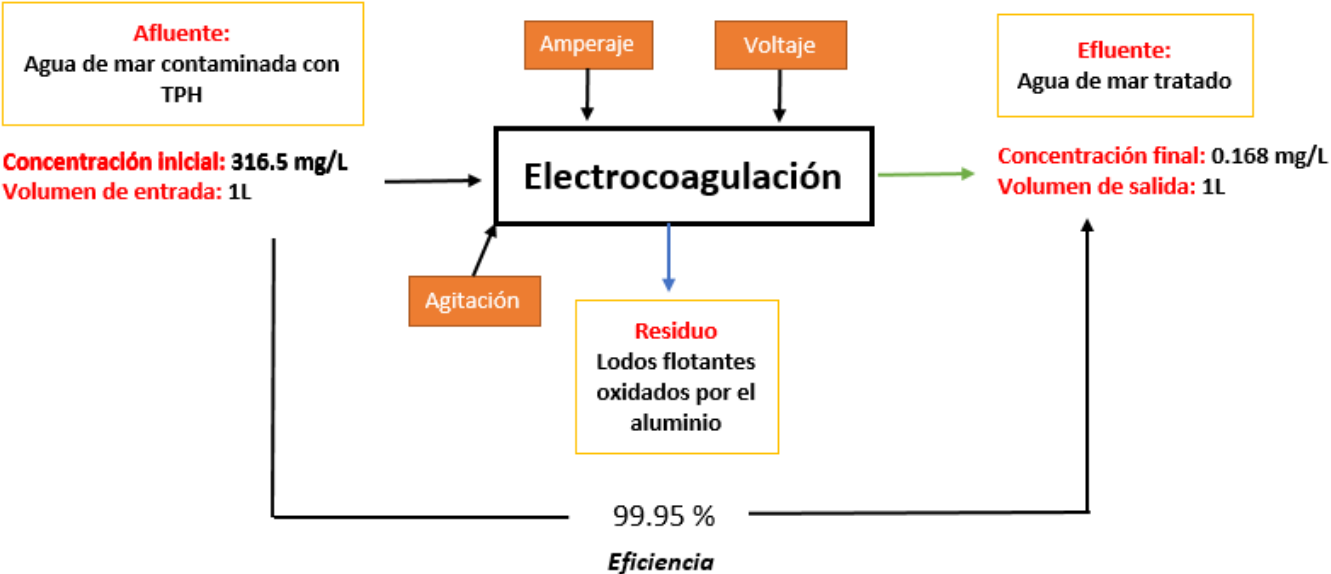
Ecuación. Conversión de TPH residual en un porcentaje de remoción

Anexo 4. Diagrama de bloques del proceso de electrocoagulación



Anexo 5. Balance de Materia y Energía del Tratamiento T2

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA



Anexo 6. Certificado de Acreditación de ALAB Analytical Laboratory E.I.R.L.

Certificado



INACAL
Instituto Nacional
de Calidad
Acreditación

La Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad – INACAL, en el marco de la Ley N° 30224, **OTORGA** el presente certificado de Renovación de la Acreditación a:

ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.

Laboratorio de Ensayo

En su sede ubicada en: Av. Guardia Chalaca N°1877, distrito de Bellavista, provincia Constitucional del Callao, departamento de Lima

Con base en la norma

NTP-ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración

Facultándolo a emitir Informes de Ensayo con Símbolo de Acreditación. En el alcance de la acreditación otorgada que se detalla en el DA-acr-06P-21F que forma parte integral del presente certificado llevando el mismo número de registro indicado líneas abajo.

Fecha de Renovación: 26 de julio de 2023
Fecha de Vencimiento: 25 de julio de 2027



Cedula: N° 234-2023-INACAL/DA
Adenda N°: 04 del contrato N° 025-16/INACAL-DA
Registro N°: LE-096

El presente certificado tiene validez con su correspondiente Alcance de Acreditación y cédula de notificación dado que el alcance puede estar sujeto a ampliaciones, reducciones, actualizaciones y suspensiones temporales. El alcance y vigencia debe confirmarse en la página web www.inacal.gob.pe/acreditacion/categoria/acreditados, y/o a través del código QR al momento de hacer uso del presente certificado

La Dirección de Acreditación del INACAL es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Multilateral (MLA) de Inter American Accreditation Cooperation (IAAC) e International Accreditation Forum (IAF) y del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo con la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

DA-acr-01P-02M Ver: 03



Firmado digitalmente por AGUILAR RODRIGUEZ Lidia Patricia FAU
20600283015 soft
Fecha: 2023-09-13 18:32:08
Motivo: Soy el Autor del Documento

PATRICIA AGUILAR RODRÍGUEZ
Directora (d.t.), Dirección de Acreditación - INACAL

Fecha de emisión: 13 de setiembre de 2023

Anexo 7. Método utilizado para hallar la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo

EPA Method 8015 C, Rev. 3, 2007

Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography

METHOD 8015C

NONHALOGENATED ORGANICS BY GAS CHROMATOGRAPHY

SW-846 is not intended to be an analytical training manual. Therefore, method procedures are written based on the assumption that they will be performed by analysts who are formally trained in at least the basic principles of chemical analysis and in the use of the subject technology.

In addition, SW-846 methods, with the exception of required method use for the analysis of method-defined parameters, are intended to be guidance methods which contain general information on how to perform an analytical procedure or technique which a laboratory can use as a basic starting point for generating its own detailed Standard Operating Procedure (SOP), either for its own general use or for a specific project application. The performance data included in this method are for guidance purposes only, and are not intended to be and must not be used as absolute QC acceptance criteria for purposes of laboratory accreditation.

1.0 SCOPE AND APPLICATION

1.1 This method may be used to determine the concentrations of various nonhalogenated volatile organic compounds and semivolatile organic compounds by gas chromatography. The following RCRA compounds were quantitatively determined by this method, using the preparative techniques indicated.

Compound	CAS No.*	Appropriate Technique				
		Purge-and-Trap ^b	Head-space ^a	Direct Aqueous Injection	Azeo. Dist. ^c	Vacuum Dist. ^d
Acetone	67-64-1	pp / ht	x	x	x	x
Acetonitrile	75-05-8	pp	ne	x	x	ne
Acrolein	107-02-8	pp	ne	x	x	x
Acrylonitrile	107-13-1	pp	ne	x	x	x
Allyl alcohol	107-18-6	ht	ne	x	x	ne
t-Amyl alcohol (TAA)	75-85-4	ht	x	ne	ne	x
t-Amyl ethyl ether (TAEE)	919-94-8	x/ ht	x	ne	ne	x
t-Amyl methyl ether (TAME)	994-05-8	x/ ht	x	ne	ne	x
Benzene	71-43-2	x	x	ne	ne	x
t-Butyl alcohol (TBA)	75-85-0	ht	x	x	x	x
Crotonaldehyde	123-73-9	pp	ne	x	x	ne
Diethyl ether	60-29-7	x	ne	x	ne	ne
Diisopropyl ether (DIPE)	108-20-3	x/ ht	x	ne	ne	x
Ethanol	64-17-5	l	x	x	x	x
Ethyl acetate	141-78-6	l	x	x	x	ne
Ethyl benzene	100-41-4	x	x	ne	ne	x
Ethylene oxide	75-21-8	l	ne	x	x	ne
Ethyl tert-butyl ether (ETBE)	637-92-3	x/ ht	x	ne	ne	x
Isopropyl alcohol (2-Propanol)	67-63-0	pp	x	x	x	ne

8015C - 1

Revision 3
February 2007