

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Diseño de un sistema de electroremediación para suelos
provenientes de un pasivo ambiental contaminado por
hidrocarburos en el distrito Huancane, Puno - Perú, 2024**

Tesis presentada por las Bachilleres:

Gonzales Barreda, Andrea Camila

ORCID: 0009-0008-9674-232X

Tupayachi Holgado, Marilu Presentacion

ORCID: 0009-0008-9240-215X

para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor (a):

Mg. Benegas Llanos, Rosario Carolina

ORCID: 0000-0002-1728-4949

Arequipa - Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 20 de Mayo del 2025

Dictamen: 010128-C-EPIA-2025

Visto el borrador del expediente 010128, presentado por:

2016200722 - TUPAYACHI HOLGADO MARILU PRESENTACION

2016240152 - GONZALES BARREDA ANDREA CAMILA

Titulado:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ELECTORREMEDIACIÓN PARA SUELOS PROVENIENTES DE UN PASIVO AMBIENTAL CONTAMINADO POR HIDROCARBUROS EN EL DISTRITO HUANCANE, PUNO - PERÚ, 2024

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO AMBIENTAL

**29727348 - LAZARTE ARREDONDO SONIA
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



**43606549 - CARDENAS PILLCO BERLY EDINSSON
DICTAMINADOR**



Diseño de un sistema de biorremediación para suelos provenientes de un pasivo ambiental contaminado por hidrocarburos en el distrito Huancane, Puno - Perú, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
7	oa.upm.es Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.upse.edu.ec Fuente de Internet	<1%
9	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

A Dios y el destino por permitirnos realizar este trabajo y nos bendijo con la persistencia para finalizarlo.

A nuestra familia gracias al soporte constante e sin condiciones que nos han dado todos estos años, tanto de estudio como de desarrollo profesional.

A nuestros hermanos que crearon el camino y son nuestros modelos por seguir, por su duro trabajo y capacidades.

A nuestros maestros que fueron nuestra guía y fuente de aprendizaje.

A todos ustedes les dedicamos este trabajo expresando nuestra sincera gratitud y amor.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento y amor a mi padre Felix Tupayachi, quien a lo largo de los años ha sido mi soporte, apoyo y guía. Encaminándome hacia este y otros momentos significativos de mi vida que me han traído plenitud y felicidad. Tú, papá, me has brindado un amor incondicional en estos 26 años de mi vida, y por ello mis logros, son tus logros. Gracias por todo, te amo profundamente, te agradezco y dedico este trabajo.

A mi hermana Odaliz Tupayachi, uno de mis más grandes pilares. Gracias a su amor, paciencia y ejemplo me encuentro aquí hoy. A mi familia, que es incondicional. Y a Dios que esta siempre presente en la forma de mi madre, de mis abuelos Guillermo y Alcides, de mis hermanos, de mis amigos, de mi pareja y en su propia forma ayudándome a superar momentos difíciles.

Marilu Tupayachi Holgado

A mis papás Judith y Mario, a quienes les debo mi vida entera, quienes están en cada paso y por quienes soy la mujer que soy. Gracias por su esfuerzo silencioso y su amor infinito.

A mis hermanos Susan, Romina y Gerson, por ser mis amigos y mis compañeros de vida. Gracias por estar, incluso en el silencio. A mis tíos por ser la extensión de mi hogar. Gracias por su corazón generoso, su apoyo y consejo. Braulio, el amor que me dio más amor; mi compañero eterno de sueños. Y a mi pequeña Doménica, mi aventura más preciosa y la mejor historia que el destino escribió para mí. Gracias por ser la parte de mi vida que me faltaba.

Le agradezco al destino por regalarme personas tan increíbles. Gracias a todos por formar parte de mi historia. Esta tesis es un pedacito del amor que me han dado.

Andrea Gonzales Barreda

RESUMEN

Este estudio examina la contaminación del suelo por hidrocarburos en un pasivo ambiental del distrito de Huancané, Puno, una problemática que degrada severamente las propiedades fisicoquímicas del terreno y supone un considerable riesgo para la salud humana y el equilibrio del ecosistema local. Como estrategia de mitigación, se evaluó la electroremediación, una tecnología que aplica una corriente eléctrica para generar reacciones de óxido-reducción que promueven la eliminación de estos contaminantes.

El objetivo central fue determinar la eficacia del método e identificar los parámetros operativos ideales para su implementación. Para lograrlo, se ejecutó un diseño experimental factorial 2^3 , en el que se modificaron tres factores clave: el nivel de voltaje (15V y 30V), la dosis de surfactante de saponina (10 ml/kg y 20 ml/kg), y el tipo de solución electrolítica (cloruro de sodio o una mezcla de EDTA con sosa cáustica). Se llevaron a cabo ocho tratamientos distintos, cada uno por duplicado, cuantificando la concentración de hidrocarburos antes y después de cada ensayo para posteriormente analizar estadísticamente la influencia de cada factor en el rendimiento del proceso.

Los hallazgos demostraron que la combinación más eficaz —que empleó un voltaje de 30V, 20 ml/kg de saponina y la solución de EDTA con sosa cáustica— alcanzó una notable tasa de remoción de hidrocarburos, situada entre el 90% y el 92%. En marcado contraste, la configuración menos eficiente, con 15V, 10 ml/kg de saponina y cloruro de sodio, apenas logró eliminar entre el 45% y el 47% del contaminante. Adicionalmente, un análisis contextual sobre los pasivos ambientales a nivel nacional reveló que la región de Piura alberga el 95.8% de los sitios impactados por hidrocarburos.

La investigación concluye que la electroremediación es una técnica altamente efectiva para la restauración de suelos contaminados. Se ha puesto de manifiesto que un voltaje elevado

(30V) junto con el uso de EDTA y sosa cáustica maximiza la eliminación del contaminante, mientras que la adición del surfactante saponina potencia considerablemente el proceso. Estos resultados confirman el potencial de esta tecnología como una solución sostenible para la rehabilitación de terrenos afectados por actividades petroleras.

Palabras clave: *Electroremediación, oxido-reducción y remoción.*



ABSTRACT

This investigation confronts the challenge of soil pollution by hydrocarbons at an environmental liability site within the Huancane district, Puno. This form of contamination poses a significant threat to both the ecosystem and human health by severely degrading the soil's physicochemical properties. To counteract these effects, an electrochemical remediation approach was implemented, which utilizes an applied electric current to stimulate oxidation-reduction reactions, thereby facilitating the breakdown and removal of hydrocarbon pollutants.

The primary goal of this study was to assess the method's overall efficiency and pinpoint the optimal operational parameters. A 2³ factorial experimental design was developed, manipulating three critical variables: the applied voltage (15V and 30V), the concentration of a natural saponin surfactant (10 ml/kg and 20 ml/kg), and the electrolyte composition (sodium chloride versus a solution of EDTA with caustic soda). Eight distinct experimental configurations were conducted in duplicate, with hydrocarbon levels measured before and after each treatment to statistically determine the factors' influence on the process efficacy.

The results revealed that the most successful treatment, combining 30V, 20 ml/kg of saponin, and the EDTA solution, achieved a hydrocarbon removal rate of 90-92%. Conversely, the least effective configuration, using 15V, 10 ml/kg of saponin, and sodium chloride, only managed a removal efficiency of 45-47%. A broader analysis of the nation's environmental liabilities also highlighted that the Piura region contains 95.8% of all hydrocarbon-related sites.

Ultimately, this research confirms that electroremediation stands as an efficient and effective method for reclaiming soils contaminated by hydrocarbons. The findings validate that a high-voltage application (30V) combined with an EDTA and caustic soda electrolyte optimizes contaminant removal, a process significantly enhanced by the integration of saponin

as a surfactant. These outcomes firmly support the feasibility of this technology as a sustainable alternative for rehabilitating environments impacted by petroleum-related activities.

Keywords: *Electroremediation, oxidation-reduction, removal.*



ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I MARCO METODOLÓGICO 4

1. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.1. Problemática de la investigación 4

1.2. Justificación 5

1.3. Formulación de objetivos 8

2. HIPÓTESIS 9

CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO 11

1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 11

2. MARCO TEÓRICO 25

2.1. Suelo 25

2.2. Contaminación del suelo 26

2.3. Pasivos ambientales sector de hidrocarburos 27

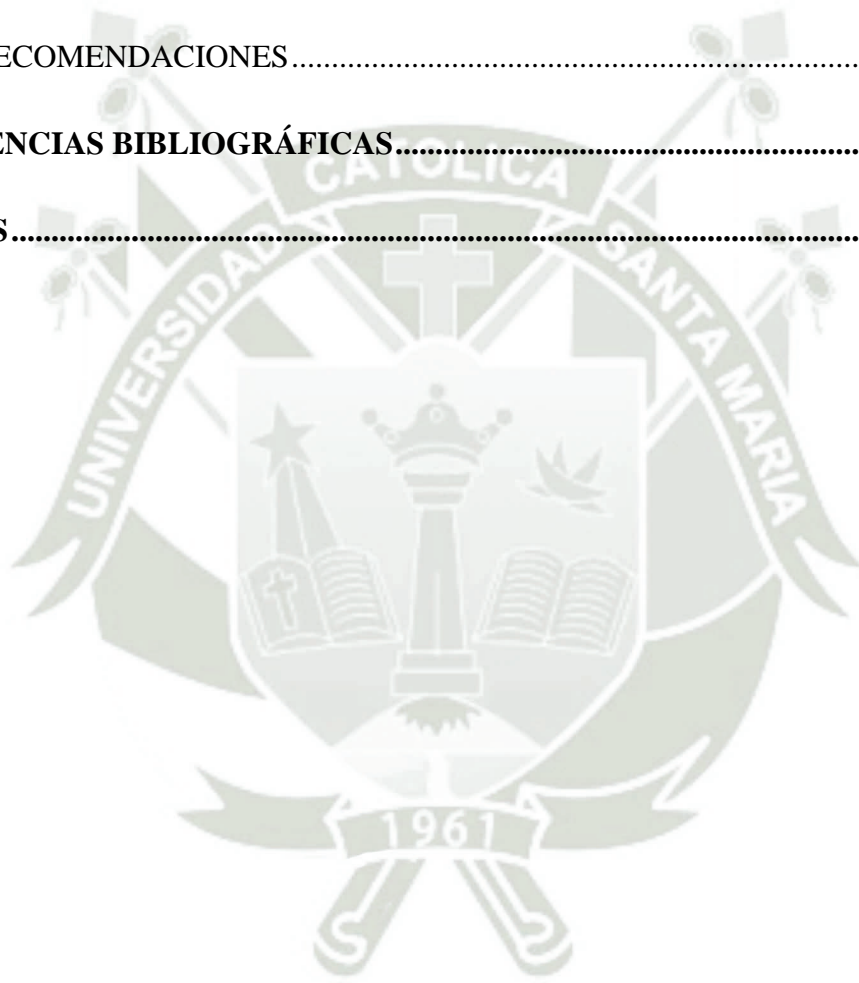
2.4. Petróleo 28

2.5. Tratamientos para la remediación y sus limitaciones 32

2.6. Reacciones químicas fundamentales en el proceso de
electrorremediación 39

3. MARCO LEGAL.....	39
CAPÍTULO III METODOLOGÍA PROPUESTA.....	42
1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	42
1.1. Tipo	42
1.2. Nivel.....	43
2. METODOLOGÍA.....	44
2.1. Evaluar la calidad del suelo del pasivo ambiental elegido, mediante el protocolo de toma de muestra de suelos contaminados establecido por la guía del MINAM.....	44
2.2. Determinación de las condiciones óptimas de la celda de electrorremediación.....	47
2.3. Optimización de los procesos de electrorremediación a través de un diseño experimental	51
2.4. Evaluación de la eficiencia de remoción de hidrocarburos a través de la electrorremediación.....	56
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	61
1. RESULTADOS	61
1.1. Evaluar la calidad del suelo del pasivo ambiental elegido mediante el protocolo de toma de muestra de suelos contaminados por el MINAM.....	61
1.2. Determinación de las condiciones óptimas de la celda de electrorremediación.....	69
1.3. Optimización de los procesos de electrorremediación a través de un diseño experimental	72

1.4. Evaluación de la eficiencia de remoción de hidrocarburos a través de la biorremediación.....	77
2. DISCUSIONES.....	83
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
1. CONCLUSIONES	91
2. RECOMENDACIONES.....	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
ANEXOS.....	104



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades químicas y físicas de algunos hidrocarburos policíclicos aromáticos	31
Tabla 2: Tipo de variables	43
Tabla 3: Lista de Materiales para la elaboración de las celdas	49
Tabla 4: Diseño factorial	56
Tabla 5: Estándares para la curva de calibración	58
Tabla 6: Evaluación de la proporción de pasivos ambientales hidrocarburos por región en el Perú	61
Tabla 7: Análisis de HTP– Muestra proveniente del área de estudio comparados con los ECAS del suelo para HC.	68
Tabla 8: Análisis de varianza para el porcentaje de remoción-suma de cuadrados tipo III	71
Tabla 9: Resultados de medición de la absorbancia para las concentraciones estándar.	78
Tabla 10: Resultados de medición de la absorbancia y concentraciones finales	79
Tabla 11: Diseño factorial aplicado.....	80
Tabla 12: Situación de las muestras de suelo antes y después del tratamiento de electroremediación.....	81
Tabla 13: Balance de materia	82
Tabla 14: Balance de energía	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de causa – efecto de la contaminación del suelo por hidrocarburos	50
Figura 2: Materiales para la elaboración del prototipo	50
Figura 3: Soluciones para la elaboración de las muestras.....	52
Figura 4: Preparación de electrolitos	53
Figura 5: Armado de las celdas y su funcionamiento	55
Figura 6: Ubicación espacial de la zona de estudio	63
Figura 7: Mapa de delimitación del punto de muestreo en un área de 250 metros.....	65
Figura 8: Extracción del suelo para poder proceder a la toma de muestra	66
Figura 9: Muestreo del suelo del pasivo ambiental de hidrocarburos seleccionado.....	67
Figura 10: Panorama de la zona de muestreo	67
Figura 11: Diagrama de Pareto Estandarizado para el Porcentaje de Remoción.....	70
Figura 12: Gráfica de interacciones para el Porcentaje de Remoción	73
Figura 13: Gráfica de Probabilidad de Residuos	74
Figura 14: Gráfica de Efectos Principales para el Porcentaje de Remoción.....	75
Figura 15: Superficie de respuesta.....	76
Figura 16: Curva de Calibracion.....	77

INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos por hidrocarburos representa uno de los desafíos ambientales más apremiantes de nuestra era, cuyas repercusiones trascienden las fronteras geográficas para impactar negativamente la calidad del suelo, la estabilidad de la biodiversidad y, de forma directa, la salud pública a nivel mundial. La génesis de esta problemática es diversa, abarcando desde actividades industriales y un manejo deficiente en el almacenamiento de combustibles hasta vertidos accidentales de petróleo. Un factor agravante, como señalan Martínez Prado et al. (2011), es la excepcional persistencia de estos compuestos en el medio ambiente, una característica atribuible a su limitada biodegradabilidad que les permite permanecer en la matriz del suelo durante periodos extensos (Martínez-Prado, Perez-Lopez, Pinto-Espinoza, Gurrola-Nevarez, & Osorio-Rodriguez, 2011).

En este contexto, la remediación de los sitios afectados se convierte en una acción indispensable. El objetivo de estas intervenciones va más allá de la simple restauración de la funcionalidad ecológica del suelo; busca, además, neutralizar los riesgos multifacéticos — ambientales, sociales y económicos— asociados a esta forma de contaminación. Para abordar esta tarea con la máxima precisión, el diseño factorial se erige como una herramienta estadística de incalculable valor, pues permite a los investigadores analizar no solo los efectos aislados de diversas variables, sino también las sinergias e interacciones que se producen entre ellas durante un experimento.

Aplicado a la electroremediación, este enfoque metodológico es crucial para descifrar la influencia de factores determinantes como la concentración de surfactantes, la composición del electrolito o el voltaje aplicado. El diseño factorial no se limita a optimizar cada parámetro de forma independiente; su mayor fortaleza reside en proporcionar una comprensión holística de cómo estos factores colaboran para potenciar la eficacia del tratamiento. Por ello, esta

metodología es fundamental para el desarrollo de estrategias de remediación avanzadas y sostenibles, que mejoren el rendimiento de agentes clave como la saponina y los electrolitos empleados.

Entre los aditivos seleccionados para este estudio, la saponina destaca como un surfactante natural de origen vegetal, elegido por sus singulares propiedades fisicoquímicas. Su reconocida capacidad para disminuir la tensión superficial del agua facilita la solubilización de compuestos hidrofóbicos, como es el caso de los hidrocarburos Stoyanov (2019), subraya que la preferencia por la saponina en aplicaciones ambientales se debe a su carácter biodegradable y su reducido impacto ecológico, lo que la posiciona como una alternativa superior a los surfactantes sintéticos convencionales (Stoyanov, 2019).

Paralelamente, el éxito de la electrorremediación está intrínsecamente ligado a la selección del electrolito y a la intensidad del campo eléctrico. El uso de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y de cloruro de sodio (NaCl) ofrece ventajas complementarias. Por un lado, De la Rosa-Pérez et al. (2007) resaltan el EDTA como un eficaz agente quelante que, al formar complejos estables, mejora la movilidad de los contaminantes. Por otro lado, el NaCl constituye una solución práctica para aumentar la conductividad eléctrica del medio, lo que intensifica los procesos electrocinéticos. La presencia de un electrolito adecuado es, por tanto, indispensable para facilitar la migración de los hidrocarburos, encapsulados en micelas por la acción del surfactante, hacia los electrodos, donde pueden ser finalmente extraídos o degradados (De La Rosa - Pérez , Teutli Leon , & Ramirez Islas, 2007).



CAPÍTULO I

CAPÍTULO I MARCO METODOLÓGICO

1. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

La mayoría de las actividades antrópicas dependen del petróleo ya que es una fuente energía parte de las principales (Tanase , Ionescu, Chiciudean, Vassu, & Stoica, 2013), lo que provoca que se den ampliaciones en las fronteras petroleras de manera desmesurada por la creciente demanda mundial de petróleo; con el afán de cubrir las necesidades, principalmente energéticas, de una población y economía en constante crecimiento (Hoang, et al., 2021). Su desmesurado uso industrial puede producir desastres ambientales (Tanase , Ionescu, Chiciudean, Vassu, & Stoica, 2013), los cuales son mayormente provocados por sucesos accidentales como lo son el derrame o vertimiento de hidrocarburos.

La contaminación por hidrocarburos es un problema ambiental global. El cual, está afectando tanto el medio marino como terrestre. Causa graves estragos en el ecosistema terrestre (Huang, Ye, Jiang, Wang, & Li, 2021), siendo uno de los impactos más importantes, la afectación a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Rodríguez Uribe, Peña Cabriales, Rivera Cruz, & Délano Frier, 2021), tales como la textura, estructura, humedad, permeabilidad (Barbosa Mireles, 2016) pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), carbono orgánico (CO), estabilidad de agregados, retención de agua y afectación a los organismos del suelo, ya que causa una reducción en general de sus capacidades y usos potenciales (Castellanos, Isaza, & Torress, 2015), por lo que es de suma importancia atender estas emergencias con rapidez y métodos eficaces.

Según la última actualización en el Inventario de Pasivos Ambientales del Subsector Hidrocarburos, se han registrado 3256 Pasivos Ambientales (MINEM, 2023). La OEFA define a estos pasivos ambientales como instalaciones o pozos mal abandonados, suelos contaminados por efluentes o derrames, restos de residuos y, en general, todo aquello que haya sido generado por un operador de hidrocarburos que ha cesado sus actividades. Para ser considerado un pasivo se requiere que genere daño o riesgo de daño a la salud de las personas o al ambiente (OEFA, 2020). El pasivo por estudiar forma parte de un conjunto de 10 pasivos identificados en el departamento de Puno en el año 2015. Estos pasivos están divididos en 7 e impactan negativamente en la región hidrográfica del Titicaca específicamente en la Intercuenca Ramis, en la cuenca Coata y en el Lago Titicaca. El pasivo seleccionado afecta la cuenca Coata y se ubica en la provincia de **Huancané**, distrito de **Pusi**. Presentando niveles de riesgo altos en salud y calidad ambiental; y riesgo medio en la seguridad de la población (MINEM, 2023). La electrorremediación es una técnica en desarrollo que utiliza la conductividad del suelo para separar y extraer contaminantes por medio de un campo eléctrico que removerá especies cargadas. Esto entre un cátodo y ánodo saturando la matriz con una solución que actúe como medio iónico como agua o algún otro líquido con una sal. Esta tecnología se puede utilizar para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos de fracción pesada por medio de la adición de compuestos tensoactivos, para la formación de micelas que faciliten el transporte del contaminante (De La Rosa Pérez , Teeçutli Leon , & Ramirez Islas , 2007).

1.2. Justificación

1.2.1. Justificación ambiental

Los hidrocarburos son considerados contaminantes orgánicos persistentes en el medio terrestre por lo que es necesario optar por tecnologías para la recuperación y restauración del suelo contaminado, ya que representa un peligro potencial para la salud

humana y del ecosistema. El pasivo ambiental que es objeto de esta investigación se encuentra rodeado por áreas de cultivo, lo cual pone en riesgo a los organismos que habitan este ecosistema.

A largo plazo, uno de los efectos que podría tener este tratamiento es que puede remediar la zona históricamente contaminada, lo cual va a restaurar la calidad del suelo y la calidad del propio ecosistema.

1.2.2. Justificación económica

En cuanto al factor económico, en la aplicación de la electrorremediación como método de tratamiento de suelos, podemos afirmar que si bien los costos de inversión son altos (aplicación en campo) la eficiencia del tratamiento convierte a esta tecnología en una opción viable debido a los altos niveles de remoción de contaminantes en periodos cortos. Por tanto, la principal ventaja de esta radica en la alta eficiencia del método en tiempos reducidos, disminuyendo así costos operativos. En adición a ello los equipos utilizados en el proceso pueden volver a ser utilizados en otras intervenciones. También se reducen costos debido a que este es un método in situ así eliminando costos en excavación, transporte y/o disposición de suelos.

Por tanto, a largo plazo, existirá una amortización de la inversión inicial, disminuyendo el costo del tratamiento, una reducción de riesgos legales y ambientales como sanciones. Y aplicaciones futuras en otros proyectos, diluyendo la inversión inicial.

1.2.3. Justificación social

Los hidrocarburos son contaminantes persistentes que afectan a los servicios ecosistémicos en las áreas donde se ha contaminado, por lo que es importante aplicar tecnologías de remoción y remediación en estos lugares con el fin de no comprometer

la calidad de vida de las poblaciones aledañas ni de las futuras generaciones. Una de las principales actividades económicas de la zona es la agricultura, por tanto, es imprescindible que se recupere esta área de la contaminación causada por la mala disposición de los hidrocarburos, con el fin de que la población pueda aprovechar del recurso suelo.

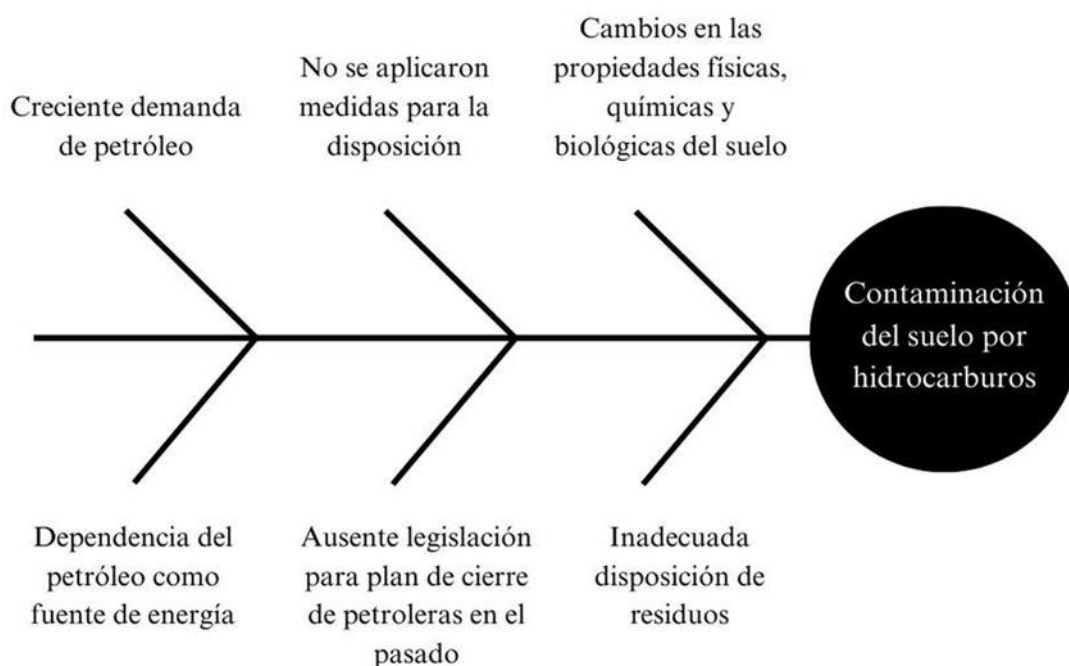
Con el tiempo, la aplicación de este tratamiento para el factor social sería beneficioso ya que la recuperación del suelo les permitiría implementar una agricultura saludable lo cual beneficiaría a los consumidores finales.

1.2.4. Justificación tecnológica

La electroremediación es una tecnología recientemente considerada en la remediación de suelos contaminados, generalmente por metales o hidrocarburos. Este reciente interés se debe a que con los años los avances tecnológicos han permitido que este tipo de tratamientos pueda aplicarse a bajos costos y en períodos cortos. La aplicación de este tipo de nueva tecnología en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos promueve el incremento de la eficiencia en la remoción en periodos cortos.

Figura 1

Diagrama de causa – efecto de la contaminación del suelo por hidrocarburos.



Nota. El diagrama representa las causas y los consecuentes efectos de la contaminación de los suelos por hidrocarburos. Adaptado del *Diagrama de causa efecto* por Kaoru Ishikawa (1940).

1.3. Formulación de objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de electroremediación para suelos provenientes de un pasivo ambiental contaminado por hidrocarburos.

1.3.2. Objetivos específicos

-) Evaluar la calidad del suelo del pasivo ambiental elegido, mediante el protocolo de toma de muestra de suelos contaminados establecido por la guía del MINAM.
-) Determinar las condiciones óptimas de funcionamiento de la celda de electroremediación.

-) Aplicar un diseño experimental para optimizar los procesos de electroremediación en la depuración de hidrocarburos en suelos contaminados.
-) Evaluar la eficiencia del tratamiento de electroremediación en la remoción de los hidrocarburos en las muestras obtenidas del pasivo ambiental.

2. HIPÓTESIS

Dado el severo deterioro de las propiedades fisicoquímicas y el riesgo socioambiental que representa la contaminación por hidrocarburos en el pasivo ambiental de Huancané, Puno, se postula que el diseño y la implementación de un sistema de electroremediación configurado a escala de laboratorio permitirán una remoción significativa de dichos contaminantes. Se anticipa que, mediante la aplicación de un campo eléctrico controlado entre un par de electrodos (ánodo y cátodo), se inducirán reacciones de óxido-reducción y fenómenos electrocinéticos que facilitarán la movilización y degradación de los hidrocarburos. Por consiguiente, se espera que este tratamiento electroquímico no solo disminuya la concentración del contaminante a niveles seguros, sino que también represente el primer paso hacia la restauración de la calidad del suelo y la mitigación de los riesgos para la salud y el ecosistema local.



CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO

3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En el ámbito internacional la electroremediación ha sido estudiada en diversas investigaciones tanto para remediación de aguas y suelos. Esta técnica ha sido mayormente aplicada para la remoción de metales pesados y en menor medida en la remoción de hidrocarburos. Pero se ha demostrado porcentajes de remoción y eficacia notables para considerarla como un método de remediación efectivo. Las siguientes investigaciones exponen antecedentes de importancia para el presente trabajo de investigación.

En la investigación realizada en Colombia por Barbosa, en el 2020, se determinó la concentración de fenantreno en el suelo, tomando una muestra de suelo, la cual fue tamizada para remover material vegetal, y posteriormente contaminarla de manera artificial y poder hacer un análisis cromatográfico de gases con espectrometría de masas (Barbosa Bojacá , 2020).

Se realizó un tratamiento haciendo uso de una celda electroquímica, con una solución de lavado de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cual determinó los resultados, ya que genera que el pH y la conductividad se alteren. Se aplicaron diversos voltajes durante 3 días para poder establecer cuál tenía la mayor efectividad en la remoción del contaminante, siendo el valor de 25 V el que tuvo mayor rendimiento. El pH fue la variable que permitió determinar la eficiencia, tomando en cuenta el grado de descontaminación.

En cuanto al análisis de los resultados, se evaluó la correlación entre el voltaje y la remoción, la correlación entre el tiempo a un voltaje constante y remoción, y la eficiencia. La remoción fue del 98.8% del contaminante en 10 días. Dándose una remoción total del 97% del contaminante en 5 días, y del 99% en el día 15. Sin haberse aplicado ninguna solución

tensoactiva que pueden ser costosas. Además, no se hizo uso de soluciones tampón, a causa de que se demostró que mientras el valor de pH es menor, es más efectiva la remoción, esto a causa de la naturaleza de la muestra.

López, 2020, tuvo por objetivo estudiar el proceso electro osmótico que se da en la migración de los contaminantes. Contaminantes como los hidrocarburos, siendo estos una opción biotecnológica en suelos finos considerando su desplazamiento. Se construyó un sistema constituido por una celda electroquímica de corriente continua, con dos electrodos conectados por un conductor para que la corriente pudiera circular. La celda electroquímica utilizó una muestra contaminada con hidrocarburos y el sustrato elegido en este caso suelo fino. Y fue tratada con parámetros controlados como el tiempo de tratamiento (24 horas), el grado de contaminación, los electrodos de acero inoxidable, 2 surfactantes y 2 electrolitos, etc. Se caracterizó el contaminante y el sustrato antes y después del tratamiento. Para la caracterización se aplicó la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier para determinar el grupo funcional, también se realizó un análisis de dispersión dinámica de luz para determinar el tamaño de las partículas, finalmente realizaron una microscopía estereoscópica y microscopía electrónica de barrido para la visualización de las características morfológicas. El mejor resultado de desplazamiento de contaminante según los datos obtenidos en el estudio de electroósmosis fue al combinar el sulfato de sodio a 0.01 M y el do decil benceno sulfonato de sodio, donde 5% del contaminante fue al ánodo, cuantificando 102.12 mg/L de concentración (Lopez Dinorin, 2020).

El objetivo del estudio de Timaná, 2020, realizado en Colombia, fue el de evaluar la factibilidad de la electrorremediación en cuanto a su ampliación en los suelos que se encuentran contaminados por hidrocarburos. Para el proceso de electrorremediación, se estableció un sistema de control, una serie de electrodos y un sistema de distribución y energía, un equipo de

proceso automático para el monitoreo y tubería de proceso para que las enmiendas químicas fueran distribuidas a los pozos de electrodos, como también para la extracción del contaminante en los pozos. Se estableció una distancia de 14 pies entre los ánodos y cátodos. Mientras que la distancia entre los pozos de ánodos y cátodos fue de 6.5 pies. El electrodo de cátodo estaba construido con tiras de malla de acero inoxidable de 2 pulgadas de ancho aproximadamente. El electrodo del ánodo fue de titanio en forma de varilla, recubierta con óxido de iridio. El sistema de recuperación electrocinética se diseñó para que los contaminantes metálicos fueran extraídos a través de electro migración de los iones contaminantes y su concentración en los pozos de los electrodos. Posteriormente, mediante un procesamiento (bombeo periódico del fluido a un tanque de efluentes de doble pared de 1000 galones) se extrajeron los contaminantes metálicos y a los pozos se devolvió el fluido electrolítico con el que fueron procesados, para su continuo uso. El líquido electrolítico contaminado recogido en el tanque de efluentes se procesó mediante una unidad de reversión de electrodiálisis (EDR). Los lodos residuales resultantes de este proceso se almacenaron para analizarlos, clasificarlos y eliminarlos o de lo contrario, eliminarlos. El electrolito se preparó con ácido acético (CH_3COOH) y ácido fosfórico (H_3PO_4) y agua destilada que tiene la función de amortiguar la reacción del ácido. Para los resultados se tomaron en cuenta los que se obtuvieron en años previos, los cuales se generaron en laboratorios e in situ, estos resultados evidenciaron altos porcentajes de recuperación del suelo, lo que determinó los parámetros, como la remediación del suelo obtenida por la afectación del área por compuestos presentes en el hidrocarburo y el factor alcanzable al realizar la limpieza a través de la electrorremediación (Timaná Insuasty, 2020).

Bazán et al., en el 2020 buscaron la remediación de suelos agrícolas contaminados con plomo, provenientes a la zona Roma Baja, distrito de Carabayllo, Lima, que presentaban 99.7 mg/kg. La experimentación fue realizada en 3 etapas por medio de 27 unidades experimentales. Cada grupo consistió en 9 unidades experimentales sometidas a dos variables controladas: el

tiempo y la intensidad de corriente eléctrica. En los grupos experimentales se aplicó la intensidad de corriente por 10, 20 y 30 minutos en cada grupo respectivamente. En tres diferentes voltajes (10V, 20V y 30V) con distintos amperajes que variaron dependiendo del tiempo. Los resultados en los tres grupos experimentales fueron del 55% al 55,99% de remoción con respecto al ECA. Siendo la más alta en un voltaje de 30V en 30 minutos (Bazán Baez, Cristobal Arzapalo, Jave Nakayo, & Benites Alfaro, 2020).

En esta investigación que se hizo en el año 2020 Martínez, estudio algo similar a Lopez Dinorin, pero utilizando suelos gruesos, específicamente la migración de HC en este tipo de suelos. Al principio realizo una caracterización del suelo proveniente del área de estudio en Tamaulipas México. Así mismo como la caracterización del hidrocarburo utilizado para la preparación del sustrato. La preparación del sustrato se realizó en 1,3 y 5% de contaminación con HC. Estudio la migración en una celda de acrílico (espesor 1.27 cm, 20 de largo x 9 cm de alto y x10 cm de ancho). Con electrodos de lámina perforada de acero al carbón calibre 18 con un voltaje fijo de 20 V por un tiempo de aplicación de 5 horas. Para romper la tensión superficial se utilizaron dos surfactantes distintos: Dodecibencensulfonato de sodio y el Dodecilsulfato de sodio. Y como electrolitos sulfatos de sodio (Na_2SO_4) y de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Los contaminantes migran al cátodo y ánodo respectivamente y la concentración del contaminante se redujo del 5% al 1% y 3%. Se concluye que el uso de surfactantes y electrolitos mejoran la eficacia del proceso. Los electrolitos elevaron la conductividad del medio ya que estos liberaron cargas eléctricas que facilitan el paso de la corriente. Los surfactantes, contribuyeron al desplazamiento de los contaminantes debido a que reducen la tensión interfacial. Sin embargo, este efecto no tiene una relación directa con la movilidad de compuestos de mayor peso molecular, dado que el sistema alcaó un punto de saturación. (Martínez Barrios, 2020).

Mohanakrishna, Al-Raoush, & Abu-Reesh, en 2020 evaluaron el acetato y las aguas residuales como bioelectro estimulantes para facilitar la bioelectroremediación de hidrocarburos en un sistema bioelectroquímico híbrido. Las aguas residuales mostraron un efecto superior al mejorar la degradación in situ de los hidrocarburos en un porcentaje de 71,8% respecto al acetato y a la muestra de control (67.4% y 64.5%). Los dos estimulantes mejoran la densidad de la potencia y la eliminación de sustratos y sulfatos (Mohanakrishna, Al-Raoush, & Abu-Reesh, 2020).

En el 2020 se realizó una revisión de las diferentes técnicas en la remediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos de petróleo. Analizando también la electrorremediación concluyeron que los métodos utilizados dependen de cada caso específico ya que las condiciones varían. El tratamiento tendrá que enfocarse en un procedimiento de gestión basado en riesgos que apunte a ser práctico, adaptable, sostenible, no invasivo, ecológico y rentable (Chukwunonso Ossai, Ahmed, Hassan, & Fauziah Shahul, 2020).

Flores, Ávila y Aguilera, en el 2020 implementaron un prototipo de celda de electrorremediación en un suelo contaminado con hidrocarburos utilizando hidróxido de sodio y sulfato de disodio como electrolitos en un periodo de 5 días en un suelo contaminado con 20 000 mg/Kg cambiando la intensidad de corriente y obteniendo los mejores resultados en una intensidad de corriente de 550 mA con la solución de sulfato de disodio en una concentración de 0.2 donde se obtuvo una remoción del 46.7%.

El estudio realizado en México por (Gómez Flores , Gutiérrez Rojas, Gómez, & González Ignacio, 2021), propuso una técnica de extracción realizada de manera secuencial utilizando solventes, lo que permitió la extracción de hidrocarburos según su interacción con los componentes del suelo. Este esquema permite que se obtengan cinco fracciones con individual significado ambiental: la fracción pseudosoluble (accesible fácilmente), la fracción

soluble (biodisponible directamente), la fracción desorbible (poco bioaccesible y poco biodisponible), la fracción secuestrada (no bioaccesible y no biodisponible y no cuantificable) y la fracción extraíble (no bioaccesible y no biodisponible, pero cuantificable). Por lo que el objetivo del estudio fue el de cuantificar la interacción entre los hidrocarburos y los constituyentes del suelo mediante la extracción secuencial con solventes con base en el esquema anteriormente mencionado, el cual fue probado con la modificación de las interacciones hidrocarburos-suelo con el uso de un campo eléctrico, lo cual incrementó de manera significativa la concentración soluble de los contaminantes. Por lo tanto, el campo eléctrico modificó el destino ambiental de los mencionados contaminantes. Se hizo uso de un suelo natural después de hacer el muestreo, posteriormente se realizó la caracterización fisicoquímica. También se realizó la extracción y cuantificación de los hidrocarburos mediante la extracción secuencial con solventes (SSE), en el que 1 g de muestra del suelo contaminado y esterilizado es sometido a cuatro etapas de extracción. La celda electroquímica estaba compuesta de un tubo de acrílico dividido en 3 compartimentos (catódico, central y anódico), con electrodos de titanio, recubiertos con óxido de rodio, además de barras de grafito puro. Se aplicó una densidad de corriente desde 0 a 2.5 mA cm² a una tasa de 0.04 mA cm²/min. Se registró la temperatura, el pH y el potencial de celda. Los experimentos de campo eléctrico duraron 72 horas, y evolucionó durante las primeras 15 horas, posteriormente se mantuvo constante. La contribución principal del estudio es que logró una extracción selectiva de los hidrocarburos en el suelo (Gómez Flores , Gutiérrez Rojas, Gómez, & González Ignacio, 2021).

Mientras que, en el 2021, Martínez et al., estudiaron la relación entre la eficiencia de eliminación y la aplicación de los potenciales, ellos evaluaron el tratamiento de electrorremediación de suelos que se encontraban contaminados por nitratos, fosfatos y arseniatos, los cuales provienen de la utilización desmedida de abonos y pesticidas. Estos contaminantes fueron evaluados individualmente con tres diferencias de potencial. Este tipo de

investigaciones es importante debido a que es necesario desarrollar técnicas que sean eficientes en la remediación de suelos contaminados. Ya que la remediación puede realizarse de manera in situ, existe una mínima movilización de suelos, disminuyendo los costos de descontaminación. El consumo total de energía consumida es directamente proporcional al tiempo que se requiere para que se alcance el nivel de la migración en la limpieza deseada. La remediación en sistemas mono-dimensionales puede alcanzar valores cercanos al 100% de remoción, mientras que en las muestras de campos no alcanza valores superiores al 30% (Martínez Sepulveda, et al., 2019).

Mientras que Arul, et. al (2021), evaluaron en su estudio la viabilidad de acoplar la biorremediación y la remediación electrocinética (bioelectrocinética) in situ de hidrocarburos de petróleo crudo. Como también determinaron que al aplicar biosurfactante bacteriano se puede incrementar la eficiencia de la remediación debido a que se incrementa la solubilidad de los materiales orgánicos. Los investigadores aislaron e identificaron bacterias marinas potenciales productoras de biosurfactantes analizando su ADN. Finalmente lograron una eficiencia de biodegradación de petróleo crudo de un 88% para la cepa AS2, un 92% para la cepa AS3, y un 97% para la cepa AS4, siendo 37°C la temperatura óptima y pH 7. Por otro lado, se demostró que, el uso del biosurfactante bacteriano en la remediación electrocinética mejora la tasa de biodegradación de petróleo crudo en suelos contaminados en aproximadamente 92% que la remediación electrocinética en 2 días de operación. El biosurfactante bacteriano mejora la solubilización de los hidrocarburos y acelera la electromigración de los hidrocarburos al sector anódico, lo cual confirmaron con la presencia de contenido orgánico total, mayor que la remediación electrocinética (Arul, et al., 2021).

En 2021 Saini, et al; analizaron la remediación de un suelo contaminado por hidrocarburos de petróleo mediante un tratamiento electrocinético. Estudiaron también los

efectos de aplicar una corriente constante sobre el contenido de humedad, el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica y la concentración de tres fracciones de hidrocarburos de petróleo. En este estudio se investigó la remediación de hidrocarburos de petróleo a 24 cm de profundidad, la cual es más significativa que la mayoría de los estudios de remediación electrocinética en suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo. Lograron determinar que se produce una mayor remediación cerca a los cátodos en comparación con los ánodos, como también que las mayores reducciones en las concentraciones de hidrocarburos de petróleo fueron registradas cerca de los electrodos, en la parte media y más baja de la configuración experimental. Los resultados demostraron que hubo una reducción del 37% en la concentración de compuestos de cadena C10-C16, en un periodo de 7 días de remediación electrocinética, siendo significativo estadísticamente en todas las capas (Saini, Negan Bekele, Chadalavada, Fang, & Naidu, 2021).

Wen et al., en el 2023 proponen y ponen a prueba una nueva estrategia que mejora la entrega de persulfato al suelo a través de la electrocinética, para después aplicar un campo eléctrico de corriente continua pulsada, se activa el persulfato térmicamente in situ y se promueve de manera sincrónica la columna de persulfato, lo cual genera la reacción de los radicales libres de contaminantes y se continúa con la reposición de persulfato al suelo, lográndose así una eficiente degradación en zonas de baja permeabilidad. Como resultado se obtuvo que la tasa de transporte de persulfato en el suelo analizado mediante la electrocinética fue 12.3 veces mayor que la difusión aproximadamente. Mientras que la electroósmosis y la electromigración promovieron el transporte de persulfato y la mezcla de radicales libres y persulfato, la cual es reactiva, con suelos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos, además de que se incrementa su degradación. Finalmente se observó una significativa disminución, aproximadamente 60%, en la concentración promedio de los hidrocarburos aromáticos policíclicos durante 10 días en la célula del suelo, lo cual demostraría

que esta estrategia sería potencial en la remediación de suelos de baja permeabilidad contaminados (Wen, Liu, Zhang, & Fu, 2023).

Taherian et al. en el 2024, buscaron determinar la efectividad que tiene el método electrocinético en la eliminación de suelos contaminados con diésel, a la vez que se adiciona el surfactante Triton x100 y el Tween 80. La configuración a escala de laboratorio consistió en una celda rectangular dividida en tres secciones. La sección principal incluía el suelo contaminado. En las otras dos secciones se colocaron dos electrodos de grafito, las secciones fueron separadas por cinco capas de almohadillas filtrantes sobre placas de malla de plástico para que la muestra no pueda ingresar desde la sección central. Como resultados obtuvieron que, durante la remediación del diésel, la electrólisis del agua y la producción de iones de hidrógeno en el anolito incrementaron de manera gradual la concentración de iones de hidrógeno. La investigación concluye en que la aplicación de surfactantes incrementa la cantidad de contaminantes que ingresan a la corriente de electroósmosis y a la solución electrolítica al reducirse la fuerza de tracción superficial. Al ser controlado en los electrolitos el pH se incrementa la eficiencia en la limpieza de diésel del suelo, en un 4% en ausencia de surfactantes que se encuentran relacionados con la prevención de deposición de contaminantes y la formación de capas densas cercanas al cátodo. En presencia de los surfactantes Triton x100 y el Tween 80, la eficiencia de remoción de diésel es de 18 y 39%, respectivamente. La presencia del Tween 80 y su eficiencia se relaciona con la menor concentración crítica de micelas y de un equilibrio hidrofílico mayor al compararse con Tritón X100 (Taherian, Yazdi, Danaei, & Zad, 2024).

Fernández Cascan et al., en el 2024 tuvieron como objetivo el evaluar cuál era la influencia de que tenía la posición relativa de los electrodos, como también el uso de los surfactantes en cuanto a la movilidad de los hidrocarburos clorados en suelos a los que se les

aplica campos eléctricos. La configuración experimental que utilizaron consistió en diversas maquetas, divididas cada una en tres partes para el eje X, y situadas en los extremos, dos de ellas simétricamente, las cuales corresponden a compartimentos electródicos, en donde el líquido de lavado se aloja, los electrodos y la parte central en la que el suelo es introducido. La muestra de suelo tomada contiene diversos compuestos orgánicos clorados. La mayor parte de los resultados experimentales estuvieron en la misma zona de las parcelas, independiente a la posición relativa de los electrodos y la muestra contaminada, por lo cual concluyen que los suelos envejecidos contribuyen a que la interacción del suelo y los contaminantes sea más fuerte. Además, determinaron que el transporte de las sales por electromigración y del agua por electroósmosis no está influido por la contaminación del suelo, ya que no lograron encontrar diferencias en los ensayos en los que la posición relativa del suelo contaminado y de los electrodos fue modificada (Fernandez Cascan , Isidro, Guadano, Saez, & A. Rodrigo, 2024).

En el 2024, Proietto, et al., llevaron a cabo una investigación centrada en la remediación electroquímica del caolín (una arcilla mineral) que fue contaminada con 5 alcanos diferentes ($C_{12}H_{26}$, $C_{13}H_{28}$, $C_{14}H_{30}$, $C_{16}H_{34}$, $C_{18}H_{38}$). Se eligieron los alcanos C12-C18 ya que representan un modelo peligroso de compuestos de hidrocarburos. Y se decidió estudiar el caolín como un modelo ideal debido a sus características favorables como su baja permeabilidad, baja capacidad de amortiguación y fácil reproducibilidad. Este estudio reveló diferentes variables que influyen en el modelo de experimentación como la intensidad del campo eléctrico y la presencia de electrolitos. Los resultados demostraron que emplear una baja intensidad de campo eléctrico podría degradar y movilizar estos alcanos de manera simultánea. También se observó que la eficiencia de la remediación aumentó al bajar el largo de las cadenas de los alcanos. La mayor remoción de los alcanos ocurrió utilizando un campo eléctrico de 0.5 V/cm que resultó en un porcentaje total de remoción del 70% después de un tiempo de aplicación de 96 horas. También se concluyó que el uso del electrolito cloruro de

sodio influyó significativamente en la eficacia de la remoción ya que con el uso de este se aumentó la remoción del 61% al 83% (Proietto, Meli, Prestigiaco, Galia, & Scialdone, 2024).

En el ámbito nacional la electroremediación se ha investigado ampliamente para la remoción de metales pesados y también se encuentran algunos antecedentes que estudiaron la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

En agosto del 2019 el MINEM publicó un Plan de rehabilitación para sitios impactados por las actividades de hidrocarburos por medio del Fondo nacional del ambiente (FONAM) realizado por el Consorcio ECODES de ingeniería. Titulado “Servicio de Consultoría para la elaboración de los Planes de Rehabilitación de 12 sitios impactados por las actividades de hidrocarburos en la cuenca del río Tigre” que se realizó en el distrito de Loreto. En este Plan se evaluaron distintas técnicas de remediación para abordar la problemática entre estas la electroremediación (electrocinética + bioestimulación) esta técnica híbrida consintiendo en la aplicación de corriente eléctrica directa en el suelo contaminado. Para así obtener dos reacciones la migración de contaminantes ya que debido a la corriente eléctrica los contaminantes se trasladan hacia los electrodos que posteriormente será inmovilizados y retirados del suelo; y el aumento de la biodisponibilidad de nutrientes facilitando la biodegradación de contaminantes ya que los microorganismos aprovechan los nutrientes (MINEM, 2019).

En agosto del 2019 el MINEM publicó un Plan de rehabilitación para sitios impactados por las actividades de hidrocarburos por medio del Fondo nacional del ambiente (FONAM) realizado por el Consorcio ECODES de ingeniería. Titulado “Servicio de Consultoría para la elaboración de los Planes de Rehabilitación de 12 sitios impactados por las actividades de hidrocarburos en la cuenca del río Tigre” que se realizó en el distrito de Loreto. En este Plan

se evaluaron distintas técnicas de remediación para abordar la problemática entre estas la electrorremediación (electrocinética + bioestimulación) esta técnica híbrida consintiendo en la aplicación de corriente eléctrica directa en el suelo contaminado. Para así obtener dos reacciones la migración de contaminantes ya que debido a la corriente eléctrica los contaminantes se trasladan hacia los electrodos que posteriormente será inmovilizados y retirados del suelo; y el aumento de la biodisponibilidad de nutrientes facilitando la biodegradación de contaminantes ya que los microorganismos aprovechan los nutrientes (MINEM, 2019). Acorde a las condiciones del suelo presentados en los sitios se eligieron 8 alternativas de remediación a evaluar, donde se consideró el tiempo, la efectividad y el costo: (MINEM, 2019).

1. Electrobiorremediación (Electrocinética + Bioestimulación)
2. Tratamiento biológico en fase líquida – bioslurry.
3. Landfarming.
4. Bioceldas o biopilas.
5. Bioestimulación Enzimática.
6. Fitorremediación con Hidrocarburos.
7. Bioaumentación.
8. Desorción térmica + Bioestimulación Enzimática.

La electrorremediación quedó entre las 3 finalistas. A pesar de no haber sido elegida debido especialmente por el costo presentó un índice de efectividad alto y sentó un precedente para ampliar el estudio del electro remediación en el Perú más allá de la remediación de metales pesados sino también contaminantes orgánicos y metales provenientes de la contaminación por hidrocarburos (MINEM, 2019).

El objetivo de la investigación de Lara, 2022, fue determinar el proceso de remediación electrocinética aplicando agentes tensoactivos funcionalizados en suelos contaminados con hidrocarburos totales de petróleo. La metodología que fue usada inició con la síntesis de los agentes tensoactivos (AT), después se hizo caracterizaron químicamente los agentes tensoactivos mediante espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN) con la que se determinó la estructura química y la interacción entre los compuestos sintetizados, y espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) que tiene la función de corroborar la correspondencia de las señales de los compuestos, en esta investigación los cationes y aniones presentaban la misma naturaleza, y la diferencia se encuentra en el tamaño de la cadena carbonada; a continuación se determinó la concentración micelar crítica (CMC) de los agentes tensoactivos mediante espectroscopia ultravioleta visible, conductimetría, voltamperometría cíclica y tensiometría, con lo que se hizo la relación entre el efecto de la concentración y el cambio de la absorbancia, la conductividad y la tensión interfacial del sistema surfactante- agua y se estudió la difusión (RDE). Por otro lado, se caracterizó fisicoquímicamente al hidrocarburo y de los sustratos de estudio, y finalmente se realizó la remediación electrocinética de los suelos contaminados. Se determinó en la cuantificación de los componentes que el hidrocarburo se transportó a la sección anódica debido al agente tensoactivo, como también hubo una interacción entre el anión p-toluensulfonato y las especies contaminantes, facilitando la formación y agrupación de micelas. mientras que el catión (imidazol/piridina) favoreció su desplazamiento hacia la región anódica (Lara Hernandez, 2022).

Otra investigación realizada en el mismo año por Ortiz Jahn planteó el uso de la electrorremediación y fitorremediación para el tratamiento de suelos contaminados con Arsénico (metaloide), Cadmio y Plomo debido a las actividades mineras en la Planta Metalúrgica de Yauris de la UNCP. La experimentación se realizó por medio de una celda de

tres compartimentos, estos separados por una membrana permeable. Se utilizó como electrolito el ácido clorhídrico y como electrodos el grafito y el acero inoxidable. Las variables independientes fueron los voltajes específicos entre 15 y 30 V, y la distancia entre los electrodos que fue entre 15 y 25 cm. El tiempo del tratamiento fue entre 10 y 20 horas. Se optimizaron las variables de voltaje y tiempo, obteniendo como valores máximos de remoción: Pb (16%), Cd (31%) y As (36%). En los siguientes valores óptimos respectivamente: Pb (23.16 V, 13.71 horas), Cd (21.11 V, 14.22 horas) y As (20.62 V, 12.62 horas) (Ortiz Jahn, 2023).

En el año 2022 Hidalgo Ortiz realizó una investigación utilizando el método de electroremediación para la remoción de Cd en lodos provenientes de la PTAR – Molino en la Provincia de Pachiyeta, Huanuco. Realizando 5 repeticiones en tres voltajes (15V, 20V, 25V) distintos en tres periodos de tiempo (4,8 y 12 horas) utilizando como solución electrolítica el Cloruro de Sodio 12%. El tiempo de tratamiento y voltaje óptimo fueron 15V y 8 horas y la remoción máxima fue de 84.48% con el voltaje de 25V en 12 horas (Hidalgo Ortiz, 2022).

Casazola, Purca y Valle, en el 2023 evaluaron la eficiencia de la electroremediación en Pb, Zn y Cu por medio de un sistema de electrorremediación con arreglo lineal para remoción de metales pesados en San Miguel de Viso. Los suelos agrícolas de la zona se encuentran contaminados por metales pesados debido a los pasivos mineros de la zona. Para iniciar con la experimentación primero, se caracterizó el suelo contaminado, así mismo se determinó la influencia de la solución humectante y el tiempo de tratamiento para la remoción de los metales (Cu, Pb y Zn). Se utilizaron como soluciones humectantes de suelo el ácido nítrico y sulfúrico con una concentración de 0,1 M y 0,05 M respectivamente, esto para el control del pH del comportamiento catódico. Los resultados obtenidos luego de aplicado el sistema electroquímico con arreglo lineal fueron los siguientes un 35% de remoción de Cu, un 51% de Pb y un 37% de Zn. Estos se obtuvieron después de 10 días de tratamiento, siendo este también

el tiempo óptimo de tratamiento. Así mismo no se encontraron diferencias significativas al usar ácido nítrico o fosfórico ya que las dos soluciones mantuvieron remociones similares (Casazola Casazola, Purca Segura, & Valle Alvarado, 2023).

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Suelo

Podemos definir al suelo, como un material no consolidado, cuya estructura depende de la presencia de partículas inorgánicas, materia orgánica, aire, agua y organismos, que incluye la capa superior de la superficie terrestre hasta los diversos niveles de profundidad (MINAM, 2014). Según el Ministerio de Ambiente, el suelo se constituye como un componente vital en el ambiente natural. Presenta una limitada disponibilidad y se encuentra constituido por minerales, aire, agua, materia orgánica, macro, meso y microorganismos, los cuales desarrollan procesos bióticos y abióticos, que son esenciales, cumpliendo así fundamentales funciones para el ambiente y la humanidad (FAO, 2018).

4.1.1. Importancia del Suelo

El suelo es fundamental y crucial para la ocurrencia y el buen funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos, ya que participa en el transporte, almacenamiento, distribución y transformación de la energía y materia, que son indispensables para la vida en el planeta (FAO, 2018).

4.1.2. Composición del Suelo

El suelo está constituido, en términos medios, por un 45% de minerales, 25% agua, 25% aire y 5% agua (FAO, 2018) donde dichos porcentajes varían según el tipo de material originario (roca), puesto a partir de este material es de donde se forma el suelo (Sabroso & Pastor, 2004).

4.1.3. Estructura del Suelo

Esencialmente, en un suelo podemos distinguir tres horizontes de manera visual, los cuales se encuentran en orden decreciente, cada uno con diferentes características físicas, químicas y biológicas. Los horizontes son: (Sabroso & Pastor, 2004)

-) Horizonte A (Orgánico). El cual comprende partículas materia orgánica (que le da la coloración oscura) y minerales. En este horizonte, las aguas de infiltración arrastran a los materiales finos y solubles (a lo que se le conoce como proceso de lixiviación) a los niveles inferiores, en especial las sales de hierro, aluminio y magnesio, dándose una transferencia conjunta con los compuestos orgánicos.
-) Horizonte B (Acumulación). Se produce la acumulación de los compuestos de lixiviación procedentes del horizonte A, dándose lugar la oxidación de la materia orgánica y una lixiviación moderada. Presenta coloración pardo-rojiza ya que contiene arcillas y óxidos, principalmente de hierro III.
-) Horizonte C (Transición). Se constituye como una capa fronteriza que divide a la roca, en un proceso de meteorización de la roca sin alterar.

4.2. Contaminación del suelo

Al referirnos a la contaminación del suelo, hablamos de la presencia en el suelo de una sustancia ajena del lugar y/o que se encuentra presente en una mayor concentración a lo normal, lo cual genera efectos adversos sobre cualquier organismo al que no está destinado (Rodríguez Eugenio, McLaughlim, & Pennock, 2019).

4.2.1. Contaminación por Hidrocarburos

Según (Viñas Canals, 2005), los hidrocarburos son sustancias con un alto potencial contaminante debido a su abundancia, distribución espacial y por su persistencia.

Debido a ello la producción a gran escala, el transporte, actividades de envío, producción, explotación pueden terminar en incidentes ya antes mencionados como derrames, infiltraciones y fugas (Al - Hawash, y otros, 2018).

) *Contaminación de hidrocarburos en el Mundo.* Hoang et al. mencionan que al menos 342 000 sitios en Europa Occidental están contaminados por hidrocarburos de petróleo, de forma similar, el 90% de los sitios contaminados en Estados Unidos están vinculados a contaminantes derivados del petróleo (Hoang, y otros, 2021).

) *Contaminación por hidrocarburos en Perú.* La industria de los hidrocarburos líquidos posee un gran papel en la economía nacional, donde las fugas y/o derrames petroleros se deben principalmente a las deficiencias en el mantenimiento de las maquinarias de los pozos petroleros (Jara Vilca , 2019). Existe un registro de este tipo de incidentes, teniéndose un registro de ocurrencias de derrames de petróleo desde 1978 hasta la actualidad, en donde más de 470 derrames se han suscitado entre los años 2000 y 2019 en la Amazonía Peruana (Ccolque Choque & Vargas Molina, 2017).

4.3. Pasivos ambientales sector de hidrocarburos

Tal como se detalla en la última actualización en el Inventario de Pasivos Ambientales del Subsector Hidrocarburos, se han registrado 3256 Pasivos Ambientales (MINEM, 2023). La OEFA define a estos pasivos ambientales como instalaciones o pozos mal abandonados, suelos contaminados ya sea por desechos, derrames o efluentes, y, en general, todo aquel material que haya sido originado por un operador de hidrocarburos que se encuentre en cese de sus actividades. Es importante considerar que para que sea reconocido como un pasivo, este debe generar daño o riesgo de daño o al ambiente o a la salud de las personas (OEFA, 2016).

Este último organismo tiene como una de sus funciones, el identificar y registrar pasivos ambientales del sector de hidrocarburos en Perú. Función que fue transferida el 19 de febrero del 2013 por el OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería) por medio de la Resolución Ministerial N°042-2013-MINAM (MINAM, 2013).

4.4. Petróleo

El petróleo se constituye de una combinación de hidrocarburos, los cuales los encontramos en estado líquido, en ciertas condiciones iniciales, tanto de temperatura como de presión en el reservorio en donde se encuentre, y que normalmente en condiciones atmosféricas permanece en estado líquido (MINEM, 2002).

4.4.1. Hidrocarburos de Petróleo

Los hidrocarburos de petróleo son compuestos orgánicos que se pueden encontrar en estado líquido, sólido como también gaseoso (MINEM, 2002). Los hidrocarburos son un entrelazado sofisticados de varios componentes compuestos de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre, incluidos los alcanos (lineales, ramificados y cíclicos), alquenos, alquinos, compuestos aromáticos (con peso molecular bajo, monoaromáticos y poliaromáticos), asfaltenos, resinas, ceras y alquitranes (Rodríguez Uribe, Peña Cabriales, Rivera Cruz, & Délano Frier, 2021), por lo tanto, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos considera a los hidrocarburos como contaminantes ambientales de alta prioridad (Wu, et al., 2017).

4.4.2. Hidrocarburos Totales de Petróleo

Los TPH son la cantidad medible de varios cientos de compuestos de hidrocarburos, los cuales consisten principalmente en hidrógeno (H) y carbono (C). Los TPH están formados por compuestos de hidrocarburos de petróleo volátiles e

hidrocarburos de petróleo extraíbles, según Kamath et al. (2004) como cito Hoang et al., los hidrocarburos de petróleo volátiles son de cadena pequeña ($C_6 - C_{10}$) mientras que los hidrocarburos de petróleo extraíbles son de cadena larga ($C_{10} - C_{40}$). Pinedo et al. (2013) como cito Hoang et al. menciona que, en muchos países, la cantidad de TPH es un parámetro bruto comúnmente utilizado para cuantificar el grado de contaminación para gestionar la remediación ambiental (Hoang, y otros, 2021).

4.4.3. Composición de los Hidrocarburos de Petróleo

Los hidrocarburos de petróleo se pueden dividir en compuestos saturados de cadena lineal (alcanos), en compuestos acíclicos (cicloalcanos) y en compuestos aromáticos (contienen al menos un anillo bencénico). Los alcanos se dividen en los de cadena lineal e isoalcanos de cadena ramificada, con átomos de carbono desde 1 a 40 átomos, en algunos casos incluso se han llegado a identificar de hasta más de 60 átomos de carbono. En cuanto a los alcanos cíclicos, son compuestos en los que algunos o todos los átomos de carbono se encuentran dispuestos molecularmente construyendo anillos. La mayor parte contienen constituyentes de menor importancia y están generados por precursores específicos, tanto de animales como de plantas. Así mismo, se emplean como “marcadores moleculares” usados en estudios geoquímicos (Ávila Salazar, 2016).

4.4.4. Hidrocarburos Aromáticos

Los hidrocarburos aromáticos se encuentran con menor abundancia que los saturados, estos presentan al menos un anillo bencénico, dichos anillos están ligados íntimamente en su estructura molecular, y pueden no presentar sustitución o sustitución por grupos metilo de un átomo de hidrógeno (alquilación), dándose en mayor grado en naftalenos (hidrocarburos aromáticos de dos anillos bencénicos), antraceno y fenantreno (hidrocarburos aromáticos de tres anillos bencénicos). El grupo de hidrocarburos policíclicos aromáticos están conformados por compuestos con una

estructura molecular que se origina por el enlace de 3 o más anillos bencénicos (criseno, benzoantraceno, pireno, benzofluoreno, benzopireno, benzofluoranteno y perileno) (Botello, Redon Von Osten, Gold-Bouchot, & Agraz-Hernandez, 2005).

A continuación, podemos ver en la **Tabla 1**, algunos de los hidrocarburos policíclicos antes mencionados y sus propiedades químicas y físicas.



Tabla 1

Propiedades químicas y físicas de algunos hidrocarburos policíclicos aromáticos

PAH	N° de anillos	Solubilidad en el agua	Punto de fusión (°C) /Punto de ebullición (°C)	Log del coeficiente de partición octanol-agua (log K _{ow})
Naftaleno	2	30	80/218	3.37
Acenafteno	3	3.47	96/279	4.33
Acenaftileno	3	3.93	92/265	4.07
Antraceno	3	0.07	216/340	4.45
Fenantreno	3	1.29	101/340	4.46
Fluoreno	3	1.98	116/293	4.18
Fluoranteno	4	0.26	111/-	5.33
Benzo(a)antraceno	4	0.014	158/400	5.61
Criseno	4	0.002	255/448	5.61
Pireno	4	0.14	149/360	5.32
Benzo(a)pireno	5	0.0038	179/496	6.04
Benzo(b)fluoranteno	4	0.0012	167/-	6.57
Benzo(k)fluoranteno	4	0.00055	217/480	6.84
Dibenzo(a,h)-antraceno	4	0.0005	262/-	5.97
Benzo(ghi)perileno	6	0.00026	222/-	7.23
Indenol(1,2,3-cd)-pireno	6	0.062		7.66

Nota. Adaptada de García Martínez (2005)

4.5. Tratamientos para la remediación de suelos contaminados y sus limitaciones

4.5.1. Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología de tratamiento *in situ* que utiliza la capacidad inherente de ciertas especies vegetales para absorber, acumular o degradar contaminantes presentes en el suelo y el agua subterránea. El mecanismo de acción se basa en la fitoextracción, donde algunas plantas pueden almacenar metales pesados en sus tejidos aéreos, o en la fitodegradación, proceso mediante el cual logran metabolizar compuestos orgánicos complejos como hidrocarburos, plaguicidas y explosivos. Este último proceso puede ser potenciado por la intensa actividad microbiana que ocurre en la rizosfera, la zona de influencia directa de las raíces. Adicionalmente a su función depuradora, la cobertura vegetal cumple un rol estabilizador, ya que minimiza la erosión eólica e hídrica del suelo contaminado, lo que previene la dispersión de los contaminantes hacia áreas adyacentes. A pesar de sus ventajas, esta tecnología tiene una serie de limitaciones significativas que condicionan su aplicabilidad. La efectividad de la fitorremediación está restringida a sitios con concentraciones bajas a moderadas de contaminantes, dado que niveles elevados pueden resultar fitotóxicos e inhibir el crecimiento vegetal. La profundidad del tratamiento está delimitada por el alcance del sistema radicular de la especie seleccionada, y su rendimiento es estacional, dependiendo de las condiciones climáticas. Finalmente, existen incertidumbres sobre la toxicidad y el destino final de los metabolitos resultantes de la degradación, los cuales, en ciertos casos, podrían bioacumularse en la cadena trófica o moverse hacia otros compartimentos ambientales (Ávila Salazar, 2016).

4.5.2. Bioventeo

Este tratamiento busca la estimulación de la biodegradación natural en condiciones aerobias de los compuestos biodegradables. Se suministra aire mediante pozos de extracción en el sitio contaminado, por un movimiento forzado, ya sea de inyección o de extracción, a una velocidad de flujo baja, con el objetivo de solamente proveer el oxígeno necesario para el desarrollo de la actividad microbiana degradadora. Con este método se tratan compuestos orgánicos biodegradables no volátiles o semivolátiles, también facilita que los contaminantes adsorbidos puedan ser degradados, a través del movimiento mediante un suelo biológicamente activo. Se ha usado exitosamente en la remediación de suelos contaminados con pesticidas, solventes no clorados, entre otros químicos. Entre los factores que limitan la efectividad de este tratamiento tenemos, la dificultad para que se alcance el flujo de aire necesario, la concentración y el tipo de contaminante, el bajo contenido de humedad y la falta de nutrientes (Ávila Salazar, 2016).

4.5.3. Bioestimulación

Este método se basa en circular soluciones acuosas a través del suelo que se encuentra contaminado, estas soluciones contienen nutrientes y/o oxígeno, con el objetivo de que se estimule la actividad del microbiota autóctono, mejorando la degradación biológica de los contaminantes orgánicos o inmovilizar *in situ* a los contaminantes inorgánicos. La bioestimulación se ha utilizado exitosamente en la remediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos semivolátiles, compuestos orgánicos volátiles, gasolinas y pesticidas. Sin embargo, no es recomendable de aplicar en suelos arcillosos, demasiado heterogéneos y de alta estratificación, debido a que se genera una limitación en la transferencia de oxígeno. Entre otras de las limitaciones que presenta tenemos el incremento de movilidad de los

contaminantes, el reducido crecimiento microbiano debido al tipo de suelo y la obstrucción generada por el crecimiento microbiano en los pozos de inyección (Ávila Salazar, 2016).

4.5.4. Bioaumentación

Se agregan microorganismos vivos con capacidad de degradación de contaminantes en cuestión, con el objetivo de que se promueva la biotransformación o biodegradación. Se utiliza cuando el requerimiento de tratamiento es inmediato en un sitio contaminado como también cuando hay insuficiencia de microflora autóctona en la cantidad o en la capacidad degradadora. Este tratamiento se utiliza en suelos contaminados por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), insecticidas, herbicidas, nitrofenoles, bifenilos policlorados, clorofenoles y desechos con altas concentraciones de metales. Para llevarse a cabo, previamente, deben aislarse microorganismos con capacidad de metabolizar o hacer uso de la sustancia contaminante como una fuente de carbono hasta que se obtengan altas cantidades de biomasa y realizar cultivos de enriquecimiento (Ávila Salazar, 2016).

4.5.5. Biolabranza

La biolabranza consiste en tratar el suelo contaminado mediante arado *in situ*. Se mezclan nutrientes, agentes de volumen y el suelo contaminado, y de manera periódica se remueven para la aireación sea favorecida. Se controlan las condiciones del suelo (temperatura, pH, aireación) con el fin de que se optimice la velocidad de degradación. Debido a que su mayor problema es que ingresen los lixiviados de los contaminantes hacia el suelo, se incorporan métodos para controlar los lixiviados. Este tratamiento se utiliza en suelos que se encuentran contaminados por hidrocarburos de petróleo, gasolinas, diésel, lodos aceitosos, clorofenoles, creosota y coque. No se

recomienda el tratamiento cuando algunos contaminantes no son biodegradables o son diluidos (Ávila Salazar, 2016).

4.5.6. Composteo

Es un proceso biológico controlado, en el que se tratan sedimentos y suelos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables, con el fin de conseguir subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezcla con agentes de volumen (desechos agrícolas, estiércol, paja, aserrín) los cuales optimizan el balance de nutrientes, aseguran que se genere calor durante el proceso y una mejor aireación. Se utiliza este tratamiento para remediar suelos que estén contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), hidrocarburos de petróleo (HTPs), gasolinas y clorofenoles (PCP). También reduce la toxicidad de los explosivos y su concentración. Entre las principales limitaciones tenemos, el tipo de contaminante y su proceso, la disponibilidad de agentes de volumen, el requerimiento de espacio, el requerimiento de excavación del suelo contaminado, lo que provoca que se liberen compuestos orgánicos volátiles (COVs), la imposibilidad de tratar metales pesados y el incremento volumétrico del material (Ávila Salazar, 2016).

4.5.7. Biorreactores

Se utilizan en el tratamiento de suelos poco permeables y heterogéneos, como también cuando se requieren tiempos de tratamiento más cortos, ya que puede controlarse eficientemente, se hace empleo de procesos biológicos, físicos y químicos, los cuales aceleran y mejoran la biodegradación. El biorreactor de lodos es el más utilizado en la biorremediación. En este se mezcla un líquido con el suelo contaminado, de manera constante, y la degradación se lleva a cabo en una fase acuosa por los microorganismos que están suspendidos o inmovilizados en la fase sólida. Principalmente se utilizan para el tratamiento de hidrocarburos totales de petróleo

(HTPs), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y compuestos orgánicos semivolátiles no halogenados, bifenilos policlorados (BPCs), desechos de artillería y pesticidas. Entre los factores que limitan su eficacia tenemos que: el contaminante original es menos tóxico que los productos intermediarios, el suelo debe ser tamizado, en algunos casos los residuos requieren de un tratamiento o de disposición final y los suelos arcillosos y heterogéneos pueden generar problemas en su manipulación (Ávila Salazar, 2016).

4.5.8. Desorción Térmica

Este tratamiento consiste en calentar el suelo (entre los 90 y 540 °C) que contiene contaminantes orgánicos, con el objetivo de que se vaporicen y por consecuencia sean separados del suelo. El efecto del calor es la aceleración en la liberación y movilidad de contaminantes a través del suelo, para seguidamente dirigirlos a un sistema de tratamiento de gases usando un sistema de vacío o un gas acarreador. Cabe resaltar que no es perjudicial este tipo de separación física. El sistema de desorción térmica de alta temperatura (DTAT), son principalmente usados para tratar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), compuestos orgánicos semivolátiles (COSs), compuestos orgánicos volátiles (COVs), pesticidas, gasolinas y bifenilos policlorados (BPCs). Esta tecnología no es efectiva en suelos muy variados con permeabilidad variable, en zonas saturadas, además de que se generan emisiones gaseosas (Ávila Salazar, 2016).

4.5.9. Lavado de suelos

En este tratamiento se remueven los contaminantes que han sido sorbidos en las partículas finas, en un suelo excavado utilizando soluciones acuosas, reduciendo así la cantidad de material contaminado, debido a que las partículas finas serán separadas del suelo restante. El lavado de suelos se usa para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), pesticidas, clorofenoles (PCP) y

metales pesados. Durante el lavado, el uso de surfactantes puede disminuir la porosidad al adherirse; los fluidos reaccionan con el suelo, lo cual reduce la movilidad de los contaminantes (Ávila Salazar, 2016).

4.5.10. Remediación Electrocinética

La remediación electrocinética es una tecnología en fase de desarrollo que capitaliza las propiedades conductoras inherentes a matrices como el suelo, los lodos y los sedimentos para facilitar la descontaminación. Su principal objetivo es la separación y extracción de un amplio espectro de contaminantes, tanto de naturaleza orgánica como inorgánica. El método opera mediante la imposición de un campo eléctrico, generado por una corriente directa de baja intensidad que fluye entre un electrodo positivo (ánodo) y uno negativo (cátodo). Este campo eléctrico induce una migración direccional de las especies iónicas: las partículas con carga positiva, como los iones metálicos, el amonio y ciertos compuestos orgánicos, son transportadas hacia el cátodo, mientras que las especies con carga negativa, incluyendo aniones como el cianuro, el fluoruro, el cloruro y los nitratos, se desplazan hacia el ánodo. La movilización de los contaminantes a través del medio poroso se produce gracias a la acción combinada de tres fenómenos de transporte fundamentales: la electromigración, la electroósmosis y la electroforesis (De La Rosa Pérez , Teeçutli Leon , & Ramirez Islas , 2007).

) Electromigración. En este fenómeno los iones en solución y los coloides con carga eléctrica se mueven a través del campo eléctrico a una velocidad proporcional a la movilidad del ion y la fuerza de campo eléctrico. La ecuación que la describe es:

$$um = Ve \quad (1)$$

Donde

- o um = representa la velocidad de un ión [m s⁻¹]

- V = representa la movilidad iónica [$m^2 s^{-1} V^{-1}$]
- e = representa la fuerza del campo eléctrico (negativo de la diferencia de potencial), $V m^{-1}$

) Electroósmosis. Este fenómeno de transporte consiste en que el líquido saturante y las sustancias suspendidas en el (coloides con o sin carga eléctrica), se dirigen a uno de los electrodos (generalmente hacia el cátodo). La tasa del flujo es proporcional al producto del potencial de la interfase sólido-líquido y la fuerza del campo eléctrico aplicado. En función de las propiedades del suelo se determina el valor del potencial, como también en función del pH del electrolito y de la fuerza iónica.

) Electroforesis. Este fenómeno es observable cuando encontramos ya sea coloides o partículas cargadas eléctricamente, generándose así que los contaminantes que se encuentran ligados al material particulado se transporten por el campo eléctrico. En los suelos con mayor presencia de metales, se produce un mayor impacto en la electromigración que en la electroósmosis, para que exista un transporte del metal, el fenómeno de electromigración debe tener una carga eléctrica y estar en solución, la carga eléctrica no debe variar durante la migración hacia uno de los electrodos (De La Rosa Pérez, Teeçutli Leon, & Ramirez Islas, 2007).

La eficiencia del tratamiento disminuye cuando el contenido de humedad está por debajo del 10%; la presencia de materiales aislados o ciertos metales genera que la conductividad del suelo varía; cuando los valores de pH son extremos y las reacciones de oxidorreducción disminuyen su eficiencia en algunos casos y pueden formarse productos no deseados. Entre otras de las desventajas que presenta el tratamiento podemos destacar que no puede ser

aplicado en todo tipo de suelo, se debe hidratar el suelo en las 24 horas previas del inicio del tratamiento, el suelo a tratar pierde ligeramente su fertilidad (Ávila Salazar, 2016).

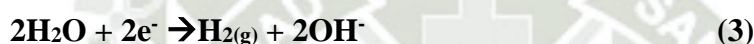
4.6. Reacciones químicas fundamentales en el proceso de electroremediación

4.6.1. Electrolisis del agua

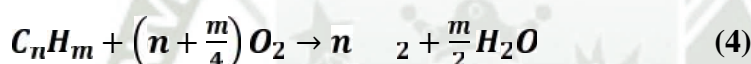
) En el ánodo



) En el cátodo



4.6.2. Oxidación de hidrocarburos



Donde:

N: es el número de átomos de carbono en la molécula del hidrogeno

M: es el número de átomos de hidrogeno en la molécula del hidrogeno

5. MARCO LEGAL

- a) Ley General del Ambiente (Ley N°28611). Su objetivo es lograr un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para que la población pueda tener una buena calidad de vida, pero al mismo tiempo comprometiéndose al cuidado de su preservación.
- b) Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo (Decreto Supremo N°011 - 2017 - MINAM). Establecen los niveles de concentración de sustancias ajenas al suelo en su condición como cuerpo receptor. Se establecen los parámetros físico – químicos y biológicos para la evaluación de la calidad del recurso.

- c) Límites Máximos Permisibles (LMP) de Efluentes Líquidos para el Subsector Hidrocarburos (Decreto Supremo N°037 - 2008 - PCM). Establece, como su nombre lo dice, los límites máximos permisibles de efluentes líquidos en las diferentes actividades del sector hidrocarburos.
- d) Leyes y decretos específicos correspondientes al campo de hidrocarburos y la zona de estudio (Puno).
- o Ley N° 26221 - Ley Orgánica de Hidrocarburos (1993). La presente Ley Orgánica norma las actividades de Hidrocarburos en el territorio nacional.
 - i. Decreto Supremo N° 042-2005-EM - Aprueban Texto Único Ordenado de la Ley Orgánica de Hidrocarburos (2005).
 - o Ley N° 27377 - Ley de Actualización de Hidrocarburos (2000).
 - o Ley N° 26734 - Ley del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía (OSINERG) (1996).
 - o Ley N° 27699 - Ley Complementaria de Fortalecimiento Institucional del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía (OSINERG) (2002).
 - o Ley N° 29134 Ley que Regula los Pasivos Ambientales del Subsector Hidrocarburos.
 - i. Decreto Supremo N°033-2020-EM - Aprueba el reglamento de la Ley que regula los Pasivos Ambientales del Subsector Hidrocarburos.



CAPÍTULO III

CAPÍTULO III METODOLOGÍA PROPUESTA

6. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

6.1. Tipo

El presente estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo con un diseño de tipo experimental. Esta elección metodológica se justifica porque el objetivo principal fue evaluar el efecto de la manipulación deliberada y controlada de ciertas variables independientes (voltaje, tipo de electrolito y concentración de surfactante) sobre una variable dependiente (el porcentaje de remoción de hidrocarburos). Siguiendo los principios de la investigación experimental, se estableció un entorno de laboratorio rigurosamente supervisado para aislar la influencia de los factores de estudio y así poder establecer relaciones de causa y efecto claras sobre la eficacia del proceso de electroremediación (Tevni Grajales, 2000), a continuación, podemos ver en la **Tabla 2**, el tipo de variables.

Tabla 2

Tipo de variables

Tipo de variable	Variables	Indicadores	Escala	Instrumento
	Concentración inicial de hidrocarburos en suelos contaminados	Concentración inicial de hidrocarburos	ppm	Espectrofotómetro UV
	Remoción de HC	Voltaje	Voltios	Voltímetro
		Concentración del electrolito	mg/L	Espectrofotómetro UV
		Tiempo del tratamiento	Días	Cronómetro
Dependiente	Eficiencia de remoción de hidrocarburos	Porcentaje de remoción de hidrocarburos del suelo	%	Espectrofotómetro UV

Nota. Elaboración Propia

6.2. Nivel

Asimismo, la investigación corresponde a un nivel aplicado, ya que su propósito fundamental es generar conocimiento con una orientación directa hacia la solución de un problema práctico y tangible: la contaminación de suelos por hidrocarburos. En lugar de buscar el desarrollo de teoría pura, este trabajo se enfoca en la validación y optimización de una tecnología específica para su potencial implementación en contextos reales de remediación ambiental, en línea con la definición de investigación aplicada que busca "actuar, elaborar o transformar" a partir del conocimiento generado como lo indica el autor (Tevni Grajales, 2000).

7. METODOLOGÍA

7.1. Evaluar la calidad del suelo del pasivo ambiental elegido, mediante el protocolo de toma de muestra de suelos contaminados establecido por la guía del MINAM.

7.1.1. Evaluación de pasivos ambientales de hidrocarburos para una elección del método no probabilístico.

Se realizó una revisión bibliográfica en la que se determinó el número de pasivos ambientales de hidrocarburos en el Perú. Luego se realizó una tabla clasificando los pasivos ambientales de hidrocarburos correspondientes a los diferentes departamentos del Perú. A partir de esta información, se calculó el porcentaje con la fórmula PORCENTAJE en Excel.

Posteriormente se efectuó una elección basándonos en el muestreo no probabilístico por conveniencia de un pasivo ambiental de hidrocarburos, ubicado en la región de Puno. Dicho pasivo ambiental, presenta riesgos de medio a alto para la seguridad poblacional, calidad ambiental y de salud.

En el muestreo no probabilístico se hace uso de métodos en los que el azar no tiene intervención y, por ende, la probabilidad que se asocia a los individuos para ser parte de la muestra es desconocida, debido a que la elección de los elementos muestrales está sujeta al criterio del investigador. Estos métodos generalmente son utilizados en estudios exploratorios o intencionales, en donde no es prescindible la proyección de resultados, y la muestra es seleccionada a través de procedimientos no aleatorios. No hay garantía de la representatividad de la muestra, lo cual es un inconveniente del método. Hecho que no implica que los métodos probabilísticos sean mejores que el método elegido, más bien permiten el cálculo del error muestral que se está cometiendo (Canal Díaz, 2006).

Mientras que el muestreo no probabilístico por conveniencia se basa en que el investigador selecciona de manera intencional o directa a los individuos de la población. Lo habitual con este método es hacer uso de los individuos de fácil acceso como muestra. Comúnmente, este método resulta útil cuando se tiene la intención de explorar un fenómeno en una determinada población o cuando no está definido el tamaño muestral (Arias Gomez, Villasis-Keever, & Miranda-Novales, 2016).

Entre los criterios que se tomaron para la presente investigación tenemos, la accesibilidad al punto de muestreo, la similitud entre las actividades realizadas entre Arequipa y Puno, además, se seleccionó el pasivo ambiental con criterios de mayor riesgo para la salud, para la seguridad poblacional y para la calidad ambiental.

El pasivo ambiental seleccionado es uno de los 10 existentes en la región de Puno, según el Inventario de Pasivos Ambientales del Subsector de Hidrocarburos del MINEM, actualizado en el 2023.

En cuanto a los aspectos físicos del distrito de Pusi, tenemos que se encuentra a una altitud en promedio de 3838 m.s.n.m., y está ubicado en su mayoría en el piso altitudinal Suni. Mientras que el 39.27% presenta una pendiente llana a ligeramente inclinada ($<2^\circ$). Geomorfológicamente, se caracteriza por presentar llanuras o planicies aluviales (44.87% de la extensión superficial).

En el distrito de Pusi la cobertura vegetal que predomina es el pajonal andino y la agricultura costera y andina. Presenta bofedales y los cuerpos de agua se encuentran ocupando menos del 1% de la extensión superficial. Cuenta con dos unidades geográficas, Bajo Coata y la 0179.

Mientras que para las condiciones atmosféricas, este distrito presenta un clima muy lluvioso y cálido, con precipitaciones abundantes durante todo el año, siendo

calificada su humedad relativa como muy húmeda. Su precipitación histórica total acumulada anual es de 680 mm (SENAMHI, 2021).

7.1.2. Ubicación del pasivo ambiental seleccionado.

Este pasivo se localizó a partir de las coordenadas provenientes de dicho inventario mediante Google Earth. Para posteriormente ya ubicadas las coordenadas crear un mapa en el software ArcMap. Primero se delimitó el área de estudio en el distrito de Huancané, generando una capa con el punto de ubicación definido. Luego se elaboró un mapa de ubicación general en el límite departamental de Puno. Así mismo se delimitó el área mediante imágenes satelitales históricas provenientes de Google Earth, correspondientes en décadas anteriores donde la presencia del pasivo ambiental resulta más evidente.

7.1.3. Muestreo y evaluación de calidad del suelo proveniente del pasivo ambiental seleccionado.

Luego de ubicado el pasivo se procedió al muestreo de suelos. Este muestreo se realizó según los estándares de la “Guía para el muestreo de suelos contaminados” del MINAM según el marco del Decreto Supremo N 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Se realizó un muestreo simple que se define en la guía como: “Muestra colectada en un tiempo y lugar particular. Muestras que representan las condiciones puntuales de una muestra de la población en el tiempo que fue colectado. Estas siempre se aplicarán para compuestos orgánicos volátiles (COV’S), Hidrocarburos y benceno, tolueno, etilbenceno, Xilenos” (MINAM, 2014). Se procedió a aplicar el protocolo para muestras superficiales, Se tomaron muestras compuestas, estas en 4 puntos adyacentes a las coordenadas indicadas por el Inventario de Pasivos Ambientales. Primero se determinó el uso actual del área de muestreo, suelo agrícola, por lo que se tomaron muestras en capas de profundidad de 0 a 30 cm y de 30

a 60 cm. Comenzando, limpiando el área de cualquier desecho o escombro en la superficie como ramas, piedras, residuos, etc. Después se procedió a extraer una muestra compuesta de las diferentes capas del suelo hasta los 60 cm de profundidad en 4 puntos diferentes. Para después almacenar los 5 kg extraídos de muestra compuesta en 5 frascos de vidrio de boca ancha, con tapa y sello de teflón, en un cooler para mantener la baja temperatura recomendada de 4C. Posteriormente estas se entregaron a ALAB, laboratorio acreditado por INACAL, en donde realizaron los análisis respectivos.

7.2. Determinación de las condiciones óptimas de la celda de electroremediación.

Se realizó la caracterización fisicoquímica de los 8 tratamientos de nuestras muestras. Siguiendo la metodología establecida por (Barbosa Bojacá , 2020) para remediación de suelos hidrocarburos. La metodología empleada por Barbosa Bojacá (2020) tuvo como objetivo el determinar cuáles eran las óptimas condiciones para la remoción de fenantreno en suelos contaminados mediante electroremediación. Inicialmente, se recolectó una muestra de suelo que fue tamizada cuidadosamente para eliminar todo material vegetal presente, garantizando así la homogeneidad y uniformidad del sustrato. Posteriormente, se contaminó artificialmente esta muestra con fenantreno en concentraciones conocidas, permitiendo el control preciso de la concentración inicial del contaminante. Durante la experimentación, se aplicaron distintos voltajes eléctricos a la celda electroquímica durante un periodo inicial de tres días continuos. Este procedimiento permitió identificar el voltaje óptimo para maximizar la eficiencia del tratamiento, siendo el voltaje de 25 voltios el que presentó los mejores resultados de remoción del fenantreno.

Simultáneamente, se llevó a cabo un monitoreo constante del pH como parámetro determinante para evaluar la efectividad del proceso electroremediativo. Cabe señalar que durante la experimentación no se emplearon soluciones amortiguadoras (soluciones

tampón), ya que se observó que valores bajos de pH favorecían significativamente la eficiencia en la remoción del contaminante.

Con base en el protocolo experimental, la fase de tratamiento de las muestras de suelo contaminado se organizó en dos etapas principales, diferenciadas por la aplicación de un voltaje constante de 15 V y 30 V. Para determinar las condiciones operativas que maximizan la eficiencia del proceso, se implementó un diseño de experimentos factorial completo de tipo 2^3 . Esta robusta herramienta estadística fue seleccionada por su capacidad para evaluar simultáneamente la influencia, tanto individual como interactiva, de tres factores clave, cada uno examinado en un nivel bajo y uno alto:

-) Potencial eléctrico aplicado: 15 V versus 30 V.
-) Concentración del surfactante (saponina): 10 ml/kg frente a 20 ml/kg.
-) Tipo de solución electrolítica: Cloruro de sodio en comparación con una mezcla de EDTA y sosa cáustica.

En cuanto al criterio para la selección de los voltajes y dosis del surfactante a aplicar, obedeció a la previa revisión bibliográfica, evaluando los voltajes y dosis que usaron otros estudios, además de los límites que proporcionaron efectividad de remoción, lo que nos permitió situar nuestra investigación dentro de un rango conocido. Los voltajes se seleccionaron en criterios experimentales comúnmente empleados en la electrorremediación de suelos. Voltajes moderados (10V a 30V), generalmente permiten generar un gradiente eléctrico suficiente para inducir electroósmosis, electro migración y electroforesis sin causar desecación excesiva ni aumento significativo de temperatura. (Caballero Rodriguez, 2022). En cuanto a la definición de las dosis de la concentración del surfactante los rangos elegidos se encuentran cerca del nivel mínimo necesario para formar micelas que permiten mejorar la solubilización y movilidad de los contaminantes. Ya que las dosis excesivas pueden reducir

la permeabilidad del suelo ya que forman espuma, alteran la conductividad eléctrica e incrementan el consumo eléctrico (Velasquez, 2021).

Por otro lado, nuestro objetivo fue la optimización de los efectos de la electrorremediación, a partir de toda la revisión bibliográfica, por tanto, usamos valores que demostraron eficiencia.

La aplicación de este diseño generó una matriz de ocho configuraciones experimentales únicas. Con el fin de asegurar la validez y precisión estadística de los resultados, cada una de estas configuraciones se ejecutó por duplicado, estableciendo una duración de siete días para cada prueba. La lista completa de materiales utilizados para estos montajes se especifica en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Lista de Materiales para la elaboración de las celdas

Materiales	Soluciones	Equipos	Software
<ul style="list-style-type: none"> ○ Láminas anódicas de aluminio ○ Electrodo catódico de cobre ○ Conductores eléctricos de cobre ○ Pinzas de conexión tipo cocodrilo ○ Bornera de distribución de corriente ○ Materia prima para surfactante (quinua) ○ Membranas porosas de filtración 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Extracto de saponina (agente tensioactivo) ○ Solución electrolítica salina (NaCl) ○ Solución de agente quelante (EDTA) ○ Solución alcalina para ajuste de pH (NaOH) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fuente de energía ○ Balanza analítica ○ Multiparámetro 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Chemix ○ Ms-Excel ○ Desing Expert

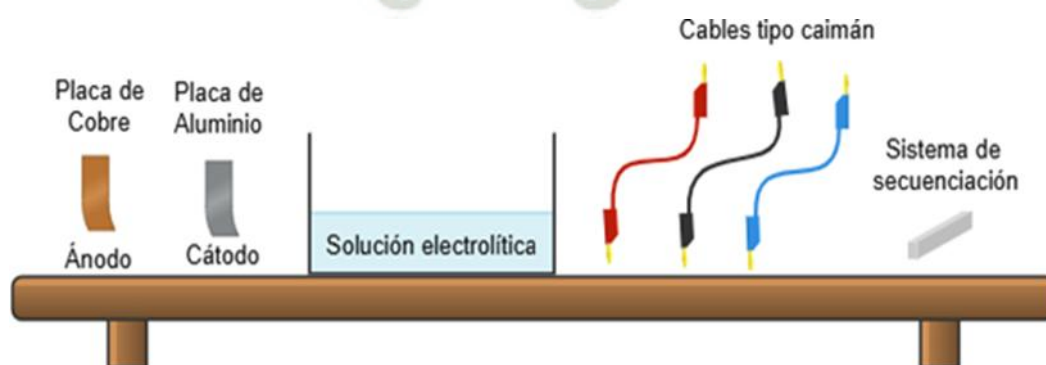
<ul style="list-style-type: none"> ○ Celdas de tratamiento experimentales ○ Matriz de suelo para pruebas ○ Agente contaminante (hidrocarburo) ○ Adhesivo sellador de silicona ○ Tejido poroso separador 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Solvente purificado (agua destilada) 		
--	--	--	--

Nota. Elaboración propia

Para la optimización de las celdas, se elaboraron ocho celdas en las diferentes etapas, se utilizaron barras de cobre y placas de aluminio, las cuales funcionaron como cátodo y ánodo, respectivamente. Los electrodos SE instalaron dentro de recipientes (táperes) con un volumen de 3 L, a una profundidad reducida, asegurando su contacto con la solución electrolítica. Este contacto es fundamental para facilitar la movilización de los hidrocarburos hacia los pozos de extracción, desde donde serán posteriormente retirados. Además, se requirieron cables tipo caimán y un sistema de secuenciación para garantizar una correcta conexión del circuito eléctrico.

Figura 2

Materiales para la elaboración del prototipo



Nota. Elaboración propia por medio del *software Draw.io*.

Todo esto con el propósito de definir un entorno controlado, en este caso las celdas para realizar las pruebas de remoción y poder comparar los distintos resultados de los tratamientos para así establecer las condiciones más eficaces que podrían a ser aplicadas en un proceso a mayor escala.

7.3. Optimización de los procesos de electroremediación a través de un diseño experimental

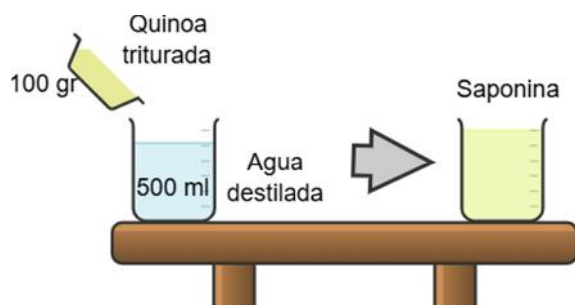
2.3.1. Preparación de soluciones (Obtención de la Saponina)

Para la preparación de soluciones en primer lugar, se obtuvo la saponina a partir de quinua mediante un proceso controlado. Para ello se pesaron 100 gramos de quinua y se procedieron a triturar en una licuadora hasta lograr la ruptura de la cáscara. Posteriormente, el material triturado fue depositado en un vaso precipitado con 500 mililitros de agua destilada, manteniendo una proporción aproximada de 1:5.

Esta mezcla se agitó de manera continua durante tres horas, observándose la formación de espuma en la superficie, indicativa de la liberación de la saponina. Una vez finalizado el proceso, se dejó reposar la solución y se procedió a su filtración para separar la fase líquida, que contenía la saponina, de la fase sólida. Para concentrar la solución, se llevó a ebullición hasta reducir su volumen a un medio, a través de la evaporación del agua.

Figura 3

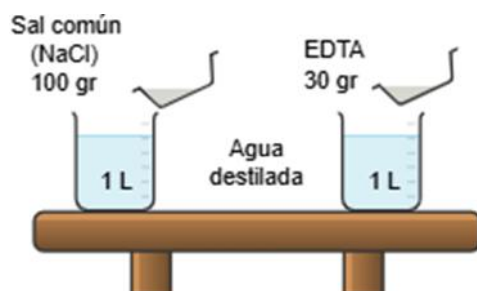
Soluciones para la elaboración de las muestras



Nota. Elaboración propia por medio del software *Draw.io*.

2.3.2. Preparación de las muestras electrolíticas

Se prepararon dos tipos de soluciones electrolíticas necesarias para el proceso experimental. La primera consistió en una solución de cloruro de sodio (NaCl), para lo cual se disolvieron 100 gramos de sal común en 1000 ml de agua destilada. La segunda solución se preparó a partir de EDTA y sosa cáustica, disolviendo 30 gramos de EDTA en un litro de agua destilada y ajustando el pH de la mezcla a 10 mediante la adición gradual de sosa cáustica (NaOH).

Figura 4*Preparación de electrolitos*

Nota. Elaboración propia por medio del *software Draw.io.*

2.3.3. Preparación de muestras contaminadas

Para la preparación de las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos, se pesaron 200 gr de suelo para cada muestra experimental de una muestra madre de 3.6 kg donde se adicionaron 10.5 ml de diésel, logrando una concentración final de 2400 mg/kg de hidrocarburo. La mezcla se homogenizó adecuadamente para garantizar una distribución uniforme del contaminante en las ocho muestras experimentales.

Estas soluciones y muestras fueron utilizadas en el proceso de electroremediación, asegurando la correcta aplicación de los factores experimentales evaluados y permitiendo la optimización de las condiciones del tratamiento.

2.3.4. Preparación de las muestras seleccionadas para el diseño experimental

Para la configuración de las ocho celdas de reacción, se siguió un protocolo de distribución sistemático que se ajustaba a la matriz del diseño experimental factorial. Inicialmente, se procedió a la asignación de las soluciones electrolíticas, introduciendo un volumen de 500 ml de la solución salina a base de cloruro de sodio en las unidades experimentales numeradas como 2, 4, 5 y 6. De forma paralela, un volumen idéntico de la solución quelante alcalinizada, compuesta por EDTA y sosa cáustica, se añadió a las celdas restantes, correspondientes a los números 1, 3, 7 y 8. Una vez añadido el

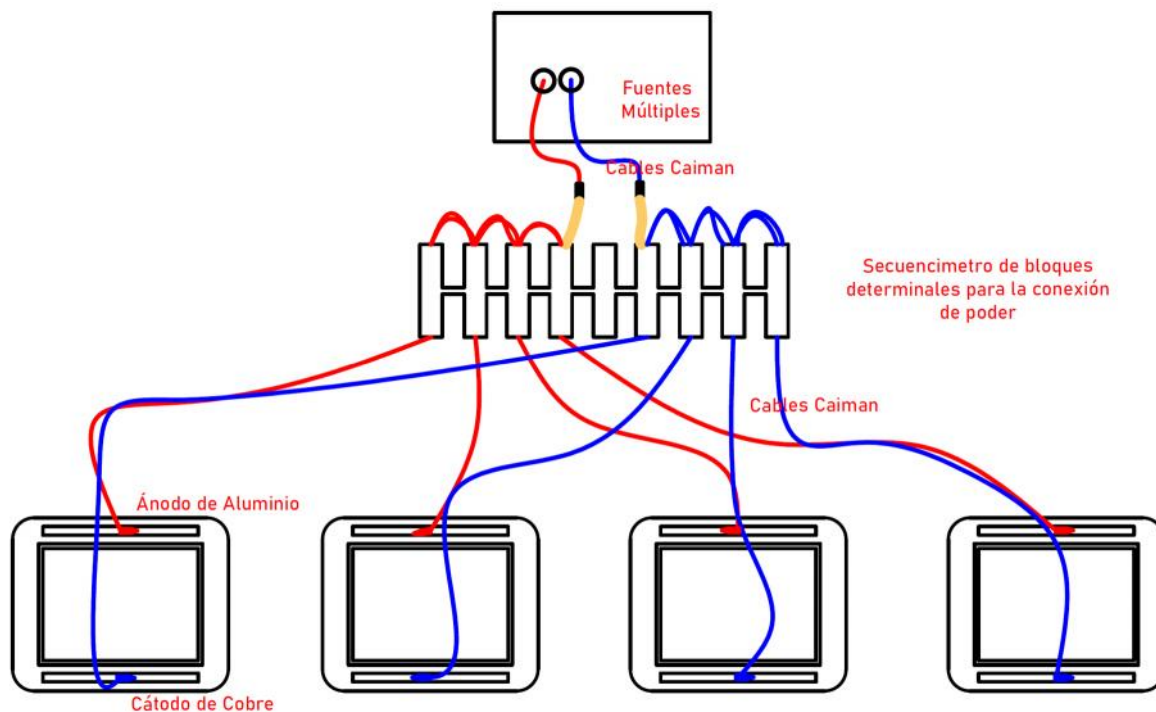
electrolito, la muestra de suelo, previamente contenida dentro de una envoltura de tejido poroso para prevenir su dispersión, fue cuidadosamente sumergida en el medio líquido de cada celda, garantizando así una completa saturación. Posteriormente, se dosificó el agente tensioactivo natural, aplicando la concentración baja de 10 ml de extracto de saponina a las unidades 1, 2, 5 y 6, mientras que la concentración alta de 20 ml se destinó a las unidades 3, 4, 7 y 8. Finalmente, se asignaron los niveles de potencial eléctrico, de modo que el primer grupo de celdas (1, 2, 3 y 4) fue configurado para operar a un voltaje de 30 V, y el segundo grupo (5, 6, 7 y 8) fue sometido a un tratamiento con un voltaje de 15 V.

Para la energización del sistema experimental, se utilizó un secuencímetro de bloques de terminales que permitió una conexión segura y ordenada a la fuente de alimentación de corriente continua. La configuración del circuito se estableció siguiendo una polaridad específica: los electrodos catódicos de cobre se enlazaron a los terminales correspondientes mediante pinzas de conexión tipo cocodrilo de color rojo, mientras que los electrodos anódicos de aluminio se vincularon a sus terminales utilizando pinzas de color negro. Se realizó una verificación minuciosa de cada punto de contacto para asegurar la integridad y el correcto funcionamiento de todo el montaje eléctrico.

Una vez activado el sistema, el periodo de tratamiento para cada una de las ocho configuraciones experimentales se mantuvo de forma ininterrumpida por un lapso total de 72 horas. Al finalizar este periodo, se procedió a la recolección y preservación de las muestras de suelo tratado de cada celda. Este muestreo post-tratamiento tuvo como objetivo final la caracterización fisicoquímica de las muestras para determinar su estado final y cuantificar la eficacia de cada tratamiento aplicado.

Figura 5

Armado de las celdas y su funcionamiento



Nota. Elaboración propia por medio del programa *AUTOCAD 2025*.

Para el alcance de resultados por cada uno de los 8 tratamientos se valoraron dos niveles y tres factores (voltaje, concentración de surfactante (saponina) y el tipo de electrólito (EDTA y cloruro de sodio o con sosa caustica)), siendo un diseño factorial de 2^3 , y se realizaron 2 repeticiones. Obteniendo así el porcentaje de remoción por duplicado por cada tratamiento.

Se trabajará la evaluación de la eficiencia según la **Tabla 4**:

Tabla 4*Diseño factorial*

Corrida Experimental	Nivel de Potencial Eléctrico (V)	Dosis de Surfactante (ml/kg)	Composición de la Solución Electrolítica	Variable de Respuesta (% Remoción)
1	15	10	Electrolito Salino (NaCl)	<i>Por cuantificar</i>
2	15	10	Electrolito Quelante (EDTA + NaOH)	<i>Por cuantificar</i>
3	15	20	Electrolito Salino (NaCl)	<i>Por cuantificar</i>
4	15	20	Electrolito Quelante (EDTA + NaOH)	<i>Por cuantificar</i>
5	30	10	Electrolito Salino (NaCl)	<i>Por cuantificar</i>
6	30	10	Electrolito Quelante (EDTA + NaOH)	<i>Por cuantificar</i>
7	30	20	Electrolito Salino (NaCl)	<i>Por cuantificar</i>
8	30	20	Electrolito Quelante (EDTA + NaOH)	<i>Por cuantificar</i>

Nota. Elaboración propia

7.4. Evaluación de la eficiencia de remoción de hidrocarburos a través de la electrorremediación

Para evaluar la eficiencia primero se tuvo que determinar las concentraciones finales de cada muestra remediada para así compararlas con las concentraciones iniciales conocidas para ello se hizo un análisis espectrofotométrico y después el análisis de eficiencia por medio del desarrollo de un diseño factorial 2^3 .

Se analizaron las muestras finales del suelo tratado con el fin de determinar las concentraciones finales de hidrocarburos. Para ello, cada una de las muestras de 200 g se secó en una estufa a 35 °C durante 24 horas, evitando temperaturas mayores para prevenir la volatilización parcial de las fracciones más ligeras. Una vez secas, las muestras fueron trituradas manualmente en un mortero hasta obtener un material fino y homogéneo, asegurando la representatividad del análisis.

A partir de esta muestra principal, se tomó una subalícuota de 10 g, que fue transferida a un matraz de 250 mL. A esta porción se le añadieron 30 mL de hexano de grado analítico, seleccionado por su alta afinidad para disolver hidrocarburos. La mezcla fue sometida a dos ciclos de extracción en baño ultrasónico, cada uno con duración de 15 minutos, permitiendo la liberación y transferencia de los hidrocarburos desde la matriz sólida hacia la fase orgánica.

Finalizada la extracción, la solución se filtró cuidadosamente para separar la fracción líquida del residuo sólido. Este residuo fue enjuagado con 5 mL adicionales de hexano, los cuales se integraron al extracto principal para asegurar la recuperación completa de los compuestos presentes. Posteriormente, del extracto obtenido se tomó una alícuota de 1 mL, la cual se transfirió a la celda del espectrofotómetro UV-Vis, registrándose la absorbancia a la longitud de onda establecida en la curva de calibración.

Para la curva de calibración se construyó por espectrofotometría UV-Vis. Se prepararon soluciones estándar de diésel en hexano dentro del rango 0–1600mg/kg (el rango esperado) equivalente. Las absorbancias se midieron a $\lambda = 272$ nm, definida para el diésel en un espectrofotómetro de UV-Vis, utilizando hexano como blanco. Los datos se ajustaron mediante regresión lineal en Excel, obteniéndose la ecuación $A = m \cdot C + b$ ($R^2 = 0.99$), donde A es la absorbancia y C la concentración equivalente de hidrocarburos. Esta

ecuación se utilizó para calcular las concentraciones finales de hidrocarburos de las muestras de suelo a partir de sus lecturas de absorbancia, corrigiendo por el factor de extracción. En la **Tabla 5** se observan los rangos definidos y la absorbancia por calcular.

Tabla 5*Estándares para la curva de calibración*

Estándar	Absorbancias	Concentraciones
E0	Por cuantificar	0
E1	Por cuantificar	200
E3	Por cuantificar	400
E4	Por cuantificar	600
E5	Por cuantificar	800
E7	Por cuantificar	1000
E8	Por cuantificar	1200
E9	Por cuantificar	1400
E10	Por cuantificar	1600

Nota. Elaboración propia

Para realizar el análisis de la eficiencia se desarrolló un diseño factorial 2^3 con el fin de determinar la influencia de diferentes factores en la eficiencia del proceso de electroremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Se consideraron tres factores principales, cada uno con dos niveles de variación:

-) **Voltaje aplicado:** 15 V y 30 V
-) **Concentración de surfactante (saponina):** 10 ml/kg y 20 ml/kg
-) **Tipo de electrolito:** Solución de cloruro de sodio (NaCl) y EDTA con sosa cáustica (NaOH)

Para evaluar estos factores, se diseñaron ocho combinaciones experimentales, con **dos repeticiones por cada ensayo**, asegurando la validez estadística de los resultados.

Cada muestra fue sometida al proceso de electroremediación bajo las condiciones establecidas, manteniendo un tiempo de tratamiento de **72 horas**.

Para la cuantificación de la eficiencia del proceso de **remoción de hidrocarburos**, se midieron las concentraciones inicial y final de contaminante en cada muestra. La eficiencia de remoción se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$E(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

-) E (%): representa la **eficiencia de remoción** en porcentaje.
-) Ci: es la **concentración inicial de hidrocarburos** en mg/kg.
-) Cf: es la **concentración final de hidrocarburos** en mg/kg.

Las muestras de suelo contaminado fueron analizadas antes y después del tratamiento, determinando la concentración de hidrocarburos mediante un **método analítico estandarizado, la espectrofotometría**. La diferencia entre ambas concentraciones permitió calcular el porcentaje de remoción, proporcionando un indicador cuantitativo de la eficiencia de cada tratamiento experimental.

En último lugar, los datos que se obtuvieron fueron sometidos a un Análisis de Varianza (ANOVA) para evaluar la relevancia de los factores y de las interacciones que se generan entre estos, en la eficiencia de remoción. Los resultados se representaron gráficamente mediante diagramas de Pareto, gráficos de efectos principales y superficies de respuesta, permitiendo una interpretación detallada de la influencia de cada factor en el proceso de electroremediación.



CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

8. RESULTADOS

8.1. Evaluar la calidad del suelo del pasivo ambiental elegido mediante el protocolo de toma de muestra de suelos contaminados por el MINAM.

Para la evaluación de la calidad del pasivo ambiental elegido primero se realizó una estimación no probabilística de todos los pasivos ambientales de hidrocarburos enumerados en el Inventario del MINEM. Se elaboró un diagnóstico de la proporción de estos, analizados por cada región que presenta pasivos ambientales de hidrocarburos en el Perú, resaltando la región Puno con la finalidad de utilizar el método no probabilístico, basándonos en la cercanía, accesibilidad e importancia del lugar de estudio.

Tabla 6

Evaluación de la proporción de pasivos ambientales hidrocarburos por región en el Perú

Regiones	N° de Pasivos	%
Piura	3127	95.803%
Loreto	14	0.429%
Puno	10	0.306%
Tumbes	98	3.002%
Amazonas	2	0.061%
Ica	1	0.031%
Junín	1	0.031%
Madre de Dios	1	0.031%
Pasco	5	0.153%
Ucayali	5	0.153%
Total	3264	100.000%

Nota. Adaptado del Inventario de pasivos ambientales de hidrocarburos (MINEM, 2023)

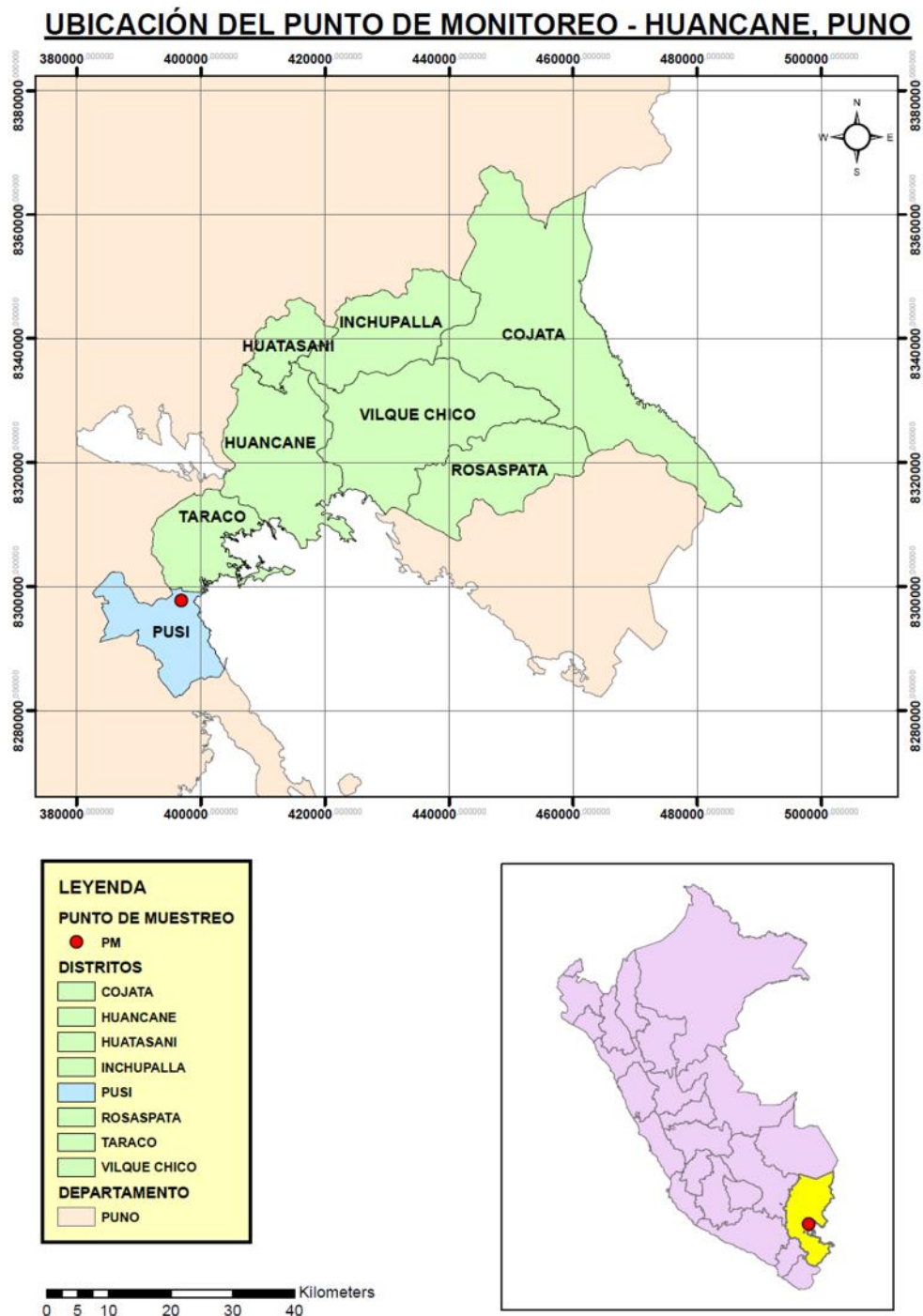
Los resultados mostrados en la **Tabla 6** fueron obtenidos de los datos proporcionados en la última versión del Inventario de Pasivos Ambientales del Subsector de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2023).

Para la viabilidad de esta investigación se consideró los criterios para la elección del pasivo ambiental como: cercanía, accesibilidad vial, estado del pasivo, nivel de riesgo, entre otros.

Para la ubicación del punto de monitoreo se realizó un mapa en ArcGIS. Se comenzó con la obtención de las capas (layers) requeridas para el mapa de las plataformas virtuales GEO GPS PERU. Las capas obtenidas fueron las de los límites departamentales y distritales. Estas se recortaron solo en la zona de interés. Para posteriormente crear una capa con los pasivos ambientales dentro del límite departamental de Puno, ubicados por medio de coordenadas obtenidas de la última versión del inventario de pasivos ambientales del MINEM. Finalmente se recortó la capa en el límite distrital de **Huancané** donde se encontraba el punto del pasivo elegido no probabilísticamente. Obteniendo la **Figura 6**.

Figura 6

Ubicación espacial de la zona de estudio



Nota. El mapa muestra la ubicación del punto de monitoreo (exactamente en las coordenadas 399155.00 m E, 8297406.00 m S 19 L.) para la investigación, el cual se encuentra en Huancané, Puno. Capas adaptadas de *GEO GPS Perú* (2024). Datos de ubicación del punto

de muestreo obtenidos del *Inventario de Pasivos Ambientales del Subsector de Hidrocarburos*, MINEM (2023). Mapa de elaboración propia por medio del software ArcGIS 10.5.

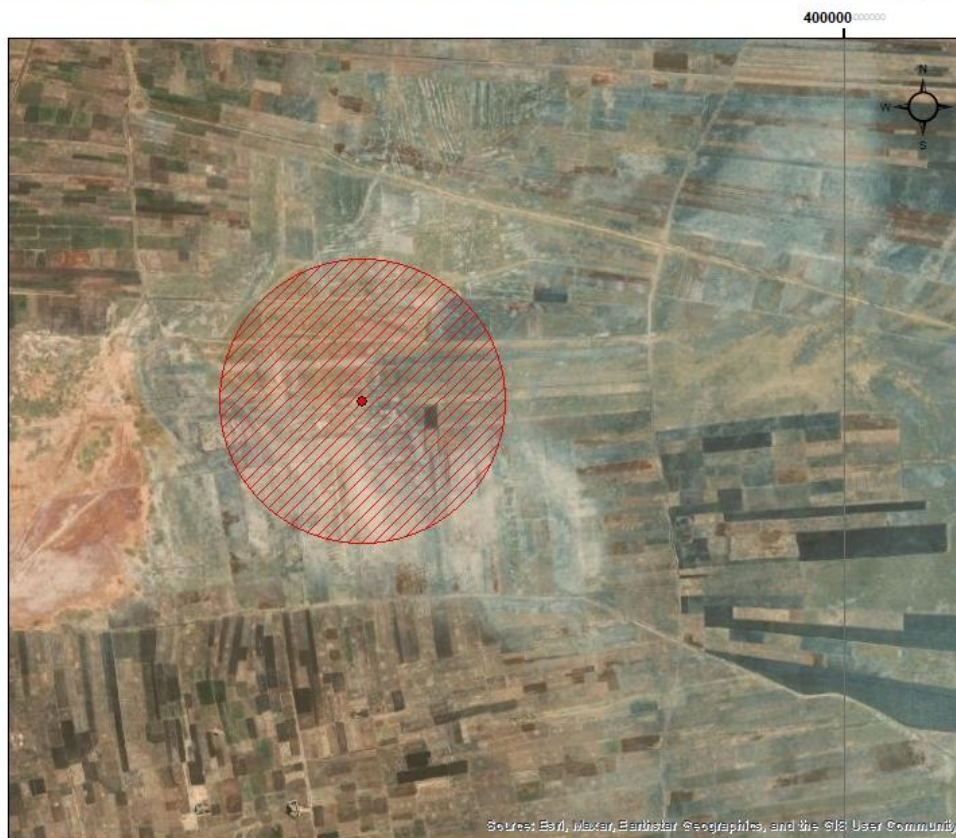
Para la delimitación e identificación del área de estudio se realizó un mapa en el software ArcGIS. Pero ya que en el inventario de pasivos ambientales de hidrocarburos solo nos otorga una coordenada, y por tanto no tiene un área delimitada específicamente, además, tanto la guía del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014) como el Manual de Buenas Prácticas en la Investigación de Sitios Contaminados (GIZ, 2016) tampoco especifican alguna distancia para delimitar áreas de estudio en este tipo de casos (un solo punto de referencia). Se tomó la decisión de considerar un radio de 250 m alrededor de la coordenada otorgada. Esto después de realizar una revisión de las imágenes satelitales históricas en Google Earth donde se puede observar ciertos indicios del área de influencia del pasivo ambiental seleccionado.

Para determinar la distancia nos basamos en criterios que se usaron en estudios similares relacionados a la preevaluación de sitios contaminados, los cuales refieren que el radio puede tomarse entre los 100 y 500 m según las condiciones del suelo y del contaminante (EPA, 2011). Por tanto, el área de influencia tendría una forma circular, con lo cual se pudo diseñar el mapa correspondiente, como también el muestreo del suelo. Obteniendo la **Figura 7** que se muestra a continuación.

Figura 7

Mapa de delimitación del punto de muestreo en un área de 250 metros

DELIMITACION DEL AREA DE INFLUENCIA DEL PM - HUANCANE, PUNO



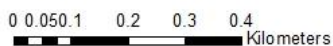
MAPA DE UBICACIÓN



LEYENDA

- PM
- Area de Influencia

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 19S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500,000.0000
 False Northing: 10,000,000.0000
 Central Meridian: -69.0000
 Scale Factor: 0.9996
 Latitude Of Origin: 0.0000
 Units: Meter



Nota. El mapa muestra el área de influencia con un radio de 250 metros desde el punto de monitoreo. Capa base obtenida de Google Earth (2024). Datos de ubicación del punto de

muestreo obtenidos del *Inventario de Pasivos Ambientales del Subsector de Hidrocarburos, MINEM (2023)*. Mapa de elaboración propia por medio del software *ArcGIS 10.5*.

Para llegar al pasivo ambiental de hidrocarburos elegido, tomamos la carretera Yura/Carretera 34A por unos 248 km hasta llegar a la rotonda en donde tomamos la segunda salida en dirección a Av. Héroes de la Guerra del Pacífico/Carretera 34 A por unos 200 m. En la rotonda tomamos la segunda salida en dirección a Cv Oeste/Carretera 34 A unos 1,4 km donde giramos a la derecha con dirección a la Av. Ferrocarril y conducimos por un km hasta girar pronunciadamente a la izquierda con dirección a Av. Ferrocarril – Jr. Mariano Núñez, por 54 m en donde giraremos hacia la avenida Huancané/Carretera 34H por unos 9.3 km en donde giramos en dirección a PU-909 por unos 14.3 km hasta llegar a una intersección sin nombre y girar a la izquierda por 3.5 km y girar nuevamente a la izquierda por 700 m hasta llegar al final del área de acceso vehicular para luego caminar hacia el punto de muestreo.

Figura 8

Extracción del suelo para poder proceder a la toma de muestra



Nota. Se realizó la excavación a una profundidad de 60 cm en los 4 puntos adyacentes a las coordenadas indicadas para el pasivo ambiental a estudiar, tomado del último inventario de pasivos ambientales de hidrocarburos del MINEM.

Figura 9

Muestreo del suelo del pasivo ambiental de hidrocarburos seleccionado



Nota. Una vez realizada la excavación de los 4 puntos, se procedió a extraer muestras compuestas por las diferentes capas de suelo hasta los 60 cm excavados (5 kg en total). Posteriormente se almacenaron en 5 frascos de vidrio de boca ancha, con tapa y sello de teflón (proporcionados por el laboratorio ALAB), y se dispusieron en un cooler a 4 °C.

Figura 10

Panorama de la zona de muestreo



Nota. Como se puede notar en la zona de monitoreo, el suelo había sido labrado (probablemente para realizar actividades agrícolas), por lo cual el suelo podía verse en una zona más oscura que en otra.

En la obtención de las muestras, se analizaron los parámetros requeridos en el DS_011-2017-MINAM. Donde se encontraron los siguientes resultados mostrados en la **Tabla 7**. Estos resultados se obtuvieron

Tabla 7

Análisis de HTP– Muestra proveniente del área de estudio comparados con los ECAS del suelo para HC.

Ensayo	Unidad	L.D.M*	L.C.M*	Resultados	ECA
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 1 (C6 - C10)	mg/Kg MS*	0.990	2.010	<2.010	200
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 2 (>C10 – C28)	mg/Kg MS*	4.920	10.000	<10.000	1200
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 3 (C28 – C40)	mg/Kg MS	4.920	10.000	<10.000	3000

Nota. Adaptado del informe final del análisis de hidrocarburos totales de petróleo de ALAB.

MS: Materia Seca, L.C.M: Limite de Cuantificación del Método, L.D.M: Limite de Detección del Método.

En los resultados obtenidos en la **Tabla 7** se observó que las muestras obtenidas del punto de muestreo no exceden los ECAs. Aunque no se afirma que no hay presencia de HC ya que estos podrían estar presentes en condiciones mínimas.

8.2. Determinación de las condiciones óptimas de la celda de electroremediación

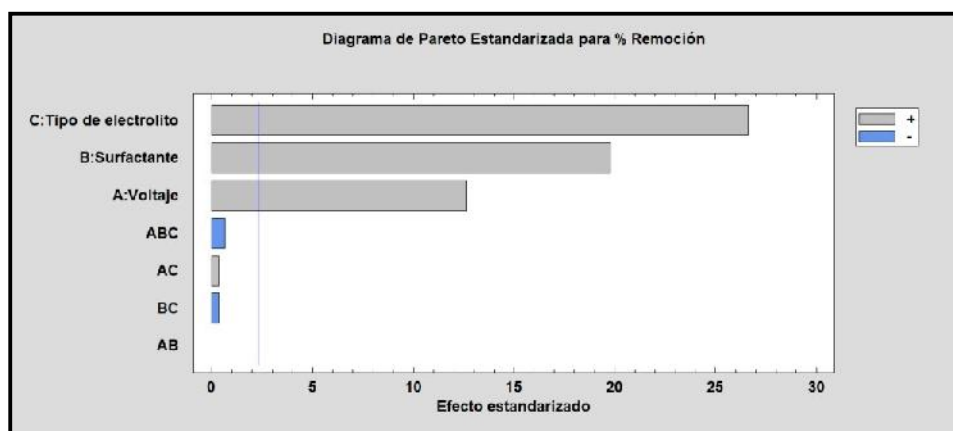
El propósito central de esta fase experimental fue establecer la configuración de parámetros que permitiera el más alto rendimiento del sistema de electroremediación. La justificación para este enfoque se encuentra en la evidencia aportada por estudios recientes, donde trabajos como el de Bazán et al. (2020) han demostrado que una calibración precisa de las variables operativas, que incluyen el voltaje, la concentración del surfactante y la selección del electrolito conduce a un incremento sustancial en la eficacia del proceso. Dicha mejora se traduce directamente en una disminución de los tiempos de tratamiento y de los costos operativos, convirtiendo la optimización en un requisito indispensable para la viabilidad técnica, económica y ambiental de la tecnología en la remoción de hidrocarburos.

Para alcanzar este objetivo, el procedimiento experimental comenzó con el análisis fisicoquímico de las ocho muestras preparadas para los distintos tratamientos, estableciendo así una línea base. La formulación de estas configuraciones se inspiró en los hallazgos de investigaciones bibliográficas relevantes, particularmente en estudios sobre el lavado de suelos con EDTA y la biorremediación. Con el fin de asegurar la fiabilidad estadística, cada tratamiento se realizó mediante réplicas, y los resultados derivados de la metodología empleada se presentan a continuación en la

Figura 11.

Figura 11

Diagrama de Pareto Estandarizado para el Porcentaje de Remoción



Nota. Elaboración propia por medio del software Minitab.

El diagrama de Pareto estandarizado, presentado en la **Figura 11**, permite jerarquizar la magnitud y la significancia estadística de los efectos principales y sus interacciones. Aquellos factores cuyas barras exceden el umbral de referencia son los que ejercen una influencia determinante sobre el porcentaje de remoción, identificándolos como las variables críticas que deben controlarse para maximizar la eficacia del tratamiento de suelos.

Estos hallazgos guardan una notable coherencia con la literatura precedente. La importancia del voltaje, por ejemplo, es consistente con los resultados de Bazán et al. (2020), quienes, en un estudio sobre suelos contaminados con metales pesados, encontraron que la aplicación de un potencial eléctrico elevado de 30 V era fundamental para alcanzar los mayores porcentajes de remoción, que se situaron entre el 55% y el 55.99%.

Asimismo, la relevancia del tipo de electrolito, que se posiciona como otro factor de gran impacto, ya había sido subrayada por Martínez Barrios (2020). Dicho autor destacó que la utilización de compuestos específicos, como el EDTA en combinación con soluciones alcalinas, mejora de manera significativa el rendimiento del proceso, ya que

optimiza la conductividad eléctrica del medio y facilita la movilidad de los contaminantes. Esta evidencia externa proporciona un sólido respaldo a las observaciones del presente estudio, donde se confirma que la interacción sinérgica entre un voltaje alto y la solución de EDTA con sosa cáustica crea las condiciones ideales para el tratamiento, lo que permitió alcanzar porcentajes de remoción máximos de entre el 90% y el 92%.

Tabla 8

Análisis de varianza para el porcentaje de remoción-suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Voltaje	0.1681	1	0.1681	707.79	0.0000
B: Surfactante	0.093025	1	0.093025	391.68	0.0000
C: Tipo de electrolito	0.038025	1	0.038025	160.11	0.0000
INTERACCIONES					
AB	0.000025	1	0.000025	0.11	0.7539
AC	0.000025	1	0.000025	0.11	0.7539
BC	0	1	0	0.00	1.0000
ABC	0.0001	1	0.0001	0.42	0.5346
RESIDUOS	0.0019	8	0.0002375		
TOTAL (CORREGIDO)	0.3012	15			

Nota. Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual. Elaboración propia por medio del software Minitab.

La **Tabla 8** detalla los resultados del Análisis de Varianza (ANOVA), una herramienta estadística empleada para discernir la relevancia de los factores estudiados y sus interacciones sobre el porcentaje de remoción. La interpretación de esta tabla se centra en los valores p, los cuales actúan como un indicador de la significancia estadística. Convencionalmente, un valor p inferior a 0.05 denota que el factor o la interacción ejerce una influencia determinante en la variable de respuesta, mientras que valores superiores a este umbral sugieren una ausencia de un efecto estadísticamente significativo.

Los hallazgos de este análisis estadístico se ven reforzados por la literatura científica. La investigación de Martínez-Prado et al. (2011), por ejemplo, corrobora la importancia fundamental de aplicar un voltaje adecuado, ya que este es el principal inductor de las reacciones electroquímicas que transforman, movilizan y degradan los hidrocarburos, concluyendo que un potencial eléctrico elevado potencia de manera sustancial la eficiencia del proceso.

De manera similar, los resultados obtenidos con respecto a la saponina como agente tensioactivo natural muestran una correlación positiva con las conclusiones de Apaza Cari (2020). Dicho autor reportó que el surfactante derivado de la quinua mejora notablemente la eficacia de la remediación, atribuyendo este éxito a sus propiedades tensoactivas que facilitan la degradación de contaminantes hidrofóbicos como los hidrocarburos.

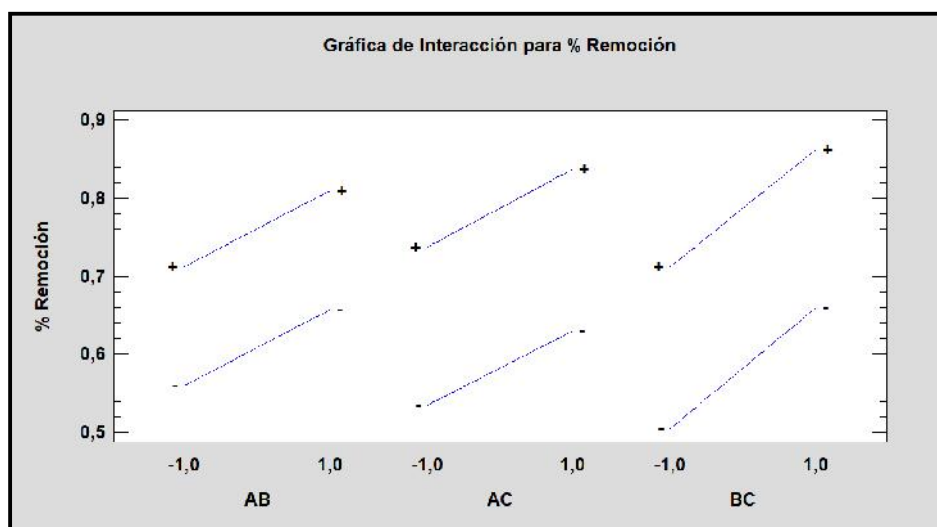
Finalmente, el rol del electrolito también encuentra respaldo en estudios previos. Picard y Chaouki (2017) señalaron que la combinación de EDTA y NaOH optimiza la biodisponibilidad de los hidrocarburos, lo que facilita su posterior oxidación y eliminación. Esta conclusión es, a su vez, apoyada por Martínez-Prado et al. (2011), quienes identifican al EDTA como un agente quelante altamente efectivo que potencia el transporte electrocinético de los contaminantes hacia los electrodos, lo que resulta en un incremento general de la eficiencia de la electrorremediación.

8.3. Optimización De Los Procesos De Electrorremediación A través De Un Diseño Experimental

Se realizó un diseño experimental 2^3 donde se obtuvieron los siguientes resultados evidenciados en la **Figura 12**.

Figura 12

Gráfica de interacciones para el Porcentaje de Remoción



Nota. Elaboración propia por medio del software Minitab.

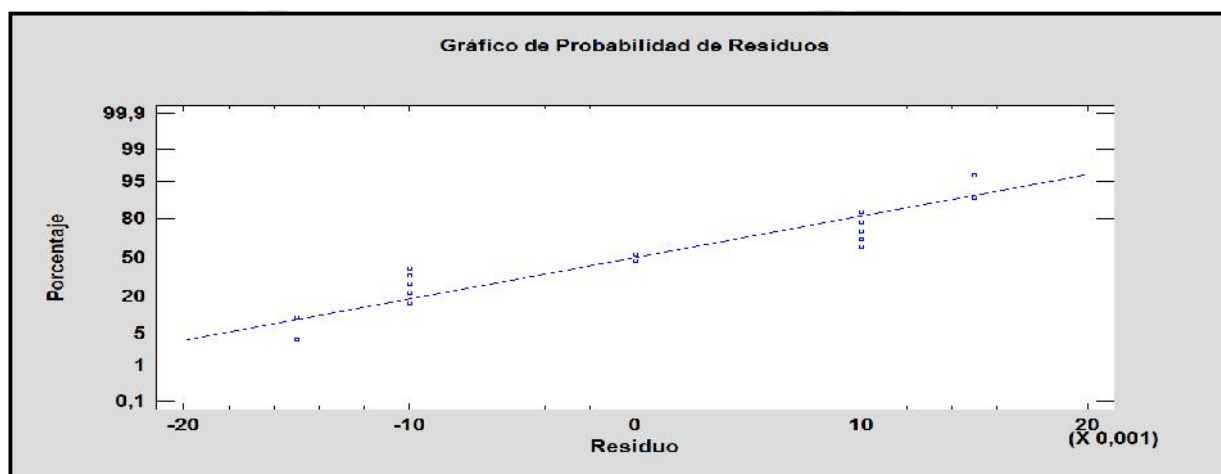
La **Figura 12** muestra un análisis gráfico detallado de las interacciones entre los factores evaluados en el experimento factorial aplicado para determinar la eficiencia en la electroremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Los factores estudiados fueron el voltaje aplicado (factor A), la concentración del surfactante natural saponina (factor B), y el tipo de electrólito utilizado en la solución (factor C). El factor A (voltaje) presentó dos niveles, bajo (15 V) y alto (30 V). El factor B (saponina) también contó con dos niveles: bajo (10 ml/kg) y alto (20 ml/kg). Por último, el factor C (electrólito) se dividió en dos niveles, bajo con cloruro de sodio (NaCl), y alto con EDTA combinado con sosa cáustica (NaOH).

El análisis mostró que al aumentar simultáneamente el voltaje y la concentración de saponina se observa una mejora considerablemente la eficiencia de remoción. Asimismo, al combinar un voltaje alto con el electrólito EDTA con sosa cáustica, también se incrementa significativamente la eficiencia del proceso. Finalmente, la combinación óptima de estos tres factores—30 V de voltaje, 20 ml/kg de saponina y el uso de EDTA con sosa cáustica—logró la máxima eficiencia, alcanzando entre 90% y 92% de remoción.

Por el contrario, la combinación menos efectiva fue con el voltaje más bajo (15 V), menor concentración de saponina (10 ml/kg) y cloruro de sodio, obteniendo solo entre 45% y 47% de remoción. Estos resultados destacan la necesidad de optimizar conjuntamente estos factores para mejorar sustancialmente la remediación del suelo.

Figura 13

Gráfica de Probabilidad de Residuos



Nota. Elaboración propia por medio del software Minitab.

La **Figura 13** corresponde a la gráfica de probabilidad normal de los residuos, una herramienta de diagnóstico estadístico utilizada para corroborar que los errores del modelo siguen una distribución normal. La alineación de los puntos de datos a lo largo de la línea diagonal de referencia es indicativa de que se cumple este supuesto, lo cual es un requisito fundamental para garantizar la validez del Análisis de Varianza (ANOVA). Cualquier desviación sistemática de esta línea podría señalar problemas en el modelo o la interferencia de factores no controlados.

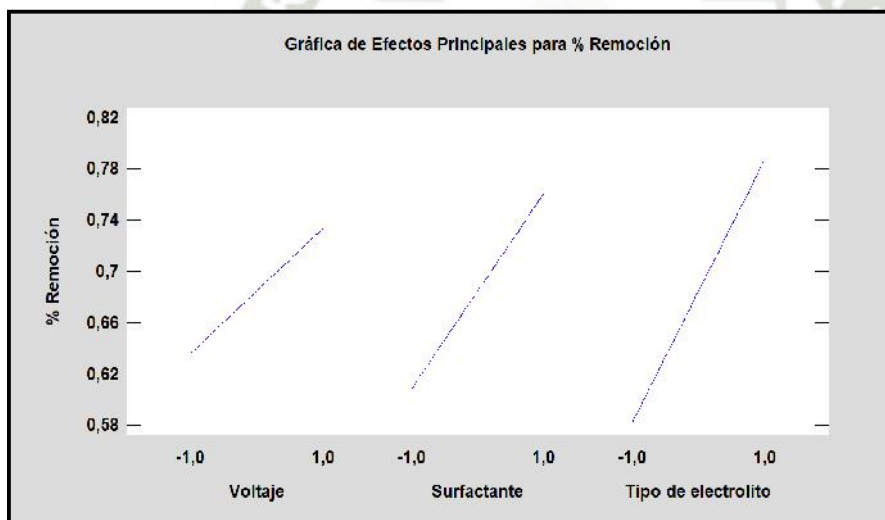
La relevancia de este tipo de análisis confirmatorio es consistente con las prácticas metodológicas en el campo. En una investigación análoga sobre la remoción de metales pesados, Ortiz Jahn (2023) también recurrió a la gráfica de probabilidad de residuos como un paso crucial para asegurar la validez y confiabilidad de su modelo experimental. En su trabajo,

la confirmación de la normalidad de los residuos validó los hallazgos del ANOVA, estableciendo un paralelismo metodológico con los resultados satisfactorios de validación que se han obtenido en el presente estudio.

Asimismo, Hidalgo (2022), en un estudio enfocado en la electroremediación para remover cadmio utilizando gráficos de residuos similares con el fin de validar el modelo experimental empleado y concluyendo que la distribución normal de los residuos es un aspecto crítico para asegurar la robustez del modelo estadístico aplicado (Hidalgo Ortiz, 2022).

Figura 14

Gráfica de efectos principales para el porcentaje de remoción



Nota. Elaboración Propia en el Software de Minitab.

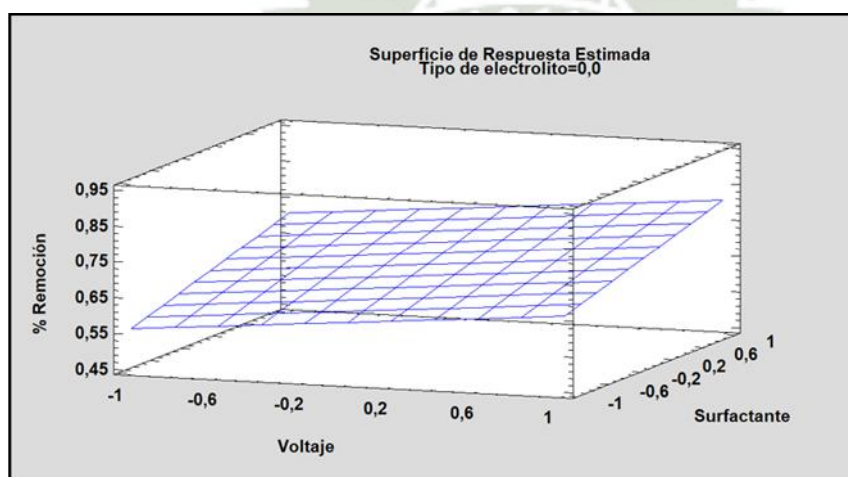
La gráfica de efectos principales, que se ilustra en la **Figura 14**, proporciona una visualización clara de la influencia individual que cada uno de los factores estudiados, es decir, el voltaje, la concentración de surfactante y el tipo de electrolito, ejerce sobre la eficiencia de remoción. La magnitud de la influencia de cada variable se interpreta a través de la pendiente de su línea respectiva; una inclinación pronunciada revela que el factor tiene un impacto significativo, mientras que una línea con una pendiente más suave indica un efecto de menor relevancia en el proceso.

Esta interpretación visual se ve respaldada por la literatura científica. La importancia de operar con un voltaje elevado, por ejemplo, es consistente con las conclusiones de Baez et al. (2020). En una investigación similar de electrorremediación, estos autores reportaron que la aplicación de 30 V fue un factor clave para alcanzar eficiencias de remoción de hasta el 55.99% en suelos contaminados con metales pesados, lo que corrobora que un mayor potencial eléctrico potencia la eliminación de contaminantes.

De igual manera, el efecto positivo del surfactante de saponina es coherente con los hallazgos de Apaza Cari (2020). Dicha investigación concluyó que el uso de saponina de quinua mejora sustancialmente la remediación de suelos con hidrocarburos, logrando una eficacia de casi el 96.79%. Esta conclusión se alinea con los resultados que se presentan en la Figura 15 de este trabajo, donde se observa de manera inequívoca que una mayor concentración del agente tensioactivo conduce a un notable incremento en la eficiencia del tratamiento.

Figura 15

Superficie de Respuesta



Nota. Elaboración Propia por medio del software Minitab.

La **Figura 15** exhibe la superficie de respuesta, una representación gráfica

tridimensional que ilustra cómo la interacción entre dos factores afecta de manera combinada el porcentaje de remoción. Esta herramienta visual es fundamental para comprender las sinergias entre las variables de operación y para identificar la región de parámetros que conduce a la máxima eficiencia del proceso de remediación.

El análisis de esta superficie revela que los rendimientos más altos se localizan en la región donde se combinan un voltaje elevado (30 V) con una alta concentración de saponina (20 ml/kg) y el uso del electrolito a base de EDTA y sosa cáustica. La intersección de estas condiciones define la zona de tratamiento óptima. Estos hallazgos empíricos son consistentes con los mecanismos reportados en la literatura, como en el estudio de Lara Hernández (2022). Dicha investigación sobre remediación electrocinética concluyó que la combinación sinérgica de un voltaje adecuado con surfactantes funcionalizados mejora considerablemente la eliminación de contaminantes, ya que aumenta la movilidad y el transporte electrocinético de los compuestos hidrofóbicos hacia los electrodos.

Además, los trabajos de Taherian et al. (2024) ofrecen un respaldo adicional, al haber reportado que la aplicación conjunta de surfactantes específicos y un voltaje óptimo incrementó sustancialmente la remoción de diésel. Este efecto fue atribuido a la reducción de la tensión superficial y a la facilitación del transporte electroosmótico. En consecuencia, la presente investigación reafirma que la interacción efectiva entre factores, particularmente entre el surfactante y el voltaje aplicado, es un elemento fundamental para alcanzar niveles superiores de remoción.

8.4. Evaluación de la eficiencia de remoción de hidrocarburos a través de la electrorremediación

Tras la conclusión de la fase experimental, se realizó la medición del rango estándar por medio del espectrofotómetro, obteniendo diferentes absorbancias, que se

puede observar en la **Tabla 9**. Con esta tabla se realizó la curva de calibración (**Figura 16**) y su respectiva ecuación que se utilizaron para calcular las concentraciones finales mostradas en la **Tabla 10**.

Tabla 9

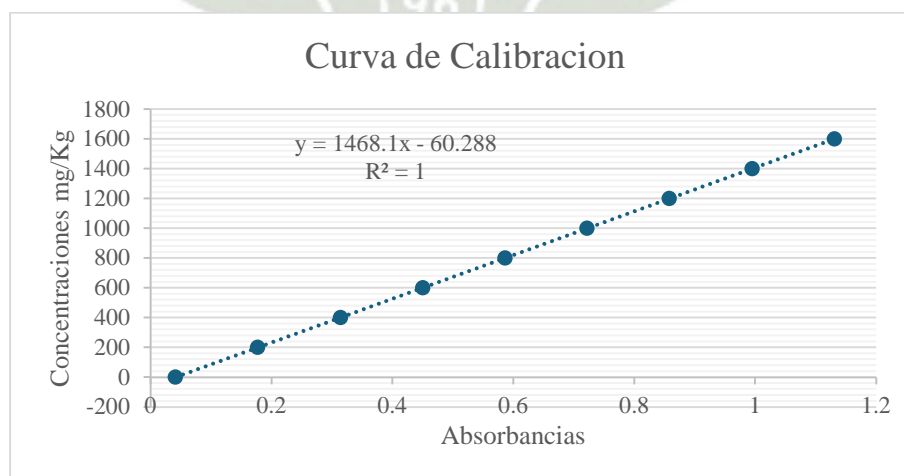
Resultados de medición de la absorbancia para las concentraciones estándar

Estándar	Absorbancias	Concentraciones
E0	0.041	0
E1	0.177	200
E3	0.314	400
E4	0.45	600
E5	0.586	800
E7	0.722	1000
E8	0.858	1200
E9	0.995	1400
E10	1.131	1600

Nota: Elaboración Propia

Figura 16

Curva de Calibración (Concentraciones vs Absorbancias)



Nota: Elaboración Propia por medio de Excel

Tabla 10*Resultados de medición de la absorbancia y concentraciones finales*

Primera Corrida		Segunda Corrida	
Absorbancia	Concentración	Absorbancia	Concentración
0.172	192	0.204	240
0.32	408	0.367	480
0.401	528	0.448	600
0.5	672	0.532	720
0.582	792	0.615	840
0.662	912	0.695	960
0.744	1032	0.776	1080
0.907	1272	0.94	1320

Nota: Elaboración propia

Luego se procedió a cuantificar el rendimiento de cada configuración mediante la aplicación de la Ecuación 5. Los resultados obtenidos, que se detallan en la **Tabla 11**, revelan una marcada diferencia en la eficacia del tratamiento según la combinación de los factores estudiados.

El análisis de la **Tabla 11** muestra que la eficiencia de remoción más baja, situada entre el 45% y el 47%, se registró en el tratamiento N°1. Este resultado se corresponde con la aplicación de un voltaje de 15 V, una dosis de saponina de 10 ml/kg y el uso de una solución de cloruro de sodio como electrolito. En contraposición, el rendimiento más elevado se observó en el tratamiento N°8, donde se alcanzó una remoción de entre el 90% y el 92%. Este éxito se logró al combinar el voltaje más alto (30 V), la mayor concentración de surfactante (20 ml/kg) y la implementación del electrolito compuesto por EDTA y sosa cáustica.

Tabla 11

Diseño factorial aplicado

Configuración Experimental	Potencial Eléctrico (V)	Dosis de Saponina (ml/kg)	Sistema Electrolítico	Concentración Final (mg/kg)	Rendimiento de Remoción (%)
1	15	10	Salino (NaCl)	1272 - 1320	45-47
2	15	10	Quelante (EDTA + NaOH)	1032 - 1080	55-57
3	15	20	Salino (NaCl)	912 - 960	60-62
4	15	20	Quelante (EDTA + NaOH)	672 - 720	70-72
5	30	10	Salino (NaCl)	792 - 840	65-67
6	30	10	Quelante (EDTA + NaOH)	528 - 600	75-78
7	30	20	Salino (NaCl)	408 - 480	80-83
8	30	20	Quelante (EDTA + NaOH)	192 - 240	90-92

Nota. Elaboración propia

Esta misma tabla nos muestra que el mayor porcentaje de remoción (90%-92%) se obtuvo en la repetición número 8, siendo el voltaje de 30 voltios, con una concentración del surfactante de 20 ml/kg de y con electrolito EDTA con sosa caustica.

Mientras que a continuación en la **Tabla 12** se muestra la condición del suelo antes y después de la contaminación con hidrocarburos de este.

Tabla 12*Situación de las muestras de suelo antes y después del tratamiento de electroremediación*

Ensayos	Muestras antes de contaminar (mg/kg)	Muestras después de contaminar (mg/kg)	Muestras después del tratamiento (mg/kg)	Remoción (%)
1	<10.000	2400	1272 - 1320	45 - 47
2	<10.000	2400	1032 - 1080	55 - 57
3	<10.000	2400	912 - 960	60 - 62
4	<10.000	2400	672 - 720	70 - 72
5	<10.000	2400	792 - 840	65 - 67
6	<10.000	2400	528 - 600	75 - 78
7	<10.000	2400	408 - 480	80 - 83

Nota: Elaboración Propia

Tabla 13

Balance de materia

Flujo de Materia	Cantidad/Condición	Estado de Salida	Cantidad/Condición de Salida
Suelo contaminado	Con hidrocarburos (concentración inicial ~100%)	Suelo tratado	8–10% de hidrocarburos residuales (90–92% removido)
Saponina (surfactante)	10 ml/kg o 20 ml/kg	Parte absorbida, parte movilizada	Mejor desempeño a 20 ml/kg
Electrolito (EDTA + sosa cáustica o NaCl)	0.1 M	Iones libres movilizados	Mejora de transporte iónico (mejor con EDTA+ soda cáustica)
Agua	Solución base para electrolitos	Parcialmente retenida en suelo	Transporte de contaminantes vía electroósmosis
Hidrocarburos	Presente inicialmente en el suelo	Removido/movilizado hacia electrodos	90–92% eliminado con el mejor tratamiento

Nota. Elaboración propia

En la **Tabla 13**, de balance de materia se identificaron las entradas y las salidas del procedimiento de remoción de hidrocarburos. Como entradas fundamentales se observa el suelo contaminado, la saponina como surfactante, el electrolito (EDTA) que contiene sosa caustica o cloruro de sodio y por último el agua que se utilizó como solución para el transporte. Las salidas fundamentales que se observaron son el suelo tratado con una reducción del 92%, por otro lado, se observaron pequeñas cantidades de agua residual y algunos otros aditivos.

Tabla 14

Balance de energía

Flujo de Energía	Parámetro	Transformación	Salida o Resultado
Corriente eléctrica	15V o 30V	Campo eléctrico entre electrodos	Oxidación/reducción, electroósmosis
Calor generado	Disipación por resistencia del suelo	Leve aumento de temperatura	Mejora transporte de contaminantes
Reacciones químicas (oxidación/reducción)	Activadas por voltaje aplicado	Degradación de hidrocarburos, liberación de iones	Aumento en eficiencia de remoción
Movimiento de líquidos (electroósmosis)	Inducido por el campo eléctrico	Migración de fase líquida	Remoción de contaminantes disueltos

Nota. Elaboración propia

En la **Tabla 14**, se identifica la cantidad de energía requerida de los procesos para poder reducir la cantidad de hidrocarburos presentes en el suelo contaminado. Para ello se utilizó 15 v a 30 v los que surgieron para generar un campo eléctrico entre los electrodos y ayudan a activar las reacciones de oxidación y reducción que degradan los hidrocarburos, por lo cual se han identificado las energías transformadas (reacciones químicas y transporte de materia) a su vez no se observó que no hay pérdidas representativas de calor en el sistema.

9. DISCUSIONES

La cantidad de pasivos ambientales en el subsector de hidrocarburos en Piura representa el 95.8% del total en el país. Siendo esta la zona más afectada por la contaminación de hidrocarburos, como derrames tanto en el suelo y mar de Piura. Así como el abandono de pozos petroleros sin un plan de cierre adecuado, dejando estas zonas afectadas. Los derrames de Petróleo aumentaron en 353% en Perú desde el año 2020. Siendo el promedio anual de 146. Mientras que entre los años 1997 y 2019 fue de 41.35 (Perú Equidad, 2024).

La contaminación de hidrocarburos es una problemática creciente no solo en la región de Piura sino también en Puno. Según un estudio realizado en la comunidad de Corapata, Pusi, Puno el riesgo ambiental en se encuentra entre el 30.8% y 47.9% para el agua, suelo. Y ha impactado el entorno socioeconómico en 62%. Sugiriendo un riesgo moderado en las áreas contaminadas tanto como para el suelo y agua (Rodriguez Melo, 2023).

Diferentes investigaciones han identificado pasivos ambientales del subsector de hidrocarburos en áreas adyacentes el lago Titicaca. Esta investigación determino la superficie terrestre afectada siendo 96.54 ha de las cuales 98.2% donde se observó ausencia de vegetación. Presentando un riesgo alto para flora y fauna del área afectada (Huisa & Loza Del Carpio, 2023).

En el análisis de calidad de suelo realizado conforme a los protocolos establecidos en la Guía para el muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), nos permitió identificar o en este caso descartar la presencia de hidrocarburos en concentraciones superiores a los LMPs; como se evidencia en el Anexo 2. Los resultados entregados por ALAB (laboratorio acreditado por el INACAL), la muestra tomada del pasivo ambiental no contiene contaminantes de hidrocarburos totales de Fracción 1, 2 o 3 mayores a los LMPs. Esto no indica que el área no haya estado contaminada en el pasado. Es también necesario considerar el tiempo transcurrido entre la identificación del pasivo y la toma de muestras, en adición al contexto actual del área estudiada es decir las actividades realizadas actualmente.

El pasivo elegido ingreso al Inventario de Pasivos Ambientales del Subsector Hidrocarburos el 19 de mayo del 2016 en el Oficio Circular N° 026-2016-OEFA/DE y fue visitado el 20 de noviembre del 2024 para el posterior monitoreo. Siendo el tiempo entre estas dos fechas 8 años y 6 meses. El reglamento para la identificación de pasivos del MINEM & OEFA no indica un tiempo específico entre la incorporación del pasivo ambiental en el

inventario y la fecha del abandono de las instalaciones. Este periodo de tiempo dependiendo de varios factores como la detección del pasivo, la evaluación del riesgo y diversos procesos administrativos (MINEM & OEFA , 2021). Pero cabe recalcar que en caso el pasivo presente un nivel de riesgo alto, el OEFA debe remitir un informe al MINEM en un plazo no mayor a cinco días hábiles desde la emisión de este (Gobierno del Perú, 2021). Este intervalo de tiempo es significativo y en adición al tiempo que pudo haber transcurrido entre la identificación e incorporación del pasivo en el inventario, este intervalo podría haberse ampliado más. Estas condiciones podrían haber favorecido a la biodegradación aeróbica y anaeróbica natural de los hidrocarburos. Esta teoría está sustentada por varios estudios, ya que se ha demostrado que la degradación de hidrocarburos puede ser realizada por microorganismos nativos, ya presentes en el suelo. Siendo la eficiencia de esta biodegradación natural potencialmente eficiente (Gomez Rivera, 2011).

En adición a ello se observó que el área estudiada es ahora una zona agrícola, y la misma área de influencia del punto de monitoreo se encontraba recientemente arada. Como se menciona en la investigación de Wessels & Dube (2022) es probable que, al iniciarse las actividades agrícolas en la zona, con el tiempo, el suelo contaminado por hidrocarburos haya podido ser remediado con el labrado, adición de microorganismos y/o abonos (Wessels & Dube, 2022). Las zonas agrícolas, especialmente las que usan técnicas de arado en el cultivo promueven la oxigenación del suelo, favoreciendo la degradación aeróbica. El riego es otro factor clave ya que incrementa la humedad del suelo promoviendo la proliferación de microorganismos (Rodríguez-Gonzales, Zárate-Villarroe, & Bastida-Codina, 2022).

El análisis de los resultados experimentales permite identificar al tratamiento N°8 como la configuración de eficacia superior, con una tasa de remoción de hidrocarburos que se situó entre el 90% y el 92%. Este éxito se atribuye a la combinación sinérgica de los niveles óptimos de cada factor estudiado. La aplicación de un potencial eléctrico elevado (30 V) fue

determinante, ya que el campo eléctrico generado intensificó el transporte de las especies contaminantes a través de la matriz del suelo, acelerando así su movilización.

Simultáneamente, el uso del agente tensioactivo natural, la saponina, a su máxima concentración (20 ml/kg), resultó fundamental para mejorar la movilidad y extracción de los compuestos hidrofóbicos. El uso de surfactantes en la remediación de suelos es clave, y como destaca Stoyanov (2019), la saponina representa una opción eficaz y ambientalmente favorable gracias a su capacidad para reducir la tensión superficial y aumentar la solubilidad de los hidrocarburos. La notable capacidad de este surfactante para facilitar la remediación es consistente con la investigación de Apaza Cari (2020), quien reportó tasas de degradación de hasta el 96.79% utilizando únicamente saponina de quinua, lo que subraya su potencial para acelerar los procesos de limpieza. Finalmente, el sistema electrolítico compuesto por EDTA y sosa cáustica desempeñó un rol crucial en el proceso. De acuerdo con Picard y Chaouki (2017), la adición de sosa cáustica (NaOH) para ajustar el pH del medio puede incrementar la biodisponibilidad de los hidrocarburos, lo que los hace más accesibles para las reacciones de oxidación y su posterior eliminación del suelo (Stoyanov, 2019).

Frente a este tensioactivo natural, los surfactantes sintéticos, como Triton X-100 y Tween 80, han mostrado eficiencias considerablemente menores bajo condiciones experimentales similares. Taherian et al. (2024) reportaron que el uso de estos compuestos permitió remover únicamente entre 18% y 39% del diésel presente en el suelo, incluso con el control del pH y la aplicación de corriente eléctrica. A pesar de su disponibilidad comercial y facilidad de aplicación, estos surfactantes presentan limitaciones relacionadas con su toxicidad y menor biodegradabilidad (Taherian, Yazdi, Danaei, & Zad, 2024).

Por otro lado, los biosurfactantes bacterianos, producidos por cepas microbianas específicas, han emergido como una alternativa prometedora. Estudios como el de Arul et al.

(2021) han demostrado que su aplicación, combinada con técnicas electrocinéticas, puede alcanzar tasas de biodegradación de hasta 92% en un lapso corto. No obstante, su implementación a gran escala puede verse limitada por la necesidad de condiciones precisas para el cultivo y mantenimiento de los microorganismos productores (Arul, et al., 2021).

La literatura científica ha explorado ampliamente el papel que desempeñan el EDTA y la sosa cáustica en la remediación de suelos. En este sentido, la investigación de Martínez-Prado et al. (2011) enfatiza que el EDTA funciona como un agente quelante altamente efectivo, cuya capacidad para formar complejos con metales facilita de manera notable la movilidad de los contaminantes. Esta propiedad resulta particularmente útil cuando se combina con un campo eléctrico, ya que la migración de los contaminantes hacia los electrodos se ve potenciada, mejorando así su extracción. Los resultados del presente estudio, donde el uso de EDTA con sosa cáustica demostró una remoción superior de hidrocarburos, confirman de manera empírica la efectividad de este sistema en procesos de electrorremediación.

A su vez, la electrorremediación como técnica para la movilización y degradación de contaminantes orgánicos ha sido objeto de numerosos estudios. Tal como menciona De la Rosa-Pérez et al. (2007), la aplicación de un voltaje adecuado es un factor crucial para inducir las reacciones de óxido-reducción que descomponen los hidrocarburos, promoviendo su transformación en compuestos menos tóxicos. En el presente experimento, el hecho de que el tratamiento a 30 V resultara en una mayor eficiencia de remoción valida la importancia que tiene la intensidad del campo eléctrico en el éxito del proceso de descontaminación (De La Rosa Pérez , Teeçutli Leon , & Ramirez Islas , 2007).

El diseño factorial utilizado en este estudio permitió identificar las interacciones entre el voltaje, la concentración de saponina y el tipo de electrolito, optimizando las condiciones para maximizar la remoción de contaminantes. Este enfoque concuerda con investigaciones

previas (Navarrete Zambrano & Ramirez Vincés, 2019) quienes emplearon diseño factorial para optimizar procesos de lavado de suelos contaminados con plomo, demostrando la versatilidad de esta metodología para evaluar y mejorar distintos parámetros en procesos de remediación ambiental.

En cuanto a las dificultades en la aplicación del tratamiento en el área de estudios tenemos, principalmente al contenido de agua en el suelo, debido a que controla la eficiencia de este método de remediación. La humedad del suelo debe ser adecuada y debe mantener la conductividad que posibilita la electromigración, no obstante, debería ser no saturada para mitigar el impacto de la tortuosidad (medida en la curvatura en la trayectoria de los fluidos), en este caso de estudio es importante debido a la cercanía al lago y a los periodos de lluvias intensas. Por otro lado, el pH del suelo es determinante tanto de la forma química del contaminante, como de los procesos de transporte y su velocidad. Mientras que entre las facilidades o ventajas tenemos la accesibilidad, ya que encontramos una carretera cercana, la cual permite el transporte del equipo y materiales necesarios para aplicar el tratamiento en la zona. Además, que este es un tratamiento esperanzador en cuanto a la remediación in situ, ya que, comparado con otros métodos para remediar suelos, es un método rentable por la flexibilidad de su configuración, el requisito energético es bajo, los residuos postratamiento son mínimos, y el tiempo de tratamiento es corto (Alkordi & El-Mehalmey, 2023).

Por otro lado, es importante considerar una posible revegetación en el área afectada por los pasivos ambientales de hidrocarburos. La vegetación que pueda ser utilizada, va a depender de diferentes factores, ya sea la composición del suelo, las condiciones climáticas, la altitud, y el grado de impacto que hayan generado las actividades petroleras en el suelo. Por ejemplo, entre las plantas más comunes y que tienen la capacidad de subsistir en suelos degradados en la región altiplánica tenemos al Ichu (*Stipa ichu*), la Puya de Raimondi (*Puya raimondii*), Yareta (*Azorella compacta*), Chachacoma (*Baccharis conferta*), Aliso (*Alnus acuminata*), Tola

(*Parastrephia quadrangularis*), Jara amarilla (*Baccharis salicifolia*) o Festuca alta (*Festuca arundinacea*). Las especies anteriormente mencionadas son sugerencias, y para poder seleccionar las especies más apropiadas es necesario realizar un estudio de manera detallada del área específica. (Pacosonco Ccama, 2024)





CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES

-) El análisis de laboratorio de las muestras del suelo del pasivo ambiental investigado reveló que no existen concentraciones de hidrocarburos que superen los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), lo cual no necesariamente signifique que no exista presencia de hidrocarburos en este suelo, pero si, que la posible existencia sea en una cantidad realmente mínima. Este hallazgo evidencia una discrepancia entre el inventario oficial y la condición actual del sitio, lo que subraya la necesidad de actualizar el catastro nacional de pasivos ambientales para asegurar que los recursos se enfoquen en zonas que representan un riesgo vigente para la comunidad y el ecosistema.
-) Se determinó que la degradación exitosa del contaminante fue producto de la acción sinérgica de los componentes clave del sistema. El surfactante a base de saponina de quinua fue fundamental para mejorar la solubilidad de los hidrocarburos hidrofóbicos. A su vez, los electrolitos (EDTA y sal) proporcionaron la conductividad necesaria y facilitaron la formación de complejos estables. Finalmente, la aplicación de corriente eléctrica fue el catalizador que indujo las reacciones de oxidación, llevando a la descomposición y remoción efectiva del contaminante.
-) La utilización de un diseño experimental factorial 2^3 se validó como una herramienta metodológica eficaz para entender la dinámica del proceso. Este enfoque permitió evaluar no solo la influencia individual de los tres factores estudiados (voltaje, concentración de surfactante y tipo de electrolito), sino también sus interacciones, lo cual fue crucial para identificar la combinación de parámetros que optimiza la eficiencia de la remediación.

) Los resultados cuantitativos demostraron una amplia gama de eficiencias. La configuración experimental N°8, que combinó el voltaje más alto (30 V), la mayor dosis de surfactante (20 ml/kg) y el electrolito de EDTA, alcanzó un rendimiento máximo de remoción del 90-92%. En marcado contraste, la configuración N°1, con los niveles más bajos de voltaje (15 V) y surfactante (10 ml/kg) y el uso de sal, fue la menos eficiente, logrando apenas un 45-47% de remoción.

2. RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer una actualización en el inventario de pasivos ambientales hidrocarburos, ya que, por ejemplo, el pasivo ambiental elegido ya no presenta contenido de hidrocarburos, debido a que la zona se ha convertido en suelo agrícola.

Debido a que la presente investigación se realizó bajo condiciones controladas, se recomienda desarrollar la investigación a pruebas piloto en entornos reales (con previa comprobación de contenido de hidrocarburos en el suelo) que permitan contrastar los hallazgos teóricos obtenidos con las condiciones del entorno práctico.

Después de realizar el presente estudio, se recomienda investigar sobre este tema dirigido a la contaminación por hidrocarburos en los suelos que provienen de pasivos ambientales en el Perú, debido a que en la búsqueda bibliográfica se hizo evidente la carencia de información e investigación sobre el tema. Además, de la elaboración de un protocolo que pueda ser implementado en dichas investigaciones, el cual permita estandarizar los métodos de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al - Hawash, A. B., Dragh, M. A., Li, S., Alhujaily, A., Abbood, H. A., & Zhang, X. &. (2018). Principles of Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons in the Environment. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 44(2), 71-76.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejar.2018.06.001>.b
- Alkordi, M. H., & El-Mehalmey, W. A. (2023). 8 - Electrokinetic remediation technique for soil contaminants. *Nanoremediation*(27 Febrero 2023), 229-258.
doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823874-5.00005-X>
- Apaza Cari, V. D. (2020). *Aplicación de saponina de quinua como surfactante en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos: Caso Planta Senkata YPFB*. Unversidad Mayor de San Andres, La Paz. Retrieved from <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/33086>
- Arias Gomez, J., Villasis-Keever, M. A., & Miranda-Novales, M. G. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 63(2), 201-206.
Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=486755023011>
- Arul, A., Srinivasa, N., Rajasekar, A., Parthipan, P., AlSalhi, M., Devanesan, S., & Govarthahaan, M. (2021). Bio-electrokinetic remediation of crude oil contaminated soil enhanced by bacterial biosurfactant. *Journal of Hazardous Materials*, 405(124061). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124061>
- Ávila Salazar, T. (2016). *Estudio de la movilidad que presenta el diésel en un suelo contaminado empleando surfactantes*. Universidad Politecnica de Madrid.
doi:<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39207>.

- Barbosa Bojacá , R. Z. (2020). *Implementación de la electroremediación-fenton para la remediación de fenantreno en suelos contaminados por hidrocarburos a escala laboratorio*. Universidad Santo Tomás, Colombia. Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/28168/2020raulbarbosa?sequence=4>
- Barbosa Mireles, E. E. (2016). Aislamiento, Caracterización y Aplicación de Consorcios Bacterianos Hidrocarbonoclastas para la degradación de Hidrocarburos Totales en Suelos Contaminados. 2016. Universidad Autónoma de Nuevo León. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/13996/1/1080237762.pdf>
- Bazán Baez, H., Cristobal Arzapalo, L., Jave Nakayo, J., & Benites Alfaro, E. (2020). Electrorremediación de suelos agrícolas contaminados con plomo, Carabayllo. *Revista ECIPerú*, 34-39. doi:<https://doi.org/10.33017/reveciperu2020.0006/>
- Botello, A. V., Redon Von Osten, J., Gold-Bouchot, G., & Agraz-Hernandez, C. (2005). *Golfo de México: contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche.
- Caballero Rodriguez, A. (2022). *Influencia de la densidad de corriente eléctrica y área efectiva en la remoción de arsénico de un relave minero mediante la electrorremediación*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Peru.
- Canal Díaz, N. (2006, Diciembre 1). *Técnicas de muestreo. Sesgos más frecuentes*. Retrieved from <https://www.revistaseden.org/files/9-CAP%209.pdf>
- Casazola Casazola, J. A., Purca Segura, A. J., & Valle Alvarado, Y. R. (2023). *Sistema de electrorremediación con arreglo lineal para remoción de metales pesados de suelos contaminados caso San Miguel de Viso*. Universidad Nacional del Callao, Lima. Retrieved from <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/7674>

- Castellanos, M. L., Isaza, R. J., & Torress, J. M. (2015). EVALUACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) SOBRE SUELOS URBANOS EN MAICAO, COLOMBIA. *Revista Colombiana de Química*. doi:<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v44n3.55605>
- Ccolque Choque, Y. M., & Vargas Molina, A. F. (2017). *Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP'S) mediante el Método de Biopilas con dos Tipos de Sustrato (Tierra y Abonos Orgánicos)*. Universidad Católica de Santa María., Arequipa, Peru. Retrieved from <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/6745>
- Chukwunonso Ossai, I., Ahmed, A., Hassan, A., & Fauziah Shahul, H. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>
- De La Rosa - Pérez , D. A., Teutli Leon , M. M., & Ramirez Islas, M. E. (2007). ELECTORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS, UNA REVISIÓN TÉCNICA PARA SU APLICACIÓN EN CAMPO. *Revista internacional de contaminación ambiental*. Retrieved from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992007000300003
- De La Rosa Pérez , D. A., Teeçutli Leon , M. M., & Ramirez Islas , M. E. (2007). Polluted soils electroremediation, a technical review for field application. *Revista internacional de contaminación ambiental*. Retrieved from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992007000300003&script=sci_abstract&tlng=en

- EPA. (2011). Brownfields and Land Revitalization Technology Support Center: Guidance for Evaluating Soil Vapor Intrusion. doi:https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/bf_tech_primer_vi_542-r-08-001.pdf
- FAO. (2018). *Guía de Buenas Prácticas para la Gestión y Uso Sostenible de los Suelos en Áreas Rurales*. Bogotá, Colombia. doi:<https://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>.
- Fernandez Cascan , J., Isidro, J., Guadano, J., Saez, C., & A. Rodrigo, M. (2024). Electrokinetic remediation of real soils polluted with chlorinated hydrocarbons: relevance of dichlorination and volatilization processes. *Journal of Solid State Electrochemistry* . doi:<https://doi.org/10.1007/s10008-024-05941-3>
- Garcia Martinez, J. M. (2005). *Los hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados a combustibles fósiles: caracterización, análisis y remediación (Doctoral dissertation, Minas)*. Universidad Politecnica de Madrid. Retrieved from https://oa.upm.es/400/1/MARIA_JESUS_GARCIA_MARTINEZ.pdf
- GIZ, M. &. (2016). *Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados*. . doi:<https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/99>
- Gobierno del Perú. (2021). Decreto Supremo N.º 002-2021-EM: Reglamento para la identificación de pasivos ambientales del Subsector Hidrocarburos. . *Diario Oficial El Peruano*. . doi: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-el-reglamento-para-la-identificacion-de-pasivos-ambie-decreto-supremo-n-002-2021-em-1915613-3/>
- Gómez Flores , P., Gutiérrez Rojas, M., Gómez, S., & González Ignacio. (2021). Sequential solvent extraction as a tool for evaluating hydrocarbons speciation in soil after electrochemical treatment. *Science of The Total Environment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141802>

- Gomez Rivera, M. E. (2011). *Estudio comparativo de la biodegradación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP's) por medio de la atenuación natural, la bioestimulación y la bioaumentación en un suelo contaminado*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Hidalgo Ortiz, D. D. (2022). *Remoción de cadmio (Cd) por electrorremediación de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales en el distrito Molino – Huánuco*. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Huánuco. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2292>
- Hoang, S. A., Sarkar, B., Seshadri, B., Lamb, D., Wijesekara, H., Vithanage, M., . . . Bolan, N. S. (2021). Mitigation of petroleum-hydrocarbon-contaminated hazardous soils using organic amendments: A review. *Journal of Hazardous Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125702>
- Huang, L., Ye, J., Jiang, K., Wang, Y., & Li, Y. (2021). Oil contamination drives the transformation of soil microbial communities: Co-occurrence pattern, metabolic enzymes and culturable hydrocarbon-degrading bacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112740>
- Huisa, D., & Loza Del Carpio, A. (2023). Impacto de pasivos ambientales petrolíferos en el lago Titicaca, Puno, Perú. (U. N. Rica., Ed.) *Revista de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional de Costa Rica*. Retrieved from <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/15587/22280>
- Jara Vilca , R. (2019). *Caracterización de Suelos afectados por Derrame de Hidrocarburos en el Centro Poblado Nueva Esperanza, Distrito de Nieva, Amazonas, Perú*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Retrieved from <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/UNTRM/1762>

Lara Hernandez, A. (2022). *Estudio electrocinético del proceso de remediación de suelos contaminados con HTP aplicando agentes tensoactivos funcionalizados*. Tecnológico Nacional de México, Ciudad Madero.

Lopez Dinorin, R. (2020). *Estudio Electrosmótico de la Migración de Hidrocarburos en Suelos Finos*. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ciudad Madero. Retrieved from <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/1527>

Martínez Barrios, E. (2020). *Estudio de la Migración de Hidrocarburos en Suelos Gruesos para la Remediación Electroquímica*. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ciudad Madero, Tamaulipas. Retrieved from <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/1526>

Martinez Prado, A., Pérez López , E., Pinto Espinoza, J., Gurrola Nevárez , B., & Osori Rodríguez, A. L. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 241-252. Retrieved from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300009

Martinez Sepulveda, J., Sanchez , J., Volke, T., Vallejo, V., Perez, L., Duarte, P., . . . Casallas, M. (2019). Remedacion de suelos contaminados fundamentos y casos de estudio.

Martínez-Prado, A., Perez-Lopez, E., Pinto-Espinoza, J., Gurrola-Nevarez, B., & Osorio-Rodriguez, A. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27. Retrieved from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300009

MINAM. (2013, Febrero 15). *Resolucion Ministerial N 042-2013-MINAM*. Retrieved from https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/rm_042-2013-minam.pdf

MINAM. (2014). *Guía para el Muestreo de Suelo*.

doi:<https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>.

MINEM & OEFA . (2021). Reglamento para la identificación de pasivos ambientales del Subsector Hidrocarburos y metodología para la determinación del nivel de riesgo.

doi:<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7177520/6152991-reglamento-para-la-identificacion-de-pash-y-metodologia-final.pdf>

MINEM. (2002). *Decreto Supremo N°032 - 2002 - EM*. Retrieved from

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Hidrocarburos/publicaciones/glosario.pdf>.

MINEM. (2019). *Servicio de Consultoría para la elaboración de los Planes de*

Rehabilitación de 12 sitios impactados por las actividades de hidrocarburos en la cuenca del río Tigre. doi:<https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/522376-convocan-a-proceso-para-elaboracion-de-planes-de-rehabilitacion-de-sitios-contaminados-por-hidrocarburos-en-la-cuenca-del-maranon>

MINEM. (2023). INF. 337-2023-MINEM-DGAAH/DGAH - Anexo. Perú. Retrieved from

<https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5153175-pasivos-ambientales-del-subsector-hidrocarburos>

MINEM. (2023, Febrero 16). Resolución Ministerial N° 057-2023-MINEM. Lima.

Retrieved from

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4133432/RM%20N%C2%B0%20057-2023-MINEM-DM.pdf.pdf?v=1676647402>

Mohanakrishna, G., Al-Raoush, R. I., & Abu-Reesh, I. M. (2020). Sewage enhanced bioelectrochemical degradation of petroleum hydrocarbons in soil environment through bioelectrostimulation. *Biotechnology Reports*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00478>

Navarrete Zambrano, K., & Ramirez Vincas, K. (2019). *Lavado de suelo contaminado con plomo mediante la utilización de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA)*. ESPAM MLF.

OEFA. (2016). *Portal de Transparencia Estandar*. Retrieved from <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2363331/Pasivos%20Ambientales%20seg%C3%BAn%20el%20Decreto%20de%20Urgencia%20N%C2%B0%20022-2020.pdf>

OEFA. (2020). Pasivos Ambientales D.U. N° 022-2020. Perú.

Ortiz Jahn, C. (2023). *Métodos De Electrorremediación Y Fitorremediación para descontaminar los Suelos por Metales Pesados en la Planta Metalúrgica de Yauris – UNCP - 2022*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.12894/9122>

Pacosonco Ccama, J. (2024). Propuesta de un plan de revegetación del pasivo ambiental del proyecto minero AFC-14, Pampilla–Ananea-Puno 2023.

Perú Equidad. (2024). *Las sombras de los hidrocarburos: Impacto de los derrames petroleros en el Perú*. Perú Equidad. doi: https://equidad.pe/wp-content/uploads/2024/08/La_sombra_de_los_hidrocarburos.pdf

- Picard, F., & Chaouki, J. (2017). NaClO/NaOH soil oxidation for the remediation of two real heavy-metal and petroleum contaminated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2691-2698. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.005>
- Proietto, F., Meli, P., Prestigiacomio, C., Galia, A., & Scialdone, O. (2024). Study of electrochemical remediation of clay spiked with C12-C18 alkanes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111780>
- Rodríguez Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). *La Contaminación del Suelo: Una Realidad Oculta*. FAO. doi:<https://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
- Rodríguez Melo, M. (2023). Evaluación del riesgo ambiental por contaminación de hidrocarburos en la comunidad de Corapata, distrito de Pusi, Puno. (U. N. Altiplano, Ed.) *Revista de Investigaciones de la Universidad Nacional del Altiplano*. Retrieved from <https://revistas.unap.edu.pe/epg/index.php/investigaciones/article/view/3601>
- Rodríguez Uribe, M. L., Peña Cabriales, J. J., Rivera Cruz, M., & Délano Frier, J. P. (2021). Native bacteria isolated from weathered petroleum oil-contaminated soils in Tabasco, Mexico, accelerate the degradation petroleum hydrocarbons in saline soil microcosms. *Environmental Technology & Innovation*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101781>
- Rodríguez-Gonzales, A., Zárate-Villarroe, S. G., & Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Ciencias Ambientales*, 56(2215-3896). doi:<http://dx.doi.org/10.15359/rca.56/1.9>
- Sabroso, M., & Pastor, A. (2004). *Guía sobre Suelos Contaminados. Conferencia de la Pequeña y Mediana Empresa Aragonesa. Gobierno de Aragón. Zaragoza, España.*

- Saini, A., Negan Bekele, D., Chadalavada, S., Fang, C., & Naidu, R. (2021). Electrokinetic remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil (I). *Environmental Technology & Innovation*, 23(101585). doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101585>
- SENAMHI. (2021). *Plan de prevención y reducción del riesgo ante sequías de la Municipalidad distrital de Pusi, 2021 al 2024*.
- Stoyanov, S. (2019). Saponins – natural surfactants with unique properties and functionality. *AMOLF*. Retrieved from <https://amolf.nl/events/saponins-natural-surfactants-with-unique-properties-and-functionality>
- Taherian, A., Yazdi, M., Danaei, I., & Zad, A. (2024). The effect of Triton X100 and Tween 80 surfactants on diesel removal from soil using electrokinetic remediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 1577-1590. doi:<http://doi.org/10.1007/s13762-024-05895-z>
- Tanase , A., Ionescu, R., Chiciudean, I., Vassu, T., & Stoica, I. (2013). Characterization of hydrocarbon-degrading bacterial strains isolated from oil-polluted soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 150-154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.05.022>
- Tevni Grajales, G. (2000). *Tipos de Investigacion*. Retrieved from <https://cursa.ihmc.us/rid=1RM1F0L42-VZ46F4-319H/Investigaci%C3%B3n.pdf>
- Timaná Insuasty, C. F. (2020). *Electrorremediación In Situ Aplicada a Suelos Contaminados por Hidrocarburos*. Universidad Estatal Península de Santa Elena, La libertad, Ecuador. Retrieved from <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/9001>
- Velasquez, T. (2021). Efecto remediador de extractos de *Sapindus saponaria* sobre un suelo contmainado con gasoil a nivel de laboratorio. *Ciencia & Desarrollo*.

- Viñas Canals, M. (2005). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica*. Universitat de Barcelona., Barcelona.
- Wen, D., Liu, H., Zhang, Y., & Fu , R. (2023). Electrokinetically-delivered persulfate and pulsed direct current electric field induced transport, mixing and thermally activated in situ for remediation of PAHs contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 444(130414). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130414>
- Wessels, K., & Dube, S. (2022). Effect of crop rotation and organic amendments on remediation of hydrocarbon-contaminated soils. *Journal of Environmental Management*(113806), 304. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113806>
- Wu, M., Ye , X., Chen, K., Li, W., Yuan, J., & Jiang, X. (2017). Bacterial community shift and hydrocarbon transformation during bioremediation of short-term petroleum-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 223, 657-664. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.079>

ANEXOS

Anexo 1

Informe del Análisis realizado por ALAB en la muestra de suelo obtenida del Pasivo Ambiental.



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-24-35231

N° Id.: 0000134894

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- | | |
|------------------|--|
| 1.- RAZON SOCIAL | : ANDREA CAMILA GONZALES BARREDA |
| 2.- DIRECCIÓN | : - |
| 3.- PROYECTO | : DISEÑO DE UN SISTEMA DE ELECTORREMEDIACIÓN PARA SUELOS DE UN PASIVO AMBIENTAL CONTAMINADO POR HIDROCARBUROS EN EL DISTRITO DE SAN MIGUEL - PUNO - PERÚ, 2024 |
| 4.- PROCEDENCIA | : JULIACA - PUNO |
| 5.- SOLICITANTE | : PAZ LABORATORIOS S.R.L. |
| 6.- PRODUCTO | : Suelos |

II.- DATOS DEL SERVICIO

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1.- ORDEN DE SERVICIO N° | : 0000007118-2024-0000 |
| 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME | : 2024-12-05 |

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- | | |
|----------------------------|---|
| 1.- MUESTREO POR | : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA |
| 2.- NÚMERO DE MUESTRAS | : 1 |
| 3.- FECHA DE RECEPCIÓN | : 2024-11-22 |
| 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN | : En buen estado de conservación y preservación |
| 5.- PERÍODO DE ENSAYO | : 2024-11-22 al 2024-12-05 |

Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391



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

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 3

SEDE PRINCIPAL
Av. General Chaabla N° 1877,
Bellevista, Cusco.
Tel: (+511) 713 0786 / 713 0636
Cel: 977 516 675 / 937 112 379

SEDE ZARUMILLA
Proteccionero Zarumilla Mz D2 L13,
Bellevista, Cusco.
Cel: 977 516 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
C/O209 SIDOJA Mz. 6 L1 9,
Arequipa.
Tel: (+054) 616 843
Cel: 932 646 642

SEDE PIURA
Lto. San Isidro II Etapa
Mz. D3 L1 02,
Castilla - Piura.
Tel: (+01) 723 0836
Cel: 919 475 133

SEDE TUMBILLO
Lto. San José Trujillo Mz. A L1 28,
Alto Salaverry - Tumbillo
Tel: (+01) 713 0636
Cel: 919 479 133

www.alab.com.pe



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-24-35231

N° Id.: 0000134894

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 1 (C6 - C10)	EPA Method 8015 C, Rev. 3. 2007.	Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography.	INACAL LE - 096 CHALACA
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 2 (>C10-C28)	EPA Method 8015 C, Rev. 3. 2007.	Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography.	INACAL LE - 096 CHALACA
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 3 (>C28-C40)	EPA Method 8015 C, Rev. 3. 2007.	Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography.	INACAL LE - 096 CHALACA

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

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chálaca N° 1877,
Bellavista, Callao.
Telf.: (+51) 713 0756 / 713 0636
Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz D2 Lt 3,
Bellavista, Callao.
Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+564) 616 843
Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
Urb. San Isidro III Etapa
Mz. D3 Lt. 02,
Castillo - Piura
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133



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-24-35231

N° Id.: 0000134894

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-24-104275
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				MSH-01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0399202 N:8297416
PRODUCTO ^(A)				Suelos
SUB PRODUCTO ^(A)				Suelos
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				20-11-2024 14:20
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 1 (C6 - C10) (*)	mg/Kg MS	0,990	2,010	<2,010
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 2 (>C10-C28) (*)	mg/Kg MS	4,920	10,000	<10,000
Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción 3 (>C28-C40) (*)	mg/Kg MS	4,920	10,000	<10,000

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

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.

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág.3 de 3

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chelmsa N° 1877,
Bellavista, Callao.
Telf.: (+51) 713 0756 / 713 0636
Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
Protección Zaramilla Mz D2 L1 9,
Bellavista, Callao.
Cel.: 977 516 675 / 932 546 460

SEDE AREQUIPA
COOP SIDOR Mz. E L1 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 643
Cel.: 932 646 642

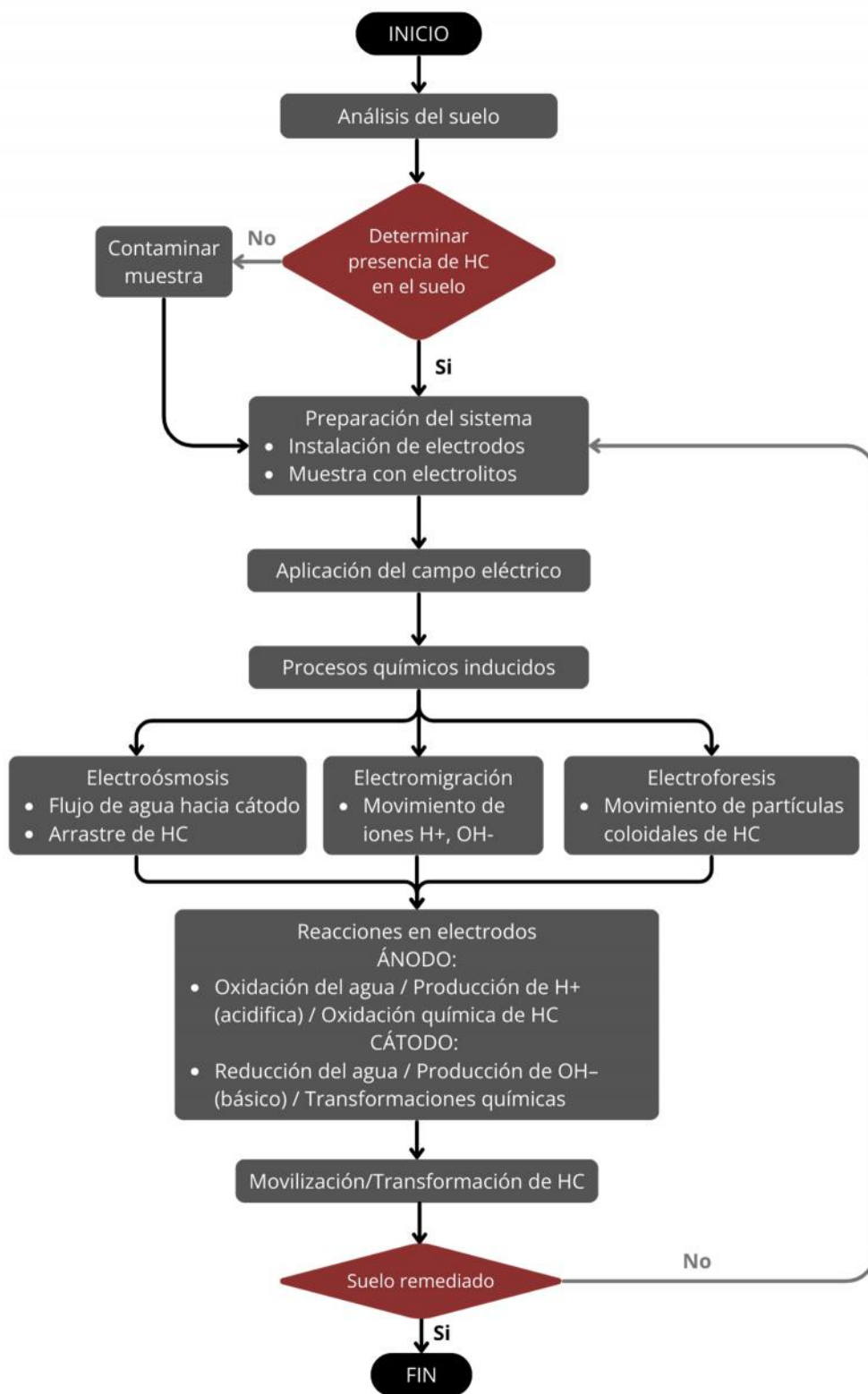
SEDE PIURA
Urb. San Isidro III Etapa
Mz. D3 L1 02,
Castilla - Piura
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A L1 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

www.alab.com.pe

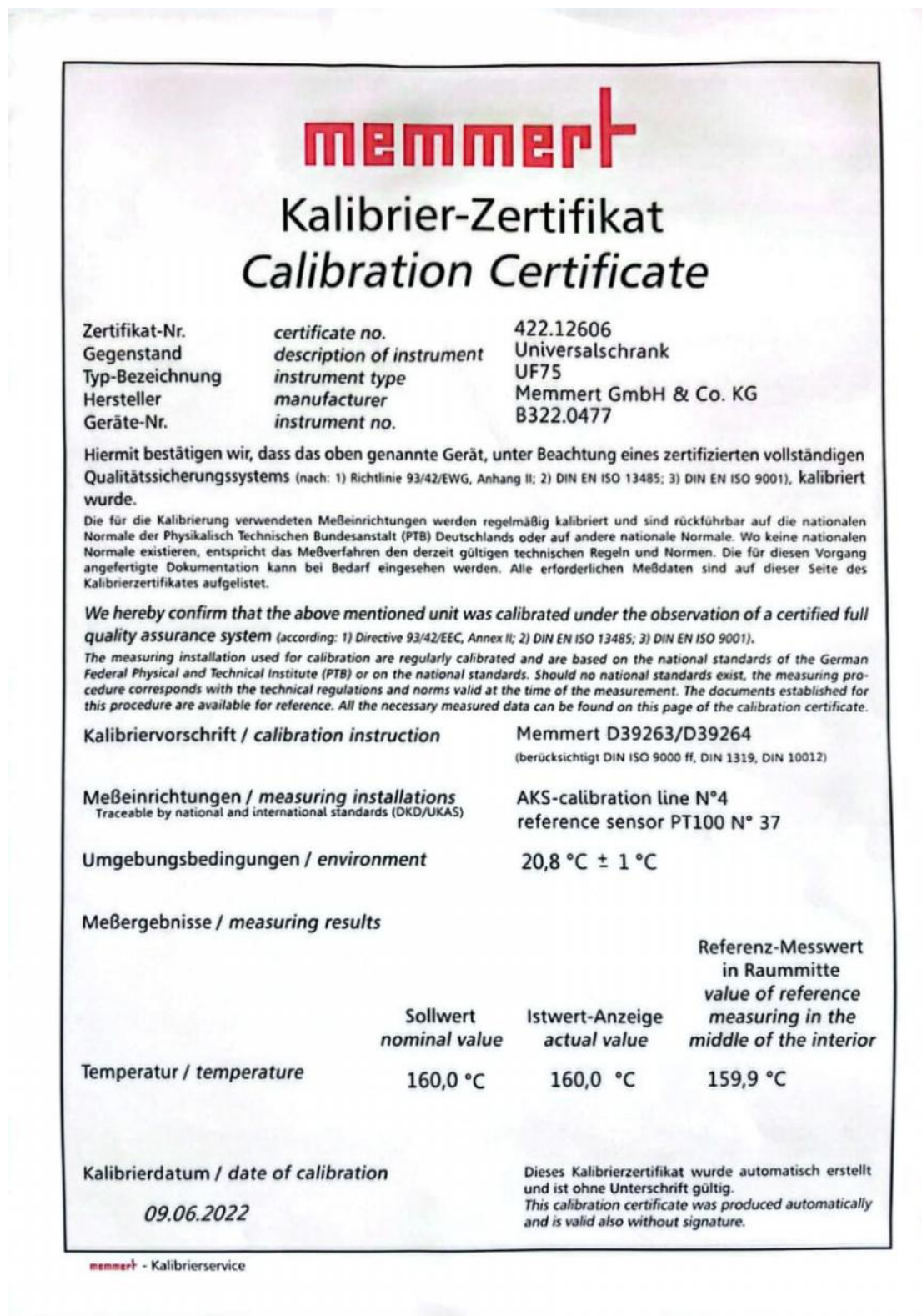
Anexo 2

Diagrama de flujo de los procesos químicos que ocurren en la electroremediación de las muestras de suelo contaminado por hidrocarburos



Anexo 3

Hojas de calibración de los equipos utilizados para la experimentación.



CS Escaneado con CamScanner

Production Test Report

Thermo Fisher Scientific certifies that this instrument conforms to, or exceeds, all Thermo Fisher Scientific's current factory test specifications listed below. Note that factory performance requirements are generally more demanding than the published guaranteed specifications found on our specification sheets and brochures.

Instrument: GENESYS 1XX UV-Visible Spectrophotometer
 Serial Number: 9ASA013005
 Test Conditions: 28.6°C 30%RH
 Performed by: Zhao Lian Date: 18-Jan-2022

Wavelength Accuracy¹ Specification: ±0.5nm

Expected Value	Measured Value	Difference
260.55nm	260.61nm	0.06nm
484.43nm	484.5nm	0.07nm
529.22nm	529.28nm	0.06nm
807.6nm	807.56nm	-0.04nm
823.16nm	823.16nm	0nm
979.97nm	979.93nm	-0.04nm

Wavelength Repeatability² Specification: < 0.2nm

Expected Value	Min. Measured	Max. Measured	Difference
529.22nm	529.19nm	529.33nm	0.14nm

Photometric Accuracy³ at 0.5A Specification: ±0.006A

	Expected Value	Measured Value
@280nm	0.506A	0.5066A
@465nm	0.5604A	0.5589A
@546.1nm	0.5926A	0.5914A
@635nm	0.6145A	0.613A

Photometric Accuracy³ at 1.0A Specification: ±0.0065A

	Expected Value	Measured Value
@280nm	0.9116A	0.9094A
@465nm	1.0134A	1.0107A
@546.1nm	1.0385A	1.0349A
@635nm	1.0495A	1.045A

Photometric Accuracy³ at 2.0A Specification: ±0.0119A

	Expected Value	Measured Value
@280nm	2.0971A	2.1032A
@465nm	2.0351A	2.0364A
@546.1nm	2.0214A	2.0222A
@635nm	1.9824A	1.983A

Photometric Accuracy³ at -1.0A Specification: ±0.0065A

	Expected Value	Measured Value
@465nm	-1.0134A	-1.0126A

Photometric Noise at 500nm⁴

Specification	Measured Value
<0.00025, 0A	0.00005A
<0.00050, 1A	0.00005A
<0.00080, 2A	0.00014A

Stray Light⁵

Specification	Measured Value
<1.0%T, 198nm	0.2679%T
<0.05%T, 220nm	0.0151%T
<0.05%T, 340nm	0.0252%T

Resolution⁶

Specification	Measured Value
>1.3	1.30

Baseline Flatness⁷

Specification	Measured Value
<0.0020	0.0005A

1. Wavelength Accuracy measured using five emission lines from the built-in xenon lamp.
2. Wavelength Repeatability measured as peak to peak difference of 10 measurements of an emission line from the built-in xenon lamp.
3. Photometric Accuracy measured using a calibrated Neutral Density Glass filter. Allowed tolerance is the sum of the calibration uncertainty and the instrument factory performance specification.
4. Photometric Noise is measured as RMS values at 500nm and calculated from 15 individual measurements.
5. Stray light is measured according to established industry practice using sealed solution at 198nm with 1.2% aqueous KCl at 198nm and cut-off filters at 220nm and 340nm.
6. Resolution measured using a Toluene in Hexane standard. The ratio of the minimum and maximum absorbance between 265 and 270 nm is reported.
7. Baseline flatness over the range of 200 to 1000 nm.

Thermo Fisher Scientific
 No. 1028, Jinan Road
 Pudong, Shanghai, 201206
 P.R. China

ThermoFisher
 SCIENTIFIC

Trademarks are the property of Thermo Fisher Scientific Inc. and its subsidiaries.

PN: 289-125000A

SERVICIO TÉCNICO DE EQUIPOS DE LABORATORIO-STEL, H-306					
CONSTANCIA DE CALIBRACIÓN Y AJUSTE		NP-CA-			
		FECHA:	23/04/2024		
EQUIPO: Balanza Analítica <input checked="" type="checkbox"/> Balanza de Precisión <input type="checkbox"/> Otros: _____ Capacidad: 320 g. Resolución: 0.1 mg		DATOS DEL LABORATORIO Laboratorio: O-407 Responsable: _____			
DATOS DEL EQUIPO Marca: KERN Modelo: ACJ 300 4M N° de serie: WB22AC0026 Código: 03005004352		SERVICIO: Limpieza técnica <input type="checkbox"/> Calibración <input checked="" type="checkbox"/> Ajuste <input checked="" type="checkbox"/> Otros: _____ Humedad: 45% Certificado Patrón: 8821887147 Temperatura: 19.0 °C Marca Patrón: Mettler Toledo-E2			
PRUEBAS DEL EQUIPO: Pruebas de repetibilidad					
	N°	Medidas a 10% de capacidad	Indicador de Ceros	Medidas a 100% de capacidad	Indicador de Ceros
1		100.0000	0.0000	200.0000	0.0000
2		99.9999	0.0000	199.9999	0.0000
3		99.9999	0.0000	200.0001	0.0000
4		99.9999	0.0000	199.9999	0.0000
5		99.9999	0.0000	199.9999	0.0000
6		99.9998	0.0000	199.9999	0.0000
7		99.9999	0.0000	199.9999	0.0000
8		99.9999	0.0000	199.9999	0.0000
9		100.0000	0.0000	199.9998	0.0000
10		99.9998	0.0000	199.9999	0.0000

Indicador de ceros operando correctamente		
SI	<input checked="" type="checkbox"/>	NO
	<input type="checkbox"/>	

	50%	100%
Media Aritmética	99.9999	199.9999
Desviación Estándar	0.000067	0.000079

Pruebas de excentricidad

Tolerancia admitida: ± 0.5 mg
 Peso aproximado 1/3 Cap. Max: 100 g
 Punto de referencia: E

Tipo de platillo:

	Medición	Desviación	Condición
A	99.9998	-0.0001	✓
B	99.9997	-0.0002	✓
C	99.9999	0.0000	✓
D	100.0001	0.0002	✓
E	99.9999	0.0000	✓

Pruebas de linealidad

Tolerancia Admitida: ± 0.3 mg

N°	Antes del ajuste		Después del ajuste	
	Peso Nominal	Valor Lectura	Valor de Lectura	Desvío
1	1	1.0003	0.9999	-0.0001
2	2	2.0009	2.0000	0.0000
3	5	5.0018	4.9999	-0.0001
4	10	10.0036	9.9999	-0.0001
5	20	20.0076	19.9999	-0.0001
6	50	50.0187	49.9999	-0.0001
7	100	100.0376	99.9999	-0.0001
8	200	200.0756	200.0001	0.0001

El Equipo, Balanza, se empleó masas de calibración clase E2, según la OIML.	Realizado por: Narciso Collanqui Gutiérrez Técnico electrónico de Equipos de Laboratorios
---	--



INFORME DE VERIFICACIÓN IV-014-2022

FECHA: 14/10/2022

1. EMPRESA : UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
DIRECCIÓN : Av. San Jeronimo Nro. - Urb. Umacollo - Arequipa

2. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : **MEDIDOR MULTIPARAMETRO**

MARCA : OHAUS ALCANCE : -2 a 16 pH
 MODELO : a-AB33PH-F DIVISIÓN / RESOLUCIÓN : 0.1/0.001 pH
 N° SERIE : C231543900 TIPO ANALOGICO/DIGITAL : DIGITAL
 ELECTRODO
 MODELO : ST310
 N° SERIE : 1231298
 UBICACIÓN DEL EQUIPO: Laboratorio - TECCIOS

3. RESULTADOS :

Condiciones ambientales durante la calibración:
 Temperatura (promedio): 22.5 HR% (promedio): 61%

1 punto de CAL (X) 2 puntos de CAL () 3 puntos de CAL ()

Buffer Patrón (pH)	Resultado de Ajuste (pH)	Tolerancia (± pH)	Lote Buffer	Slope % Pendiente
7.00	7.00	0.01	2GC169	100

4. OBSERVACIONES

Condición del electrodo

😊 Pendiente: más del 95%
 y compensación: ± (0-15) mV
 La condición del electrodo es buena

😐 Pendiente: 90-95%
 o compensación: ± (15-35) mV
 La condición del electrodo es aceptable

😞 Pendiente: menos del 90%
 o compensación: ± (>35) mV
 La condición del electrodo no es buena y necesita limpieza



Departamento Técnico
TECCIOS S.A.C

Nuevo Domicilio
Av. Naciones Unidas 1820
Lima, Lima, Lima.

TECCIOS SAC

Calle Antares 320 Torre B Oficina 409 Centro Empresarial el Nuevo Trigol
 Urb. La Albarada Surco (Lima-Perú) - Telef. 51 1 676 7076 - 51 1 448 7792
 www.teccios.com

Anexo 4

Certificado de calibración del HANNA EDGE

<p>Calibration Certificate</p> <p><i>This certificate guarantee that the product has been inspected and tested in accordance with the published specifications.</i></p> <p><i>The instrument has been calibrated by using equipment which already calibrated to standards traceable to international standards.</i></p> <p>Model: 7200</p> <p>Serial no.: _____</p> <p>Date _____</p> <p>P10</p>

Anexo 5

Guía de calibración para el Multiparámetro HANNA HI 9829

Nitrógeno-nitrato	
Rango	de 0,62 a 200,0 ppm Ni (como NO ₃ ⁻ -N)
Resolución	de 0,01 ppm a 1 ppm de 0,1 ppm a 200 ppm
Precisión	±5 % de la lectura o 2 ppm
Calibración	1 o 2 punto, 10 ppm y 100 ppm

PRESIÓN ATMOSFÉRICA	
Rango	de 450 a 850 mm Hg; de 17,72 a 33,46 en Hg; de 600,0 a 1133,2 mbar; de 8,702 a 16,436 psi; de 0,5921 a 1,1184 atm; de 60,00 a 113,32 kPa
Resolución	0,1 mm Hg; 0,01 en Hg; 0,1 mbar 0,001 psi; 0,0001 atm; 0,01 kPa
Precisión	±3 mm Hg en torno a ±15°C de la temperatura de calibración
Calibración	Automática a 1 punto personalizado

ESPECIFICACIONES DEL MEDIDOR	
Compensación de temperatura	Automático de -5 a 55 °C (de 23 a 131 °F)
Memoria de registro	44.000 registros (registro continuo o registro a solicitud de todos los parámetros)
Intervalo de registro	entre 1 segundo y 3 horas
Comunicación con PC	USB (con el software HI 929829)
Protección impermeable	IP67
Condiciones de medida	entre 0 y 50 °C (32 -122 °F); HR 100 %
Tipo de pilas	Cuatro pilas recargables de 1,2 V, NiMH tamaño C o cuatro pilas alcalinas de 1,5 V tamaño C
Duración de la pila	Ver más abajo
Peso y dimensiones	221 x 115 x 55 mm (8.7 x 4.5 x 2.2") / 750 g (26.5 oz.)
GPS	Receptor de 12 canales con una precisión de 10 metros (30 ft)

SALINIDAD

Rango	de 0,00 a 70,00 PSU
Resolución	0,01 PSU
Precisión	$\pm 2\%$ de la lectura o $\pm 0,01$ PSU (el que sea mayor)
Calibración	Basada en la calibración de conductividad

DENSIDAD SIGMA DE AGUA DE MAR

Rango	de 0,0 a 50,0 σ_t , σ_{20} , σ_{15}
Resolución	0,1 σ_t , σ_{20} , σ_{15}
Precisión	± 1 σ_t , σ_{20} , σ_{15}
Calibración	Basada en la conductividad o la calibración de la salinidad

TURBIDEZ

Rango	de 0,0 a 99,9 FNU; de 100 a 1000 FNU
Resolución	0,1 FNU de 0,0 a 99,9 FNU 1 FNU de 100 a 1000 FNU
Precisión	$\pm 0,3$ FNU o $\pm 2\%$ de la lectura (la que sea mayor)
Calibración	Automática en 1, 2 o 3 puntos a 0, 20 y 200 FNU, o personalizada

ISE

Nitrógeno-amonio

Rango	de 0,02 a 200,0 ppm Am (como NH_4^+ -N)
Resolución	de 0,01 ppm a 1 ppm de 0,1 ppm a 200,0 ppm
Precisión	$\pm 5\%$ de la lectura o 2 ppm
Calibración	1 o 2 punto, 10 ppm y 100 ppm

Cloruro

Rango	entre 0,6 y 200,0 ppm Cl (en forma de Cl^-)
Resolución	de 0,01 ppm a 1 ppm de 0,1 ppm a 200,0 ppm
Precisión	$\pm 5\%$ de la lectura o 2 ppm
Calibración	1 o 2 punto, 10 ppm y 100 ppm

CONDUCTIVIDAD

Rango	entre 0 y 200 mS/cm (CE absoluta hasta 400 mS/cm)
Resolución	
Manual	1 μ S/cm; 0,001 mS/cm; 0,01 mS/cm; 0,1 mS/cm; 1 mS/cm
Automática	1 μ S/cm de 0 a 9999 μ S/cm 0,01 mS/cm de 10,00 a 99,99 mS/cm 0,1 mS/cm de 100,0 a 400,0 mS/cm
Automática (mS/cm)	0,001 mS/cm de 0,000 a 9,999 mS/cm 0,01 mS/cm de 10,00 a 99,99 mS/cm 0,1 mS/cm de 100,0 a 400,0 mS/cm
Precisión	± 1 % de la lectura o ± 1 μ S/cm (el que sea mayor)
Calibración	Punto único automático, con 6 soluciones patrón (84 μ S/cm, 1413 μ S/cm, 5,00 mS/cm, 12,88 mS/cm, 80,0 mS/cm, 111,8 mS/cm) o punto personalizado

RESISTIVIDAD

Rango (dependiendo de la configuración de medición)	de 0 a 999999 Ω -cm; de 0 a 1000,0 k Ω -cm; de 0 a 1,0000 M Ω -cm
Resolución	Dependiendo de la lectura de resistividad
Calibración	Basada en la conductividad o la calibración de la salinidad

TDS (sólidos totales disueltos)

Rango	de 0 a 400000 ppm (mg/L); (el valor máximo depende del factor de TDS)
Resolución	
Manual	1 ppm (mg/L); 0,001 ppt (g/L); 0,01 ppt (g/L); 0,1 ppt (g/L); 1 ppt (g/L)
Automática	1 ppm (mg/L) de 0 a 9999 ppm (mg/L) 0,01 ppt (g/L) de 10,00 a 99,99 ppt (g/L) 0,1 ppt (g/L) de 100,0 a 400,0 ppt (g/L)
Automática ppt (g/L)	0,001 ppt (g/L) de 0,000 a 9,999 ppt (g/L) 0,01 ppt (g/L) de 10,00 a 99,99 ppt (g/L) 0,1 ppt (g/L) de 100,0 a 400,0 ppt (g/L)
Precisión	± 1 % de la lectura o ± 1 ppm (mg/L) (el que sea mayor)
Calibración	Basada en la conductividad o la calibración de la salinidad

Capítulo 3: ESPECIFICACIONES

3.1 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

TEMPERATURA

Rango	de -5,00 a 55,00 °C; de 23,00 a 131,00 °F; de 268,15 a 328,15 K
Resolución	0,01 °C; 0,01 °F; 0,01 K
Precisión	± 0,15 °C; ± 0,27 °F; ± 0,15 K
Calibración	Automática a 1 punto personalizado

pH/mV

Rango	de 0,00 a 14,00 pH; ± 600,0 mV
Resolución	0,01 pH; 0,1 mV
Precisión	± 0,02 pH; ± 0,5 mV
Calibración	Automático en 1, 2 o 3 puntos con reconocimiento automático de tampones estándar (pH 4,01, 6,86, 7,01, 9,18, 10,01) y un tampón de usuario

POTENCIAL REDOX

Rango	± 2000,0 mV
Resolución	0,1 mV
Precisión	± 1,0 mV
Calibración	Automática a 1 punto personalizado (mV relativo)

OXÍGENO DISUELTO

Rango	de 0,0 a 500,0 % de 0,00 a 50,00 ppm (mg/L)
Resolución	0,1 % 0,01 ppm (mg/L)
Precisión	de 0,0 a 300,0 %: ± 1,5 % de la lectura o ± 1,0 % (el que sea más alto); de 300,0 a 500,0 %: ± 3 % de la lectura de 0,00 a 30,00 ppm (mg/L): ± 1,5 % de la lectura o ± 0,10 ppm (mg/L) (el que sea más alto); de 30,00 ppm (mg/L) a 50,00 ppm (mg/L): ± 3 % de la lectura
Calibración	Automática a 1 o 2 puntos a 0, 100 % o 1 punto personalizado

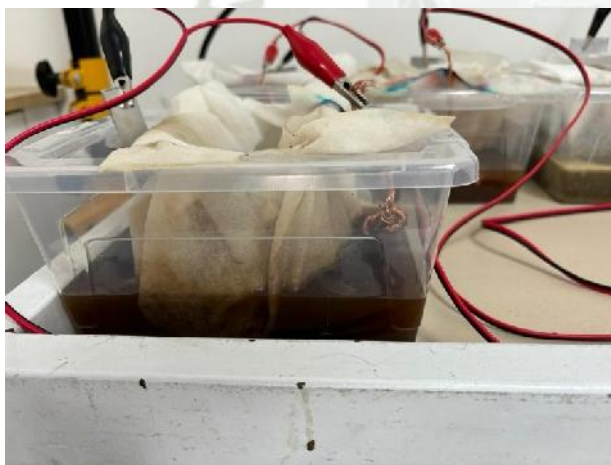
Anexo 6

Armado de las celdas y funcionamiento.



Anexo 7

Montaje del sistema de electro remediación



Anexo 8

Registro de parámetros electroquímicos en una de las soluciones mediante un multiparámetro HANNA HI 9829.



Anexo 9

Medición del pH y Temperatura en una de las muestras luego de aplicada la remediación utilizando un potenciómetro HANNA Edge.



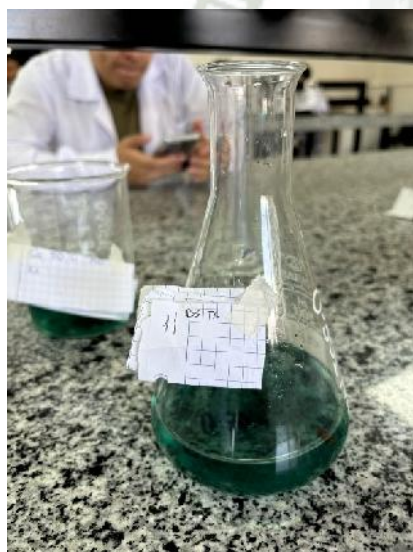
Anexo 10

Celdas Tipo B-KER preparadas con distintas combinaciones para los ensayos.



Anexo 11

Preparación de muestras para el análisis de HC (Matraz Erlenmeyer con muestra de extracto obtenido del suelo contaminado)



Anexo 12

Acondicionamiento del suelo contaminado individualmente correspondientes a los tratamientos T1, T2, T3 y T4

