



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

**Diseño de un reactor de lavado con surfactantes naturales para la
recuperación de petróleo crudo en suelos contaminados**

Tesis presentada por:

Arocutipa Chamana, Lucero Katrina

ORCID: 0009-0004-8115-2977

Velasquez Ccapa, Geraldine

ORCID: 0009-0003-3679-6717

para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesora:

Mg. Campos Olazaval, Lizbeth Marianella

ORCID: 0000-0002-4272-6948

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 03 de Julio del 2026

Dictamen: 017213-C-EPIA-2026

Visto el borrador del expediente 017213, presentado por:

2018220462 - AROCUTIPA CHAMANA LUCERO KATRINA

2019152012 - VELASQUEZ CCAPA GERALDINE

Titulado:

**DISEÑO DE UN REACTOR DE LAVADO CON SURFACTANTES NATURALES PARA LA
RECUPERACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO EN SUELOS CONTAMINADOS**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO AMBIENTAL

**29727348 - LAZARTE ARREDONDO SONIA
DICTAMINADOR**



**43238145 - BENEGAS LLANOS ROSARIO CAROLINA
DICTAMINADOR**



**72384055 - MEDINA RAMOS ROBERT JOAQUIN
DICTAMINADOR**



DISEÑO DE UN REACTOR DE LAVADO CON SURFACTANTES NATURALES PARA LA RECUPERACIÓN PETRÓLEO CRUDO EN SUELOS CONTAMINADOS

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1 Submitted to Universidad Católica de Santa María
Trabajo del estudiante

2 repositorio.ucsm.edu.pe
Fuente de Internet

3 www.coursehero.com
Fuente de Internet

4 hdl.handle.net
Fuente de Internet

5 repositorio.unjbg.edu.pe
Fuente de Internet

6 pastel.hal.science
Fuente de Internet

7 repositorio.ucv.edu.pe
Fuente de Internet

8 dokumen.pub
Fuente de Internet

9 editorialparmenia.com.mx
Fuente de Internet

10 revistajrg.com
Fuente de Internet

11 www.researchgate.net
Fuente de Internet

12 cards.algoreducation.com
Fuente de Internet

13 repositorio.uap.edu.pe
Fuente de Internet

14 repositorio.unaj.edu.pe
Fuente de Internet

stutzartists.org

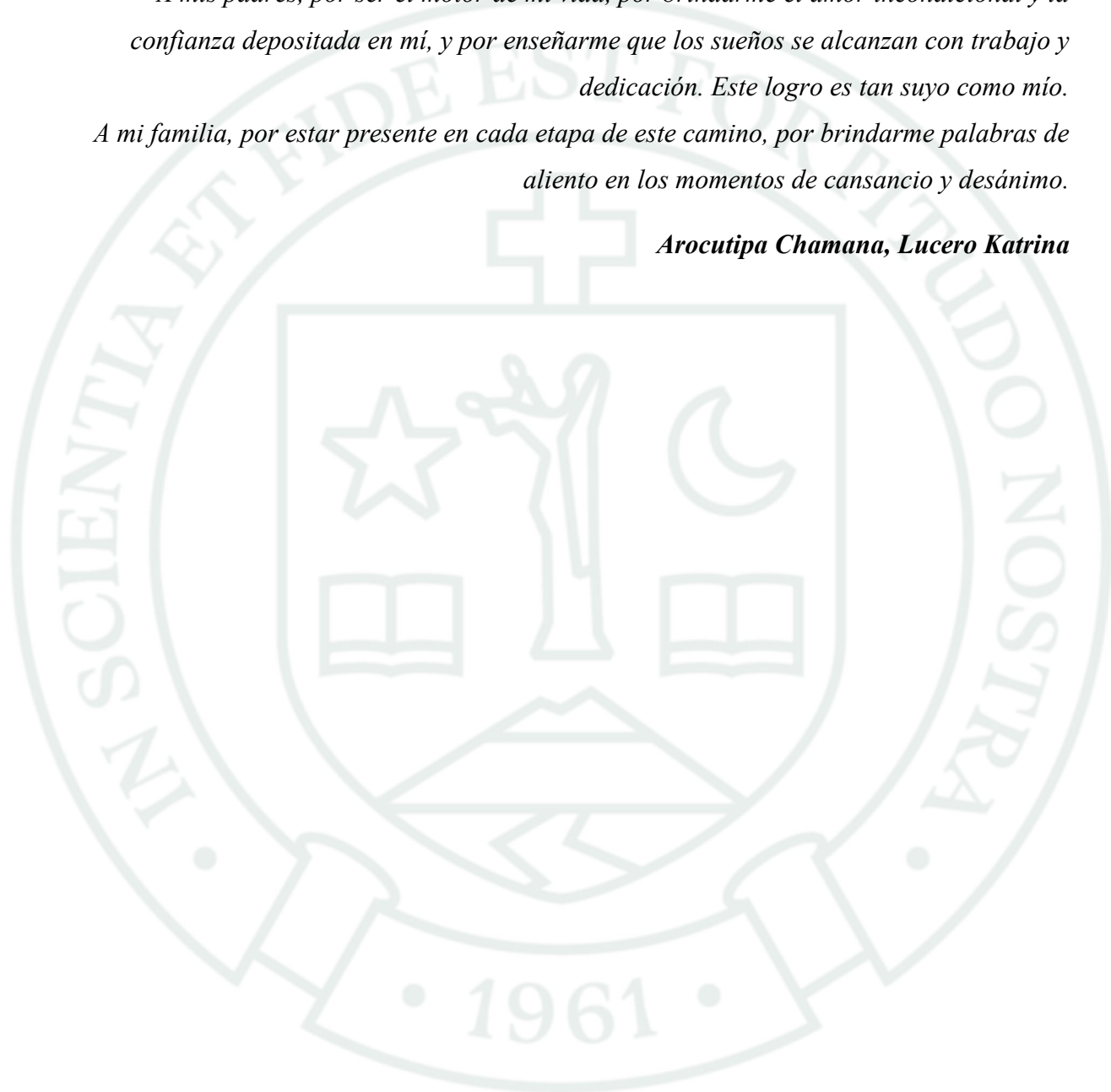
Dedicatoria

A Dios por sostenerme en los momentos de mayor dificultad, por darme la fortaleza para levantarme después de cada obstáculo y por recordarme que, con fe y perseverancia, todo esfuerzo tiene su recompensa.

A mis padres, por ser el motor de mi vida, por brindarme el amor incondicional y la confianza depositada en mí, y por enseñarme que los sueños se alcanzan con trabajo y dedicación. Este logro es tan suyo como mío.

A mi familia, por estar presente en cada etapa de este camino, por brindarme palabras de aliento en los momentos de cansancio y desánimo.

Arocutipa Chamana, Lucero Katrina



Dedicatoria

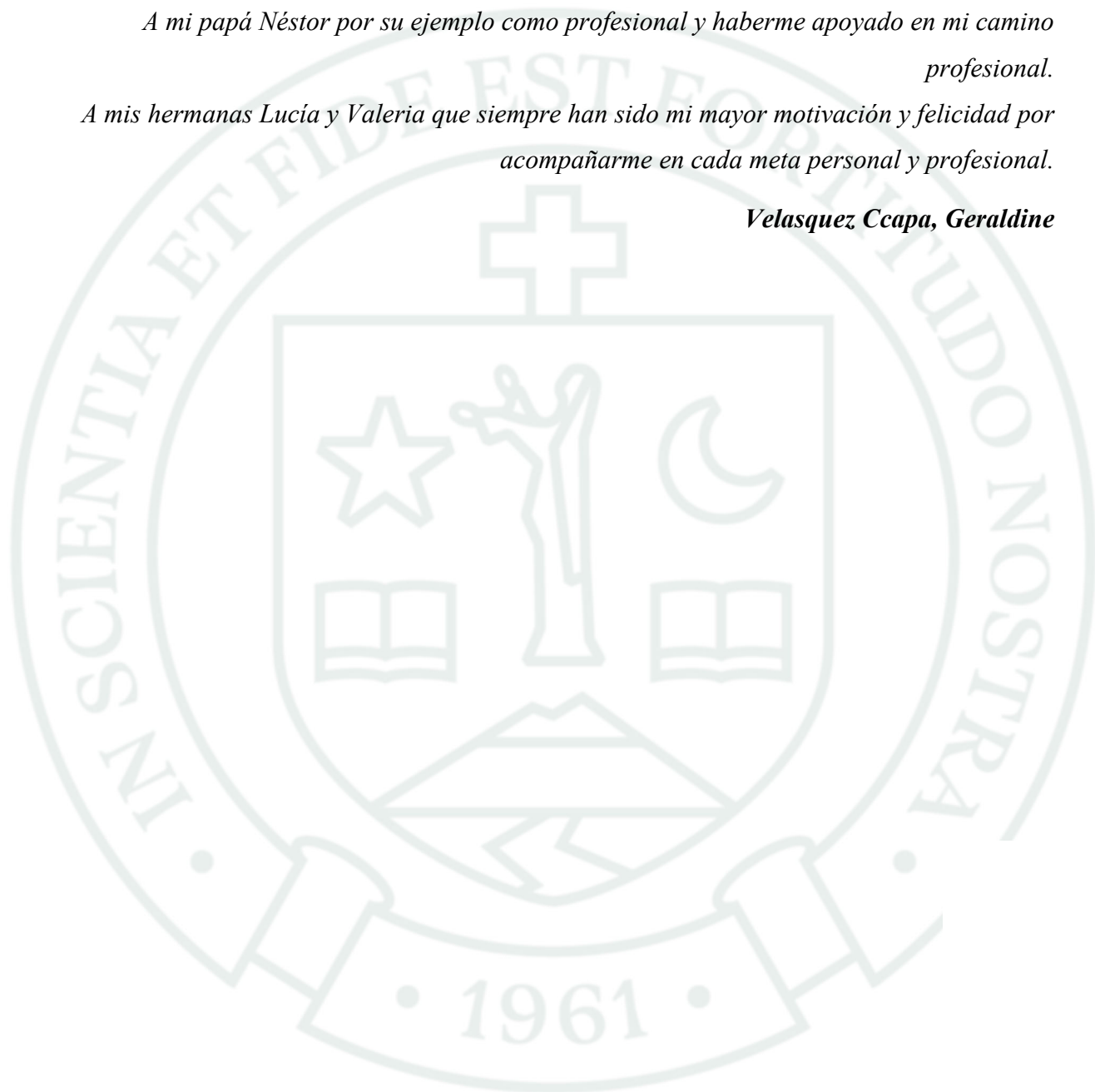
A Dios por guiarme en cada etapa de mi vida personal, universitaria y profesional.

A mi familia, mi mamá Edith a quien admiro mucho, por brindarme su amor y apoyo incondicional para lograr cada propósito en mi vida.

A mi papá Néstor por su ejemplo como profesional y haberme apoyado en mi camino profesional.

A mis hermanas Lucía y Valeria que siempre han sido mi mayor motivación y felicidad por acompañarme en cada meta personal y profesional.

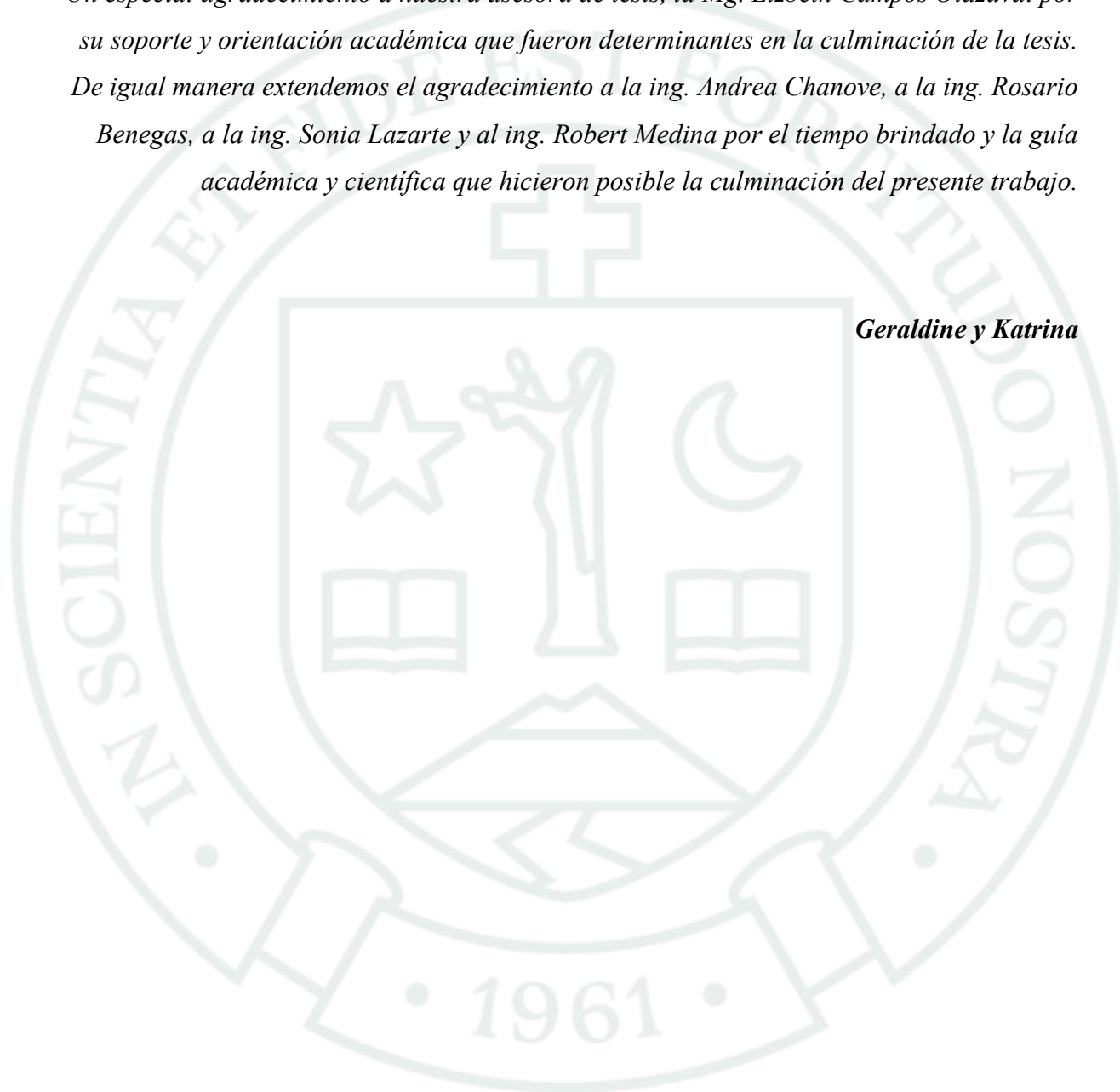
Velasquez Ccapa, Geraldine



Agradecimientos

A la Universidad Católica de Santa María, por contar con un excelente equipo de profesionales, académicos e instalaciones que nos han permitido alcanzar una destacada formación universitaria y finalmente lograr este trabajo para obtener el título profesional. Un especial agradecimiento a nuestra asesora de tesis, la Mg. Lizbeth Campos Olazaval por su soporte y orientación académica que fueron determinantes en la culminación de la tesis. De igual manera extendemos el agradecimiento a la ing. Andrea Chanove, a la ing. Rosario Benegas, a la ing. Sonia Lazarte y al ing. Robert Medina por el tiempo brindado y la guía académica y científica que hicieron posible la culminación del presente trabajo.

Geraldine y Katrina



RESUMEN

La contaminación recurrente por derrames de petróleo en la Amazonía peruana exige el desarrollo de soluciones de remediación eficientes, dado que los métodos convencionales son insuficientes para crudos extrapesados. Esta investigación tuvo como objetivo principal diseñar y validar un reactor de lavado tipo batch a escala de laboratorio, utilizando una sinergia de agentes naturales (sustancias húmicas como surfactante y D-limoneno como biosolvente) para la recuperación de crudo en suelos contaminados. La metodología inició con la caracterización de un escenario de alta dificultad, simulando un suelo amazónico (pH 5,62, 34% arcilla) contaminado al 13,06 % HTP con crudo extrapesado (24.027 cP).

Posteriormente, se implementó un Diseño Factorial Completo 2^4 para optimizar el proceso. El Análisis de Varianza (ANOVA) reveló que los cuatro factores (Cantidad de Surfactante, Tiempo de Agitación, Tiempo de Centrifugación y Cantidad de Limoneno) fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$). El hallazgo más relevante fue la identificación de una fuerte interacción sinérgica ($A * D$) entre las sustancias húmicas y el D-limoneno, demostrando que ambos agentes se potencian mutuamente. Las condiciones óptimas identificadas (1.000 mL de surfactante, 60 min de agitación, 15 min de centrifugación y 6 mL de limoneno) se utilizaron para el diseño de un prototipo de 2,5 L con turbina Rushton y baffles, calculado para operar en régimen de transición ($Re = 49,33$) a escala de laboratorio, donde el cizallamiento mecánico local promueve la separación. Finalmente, la validación del reactor en triplicado demostró una alta eficiencia de remoción promedio de 86,03% ($DE=0,306$), superando la meta de validación del 50%. Se concluye que el sistema diseñado es una solución tecnológicamente viable, reproducible y altamente eficiente para el tratamiento de suelos impactados por crudo extrapesado.

Palabras Clave: Remediación de Suelos, Surfactantes Naturales, Reactor Batch.

ABSTRACT

Recurrent contamination from oil spills in the Peruvian Amazon demands the development of efficient remediation solutions, given that conventional methods are insufficient for extra-heavy crude oils. This research's main objective was to design and validate a lab-scale batch washing reactor, utilizing a synergy of natural agents (humic substances as a surfactant and D-limonene as a biosolvent) for crude oil recovery in contaminated soils. The methodology began with the characterization of a high-difficulty scenario, simulating an Amazonian soil (pH 5,62, 34% clay) contaminated to 13,06% TPH with extra-heavy crude oil (24.027 cP).

Subsequently, a 2⁴ Full Factorial Design was implemented to optimize the process. The Analysis of Variance (ANOVA) revealed that the four factors (Surfactant Amount, Agitation Time, Centrifugation Time, and D-Limonene Amount) were statistically significant ($p < 0,05$). The most relevant finding was the identification of a strong synergistic interaction (A*D) between humic substances and D-limonene, demonstrating that both agents mutually enhance each other's performance. The identified optimal conditions (1.000 mL surfactant, 60 min agitation, 15 min centrifugation, and 6 mL D-limonene) were used to design a 2,5 L prototype featuring a Rushton turbine and baffles, calculated to operate in a transitional regime ($Re = 49.33$) at laboratory scale, driven by localized mechanical shear. Finally, the reactor validation in triplicate demonstrated a high average removal efficiency of 86,03% (SD=0,306), significantly exceeding the 50% validation target. It is concluded that the designed system is a technologically viable, reproducible, and highly efficient solution for the treatment of soils impacted by extra-heavy crude oil.

Keywords: Soil Remediation, Natural Surfactants, Batch Reactor.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 3

1.1. Descripción de la Realidad Problemática..... 3

1.2. Formulación del Problema 5

1.3. Justificación de la investigación..... 5

1.3.1. Justificación Ambiental 5

1.3.2. Justificación Social 6

1.3.3. Justificación Económica 6

1.3.4. Justificación Técnico-Científica 7

1.4. Hipótesis..... 7

1.5. Objetivo de la Investigación..... 8

1.6. Variables e indicadores 9

CAPÍTULO II 10

2. FUNDAMENTO TEÓRICO..... 10

2.1. Antecedentes de la Investigación 10

2.2. Bases Teóricas..... 13

2.2.1. Contaminación de Suelos por Hidrocarburos de Petróleo..... 13

2.2.2. Panorama de las Tecnologías de Remediación de Suelos	17
2.2.3. El Lavado de Suelos (Soil Washing) como Estrategia de Tratamiento.....	21
2.2.4. Principios de Ingeniería para el Diseño del Sistema	25
2.2.5. Optimización de Procesos mediante Diseño Experimental.....	29
CAPÍTULO III.....	32
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
3.1. Tipo y Nivel de Investigación	32
3.2.1. Análisis de Incertidumbre y Propagación de Errores Experimentales	33
3.3. Métodos de Investigación	34
3.3.1. Materiales y Equipos	34
3.3.2. Procedimiento Experimental	36
CAPÍTULO IV.....	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1. Resultados del Objetivo Específico 1.....	54
4.1.1. Caracterización del Sustrato de Suelo Simulado.....	54
4.1.2. Caracterización del Contaminante.....	56
4.1.3. Verificación de la Línea Base de Contaminación	57
4.2. Resultados del Objetivo Específico 2.....	59
4.2.1. Análisis de Varianza (ANOVA).....	61
4.2.2. Validación de Supuestos del Modelo	63
4.2.3. Análisis Gráfico de Efectos	65
4.2.4. Determinación de las Condiciones Operativas Óptimas	70
4.3. Resultados del Objetivo Específico 3.....	71
4.3.1. Criterios de Diseño del Prototipo	72

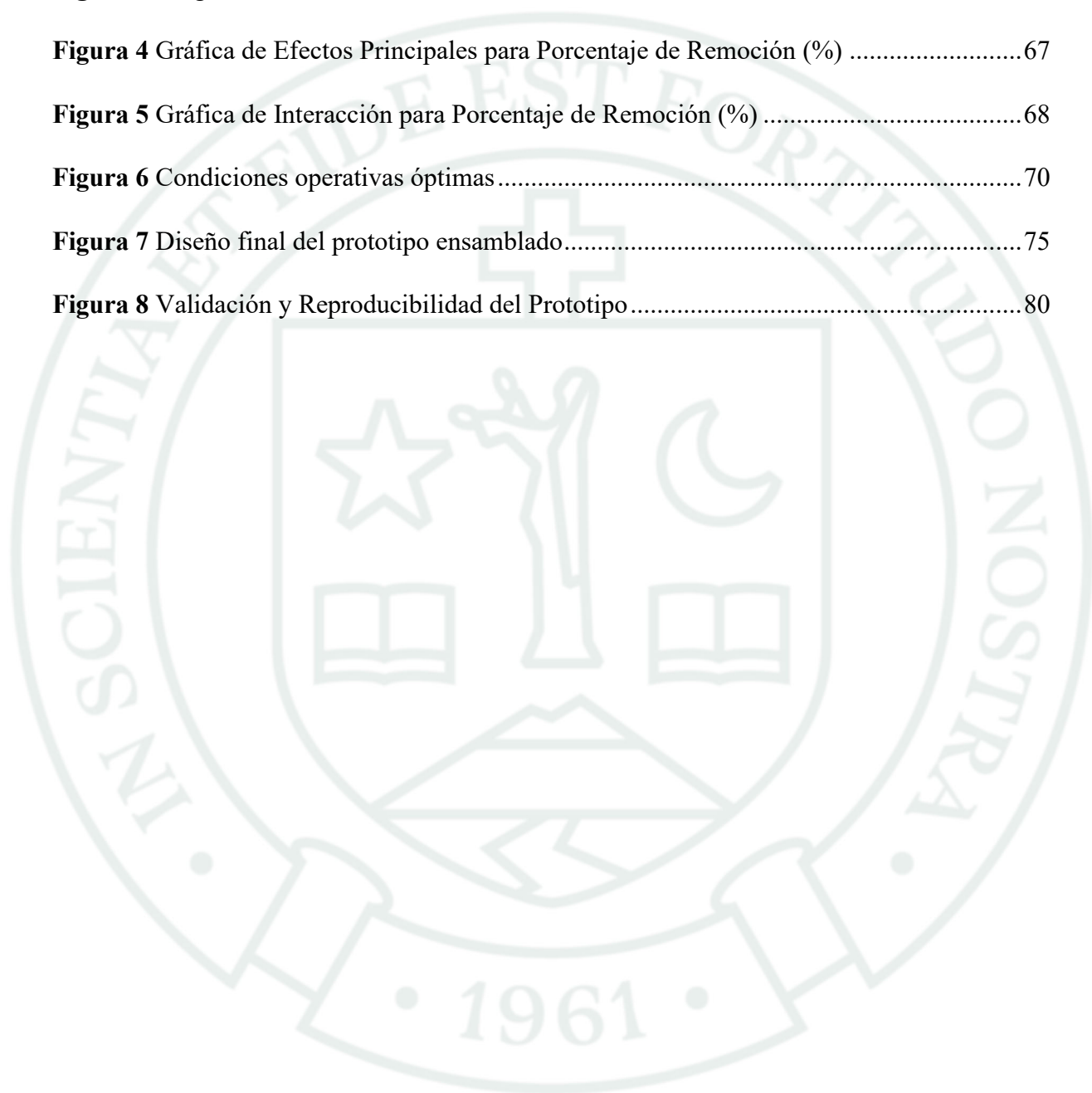
4.3.2. Cálculos de Ingeniería y Dimensionamiento.....	73
4.3.3. Diseño Final y Especificaciones del Prototipo Ensamblado	75
4.4. Resultados del Objetivo Específico 4.....	77
4.4.1. Pruebas de Rendimiento y Validación Técnica.....	77
4.5. Análisis de Viabilidad Técnica y Económica	83
4.5.1. Propuesta de Gestión y Tren de Tratamiento de los Efluentes Líquidos del Reactor	85
CAPÍTULO V.....	87
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
5.1. Conclusiones	87
5.2. Recomendaciones.....	88
REFERENCIAS.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de Variables	9
Tabla 2 Tabla de Identificación del Tipo, Nivel, Diseño y Enfoque de la Investigación	34
Tabla 3 Matriz de Corridas para el Diseño Factorial Completo 2^4	42
Tabla 4 Caracterización Fisicoquímica del Sustrato de Suelo Simulado	54
Tabla 5 Propiedades Fisicoquímicas del Crudo de Petróleo Extrapesado (a 20 °C)	56
Tabla 6 Verificación de la Contaminación Inicial de HTP en el Suelo Simulado.....	58
Tabla 7 Matriz Integrada de Corridas Experimentales del Diseño Factorial 2^4 y Eficiencias de Remoción de HTP	60
Tabla 8 Análisis de Varianza (ANOVA) para el Porcentaje de Remoción	61
Tabla 9 Criterios de Diseño Operativos para el Reactor.....	72
Tabla 10 Resultados de los Cálculos de Dimensionamiento del Reactor	73
Tabla 11 Especificaciones Técnicas (Lista de Materiales) del Prototipo Ensamblado.....	75
Tabla 12 Resultados de las Pruebas de Rendimiento del Reactor Prototipo (n=3)	78
Tabla 13 Concentraciones de HTP Pre y Post-Tratamiento en la Fase de Validación	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación textural del sustrato de suelo simulado en el triángulo USDA	38
Figura 2 Figuras de Residuos para Porcentaje de Remoción (%).....	64
Figura 3 Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados	65
Figura 4 Gráfica de Efectos Principales para Porcentaje de Remoción (%)	67
Figura 5 Gráfica de Interacción para Porcentaje de Remoción (%)	68
Figura 6 Condiciones operativas óptimas	70
Figura 7 Diseño final del prototipo ensamblado.....	75
Figura 8 Validación y Reproducibilidad del Prototipo	80



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Anexo Fotográfico 107

Anexo 2. Anexo de informes..... 113



INTRODUCCIÓN

El petróleo se erige como un recurso de importancia estratégica indiscutible en la sociedad moderna, cuya función trasciende la simple generación de energía, siendo fundamental en la cadena de producción de innumerables bienes de consumo. No obstante, esta profunda dependencia global está marcada por un riesgo ambiental constante, manifestado en los derrames accidentales de hidrocarburos. La nación peruana, con su extraordinaria y frágil Amazonía, se encuentra particularmente expuesta a esta amenaza, donde las actividades de exploración y explotación petrolera representan un peligro directo para su biodiversidad. La situación se agrava en la selva, con un alarmante 78% del territorio superpuesto con concesiones, y con infraestructuras de transporte, como los oleoductos, que han sido el epicentro de la crisis, siendo la causa del 65% de los 474 derrames ocurridos entre 2000 y 2019, atribuidos a problemas de corrosión y deficiencia operativa.

Las consecuencias de estos continuos desastres son profundas y multifacéticas, afectando la salud, la seguridad alimentaria y la economía local. El crudo derramado contamina cuerpos de agua vitales, disminuye drásticamente la población de peces y destruye la base económica de las comunidades. En el ámbito de la salud pública, la exposición crónica se ha relacionado con un incremento en afecciones dermatológicas, respiratorias y gastrointestinales, una crisis magnificada por la precaria capacidad de los servicios de salud en la región. Frente a esta abrumadora realidad, las metodologías de remediación convencionales han demostrado ser insuficientes, presentando baja eficiencia para crudos extrapesados, generando riesgo de contaminación secundaria y conllevando costos operativos elevados. Incluso alternativas más benignas, como la biorremediación, tienen limitaciones por su lenta velocidad de acción en las condiciones del trópico húmedo. Esta brecha tecnológica evidencia la necesidad impostergable de desarrollar soluciones de ingeniería innovadoras, eficientes y sostenibles.

La presente tesis aborda esta problemática mediante el Diseño de un Reactor de Lavado con Surfactantes Naturales para la Recuperación de Petróleo Crudo en Suelos Contaminados. El objetivo general fue diseñar un reactor a escala de laboratorio para la recuperación eficiente del crudo mediante un proceso optimizado de lavado con agentes naturales. La metodología se centró en simular un escenario de alta dificultad un suelo amazónico ácido y de alta arcilla (34%) contaminado con crudo extrapesado (24.027 cP) y en optimizar el proceso mediante un Diseño Factorial Completo 2^4 . Este diseño permitió determinar la combinación óptima de

factores (Cantidad de Surfactante, Tiempo de Agitación, Tiempo de Centrifugación y Cantidad de Limoneno) y, crucialmente, identificar las interacciones sinérgicas entre ellos.

El Análisis de Varianza (ANOVA) reveló que todos los factores principales fueron estadísticamente significativos, destacando el hallazgo de una fuerte interacción sinérgica (A*D) entre las sustancias húmicas y el D-limoneno, un mecanismo que valida la solución dual al combinar la acción tensioactiva con la fluidificación del crudo. Las condiciones óptimas resultantes (1.000 mL de surfactante, 60 min de agitación, 15 min de centrifugación y 6 mL de limoneno) se emplearon para el diseño de un prototipo de 2,5 L con turbina Rushton y baffles, operando en régimen de transición ($Re = 49,33$) a escala de laboratorio. La validación del reactor funcional en triplicado demostró una alta y reproducible eficiencia de remoción promedio del 86,03%, superando la meta del 50%. Se concluye que el sistema diseñado es una solución tecnológicamente viable, reproducible y altamente eficiente para el tratamiento de suelos impactados por crudo extrapesado.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la Realidad Problemática

En el complejo entramado de la sociedad moderna, el petróleo se erige como un recurso de importancia estratégica indiscutible, cuyo alcance va mucho más allá de su función como simple generador de energía. De hecho, como detallan Zhang et al. (2024), su presencia es fundamental en la cadena de producción de innumerables bienes de consumo que definen nuestro estilo de vida contemporáneo. No obstante, esta profunda dependencia global viene acompañada de una contraparte sombría, ya que todo el ciclo productivo del crudo, desde las complejas operaciones de extracción hasta su masivo transporte transcontinental, está marcado por un riesgo ambiental inherente y constante. En este contexto, Yusta-García et al. (2017) subrayan que cada fase del proceso representa una amenaza latente para la integridad de los ecosistemas, siendo los derrames accidentales de hidrocarburos la manifestación más visible y devastadora de esta vulnerabilidad sistémica.

Investigaciones de escala espacial desarrolladas por Yusta-García et al. (2017) advierten que las actividades de extracción y los derrames de petróleo contaminan de manera extensiva los ríos y sedimentos del norte del Perú, propagando los impactos ambientales mucho más allá de los límites geográficos de las concesiones e introduciendo un riesgo persistente para la fauna silvestre durante décadas. Como consecuencia de ello, Azevedo-Santos et al. (2016) documentan un marcado declive en la biodiversidad acuática posterior a los vertidos, caracterizado por mortandades masivas de peces y una desestabilización estructural de las redes tróficas que puede prolongarse por años en los cuerpos de agua dulce amazónicos. Esta situación alcanza niveles de alta vulnerabilidad en la selva. Esta situación alcanza niveles críticos en la selva amazónica, un bioma donde, según investigaciones de Daga Salazar et al. (2021), un alarmante 78% del territorio se encuentra superpuesto con concesiones de hidrocarburos, colocando en jaque a ecosistemas de importancia global. Las infraestructuras de transporte de crudo en la Amazonía, como los oleoductos, se han convertido lamentablemente en el epicentro de esta crisis ambiental. Estas infraestructuras, algunas con décadas de operación, presentan una larga historia de fallas que han desencadenado numerosas emergencias. Un informe exhaustivo citado por Sierra Praeli (2020) reveló que entre los años 2000 y 2019, la Amazonía peruana fue escenario de 474 derrames de petróleo, de los cuales un

preocupante 65% fue atribuido a problemas de corrosión y a una infraestructura operativa deficiente. Las consecuencias de estos continuos desastres son profundas y multifacéticas. El crudo derramado se propaga a través de cuerpos de agua vitales, contaminando el recurso hídrico del que dependen las comunidades para su subsistencia.

El impacto social es igualmente desolador, ya que, como explican Acuña Jara et al. (2021), la contaminación de los ríos disminuye drásticamente la población de peces, lo que no solo amenaza la seguridad alimentaria, sino que también destruye la base económica de las familias que dependen de la pesca artesanal. En el ámbito de la salud pública, la exposición crónica a los hidrocarburos representa un grave peligro. Investigaciones como la de Santa Cruz Sandoval y Balta Velarde (2024) han establecido una clara conexión entre el contacto con el crudo y un incremento en la incidencia de afecciones dermatológicas, respiratorias y gastrointestinales en la población local. Esta crisis sanitaria se ve magnificada por la precaria capacidad de los servicios de salud en la región, una deficiencia estructural que la Defensoría del Pueblo (2022) ha denunciado reiteradamente.

Frente a esta abrumadora realidad, las metodologías de remediación empleadas hasta ahora han demostrado ser claramente insuficientes. Li et al. (2022) argumentan que las tecnologías convencionales a menudo adolecen de baja eficiencia, conllevan el riesgo de generar contaminación secundaria y suponen costos operativos elevados. Incluso alternativas más benignas como la biorremediación presentan limitaciones determinantes en escenarios de contingencia; de acuerdo con Hazaimh y Ahmed (2021) así como Rehman y Abbasi (2023), la principal desventaja del tratamiento biológico radica en su velocidad de acción inherentemente lenta, lo que la vuelve ineficaz para satisfacer las demandas inmediatas de contención ante derrames agudos o de gran volumen antes de que el hidrocarburo impacte las líneas de costa o sature hábitats ecológicamente sensibles. Esta notable brecha tecnológica, reconocida por medios como Forbes Perú (2022), evidencia la necesidad impostergable de desarrollar e implementar soluciones de ingeniería que sean no solo innovadoras, sino también eficientes y sostenibles. Por consiguiente, el diseño de un reactor funcional para la recuperación de crudo en suelos contaminados emerge como una respuesta técnica indispensable para fortalecer la remediación ambiental y buscar una justicia social en una de las regiones más biodiversas y vulnerables del planeta.

1.2. Formulación del Problema

La problemática central de esta investigación se enmarca en la operación de los oleoductos que atraviesan la Amazonía peruana, activos de importancia crítica para el país que, sin embargo, se han convertido en una fuente persistente de contaminación ambiental y conflicto social. El problema fundamental radica en la alta y recurrente frecuencia de derrames de petróleo en esta región, donde se ha registrado que un 65% de los incidentes ocurridos entre los años 2000 y 2019 se debieron directamente a la corrosión y fallas en la infraestructura. Estos constantes vertidos de crudo no solo constituyen un desastre ecológico que degrada suelos y cuerpos de agua, sino que desencadenan una profunda crisis social y sanitaria que impacta de manera desproporcionada a las comunidades indígenas y rurales.

Las consecuencias de estos derrames son severas y multifactoriales. La exposición a los hidrocarburos está directamente relacionada con un incremento en la incidencia de enfermedades dermatológicas, respiratorias y gastrointestinales en la población. Esta vulnerabilidad sanitaria se ve agravada por las limitadas capacidades de la infraestructura de salud en la Amazonía para atender emergencias de esta índole. Adicionalmente, actividades de subsistencia como la pesca y la agricultura resultan directamente perjudicadas, lo que se traduce en una pérdida de la seguridad alimentaria y de los ingresos económicos para las familias locales.

Frente a esta crisis recurrente, los métodos de remediación convencionales aplicados han demostrado ser insuficientes y poco eficaces en las particulares condiciones ecológicas de la Amazonía peruana. Las estrategias como la contención mecánica y el uso de dispersantes químicos rara vez logran una descontaminación completa, dejando pasivos ambientales que perpetúan el daño al ecosistema. Esta brecha tecnológica y operativa evidencia la falta de una solución de ingeniería que sea sostenible, eficiente y adaptable a la realidad logística y ambiental de la región.

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. Justificación Ambiental

La presente investigación se justifica primordialmente por la urgente necesidad de mitigar el severo y persistente daño ecológico ocasionado por los derrames de petróleo de oleoductos en la Amazonía peruana. Cada uno de estos eventos libera crudo que contamina de

manera directa el suelo y los cuerpos de agua, alterando los ciclos ecológicos y reduciendo la biodiversidad local. Las tecnologías de remediación convencionales no solo han demostrado ser ineficaces en el complejo ecosistema amazónico, sino que a menudo presentan desventajas como la posibilidad de generar contaminación secundaria y un alto costo operativo. Este proyecto busca diseñar un reactor que no solo limpie el suelo afectado, sino que lo haga de una manera sostenible, minimizando el impacto ambiental del propio proceso de remediación. La recuperación de los ecosistemas afectados es crucial para preservar uno de los biomas más importantes del planeta.

1.3.2. Justificación Social

La relevancia social de este proyecto es innegable, ya que los derrames de hidrocarburos impactan directamente la salud, la seguridad alimentaria y los derechos fundamentales de las comunidades indígenas y rurales de la región. La exposición al crudo ya sea por contacto directo o por el consumo de agua y alimentos contaminados, está directamente relacionada con un incremento en enfermedades dermatológicas, respiratorias y gastrointestinales. Esta crisis sanitaria se ve agravada por la limitada infraestructura de salud en la Amazonía para atender emergencias de esta magnitud. Adicionalmente, actividades de subsistencia como la pesca y la agricultura, que son la base de la economía y cultura local, resultan gravemente afectadas. Al proponer una solución tecnológica que busca remediar la fuente de estos problemas, esta investigación contribuye directamente a la protección de la salud pública y a la restauración de los medios de vida de las poblaciones vulnerables.

1.3.3. Justificación Económica

Desde una perspectiva económica, el proyecto es relevante tanto a nivel local como nacional. La infraestructura de oleoductos en el país es un activo crítico, y sus fallas operativas no solo generan enormes costos de limpieza y remediación, sino también pérdidas económicas por la paralización de sus operaciones. A nivel local, la contaminación destruye las bases de las economías de subsistencia como la pesca y la agricultura, sumiendo a las comunidades en una mayor precariedad económica. El diseño de un reactor eficiente y potencialmente escalable ofrece una alternativa más rentable a largo plazo en comparación con los métodos tradicionales de alto costo. Además, al ser un sistema diseñado para recuperar el crudo derramado, se abre la posibilidad de revalorizar un producto que de otro modo se perdería, convirtiendo un pasivo ambiental en un activo recuperable y reduciendo así las pérdidas económicas totales.

La viabilidad económica de este prototipo se sustenta en la reducción de costos operativos a largo plazo. Al emplear agentes naturales biodegradables, se minimizan los gastos de post-tratamiento de efluentes y se evita la acumulación de pasivos ambientales que derivan en costosas sanciones por parte de organismos reguladores como la OEFA. Asimismo, la recuperación del 86,03% del crudo permite la revalorización de un recurso que, bajo métodos convencionales, se consideraría un residuo perdido.

1.3.4. Justificación Técnico-Científica

El sustento técnico y científico de esta investigación radica en la existencia de una brecha tecnológica significativa en el campo de la remediación de suelos en el contexto amazónico. Los métodos convencionales han fracasado repetidamente, demostrando que se requieren soluciones de ingeniería adaptadas a las condiciones específicas de la región, como la alta humedad y la remota ubicación geográfica. Este trabajo propone el diseño y la validación de un sistema novedoso (el reactor) que integra principios fisicoquímicos para la recuperación de crudo. La investigación no se limita a aplicar una técnica existente, sino que busca determinar las condiciones óptimas de operación a través de un diseño experimental riguroso. Los resultados generarán conocimiento original y aplicable sobre la remediación de suelos contaminados con crudo extrapesado, aportando datos valiosos al campo de la ingeniería ambiental.

1.4. Hipótesis

Se establece como hipótesis de investigación formal que la implementación de un reactor de lavado tipo batch, optimizado hidrodinámicamente mediante una turbina Rushton y baffles, bajo condiciones operativas controladas que maximizan la sinergia entre las sustancias húmicas (surfactante) y el D-limoneno (biosolvente), permite alcanzar una eficiencia de remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) estadísticamente superior al 80,00% en suelos de textura franco-arcillosa contaminados con crudo extrapesado.

1.5. Objetivo de la Investigación

Objetivo General

Diseñar un reactor a escala de laboratorio para la recuperación eficiente de crudo de petróleo en suelos contaminados, mediante un proceso optimizado de lavado con surfactantes naturales.

Objetivos Específicos

1. Simular las condiciones de un derrame de petróleo en suelo amazónico a escala de laboratorio, preparando y contaminando un sustrato representativo
2. Determinar las condiciones operativas óptimas (concentración de surfactante, tiempo de contacto, relación suelo-líquido y agitación) que maximicen la remoción del crudo del suelo contaminado mediante pruebas experimentales a escala de laboratorio.
3. Ensamblar el prototipo del reactor tipo batch a escala de laboratorio, especificando sus componentes, dimensiones y materiales, e integrando sus sistemas auxiliares de acuerdo con los requisitos técnicos del proceso.
4. Validar el reactor funcional mediante pruebas de rendimiento, evaluando su eficiencia en la remoción de crudo bajo las condiciones óptimas y comparando los resultados con la meta establecida para demostrar su viabilidad técnica.

1.6. Variables e indicadores

Tabla 1

Operacionalización de Variables

Tipo de Variable	Variable	Definición Conceptual	Indicadores y Niveles	Escala de Medición
Dependiente	Porcentaje de Remoción de Crudo	Eficiencia del tratamiento para extraer los hidrocarburos de la matriz del suelo.	Porcentaje (%)	De Razón
Independiente	A: Cantidad de Surfactante	Volumen de la solución de lavado (sustancia húmica) para movilizar el crudo.	Unidad: mL (Solución al 15% p/v) Niveles: Bajo (-1): 500,0; Alto (+1): 1.000,0	De Razón
Independiente	B: Tiempo de Agitación	Duración de la fase de mezcla dinámica para el contacto suelo-solución.	Unidad: min Niveles: Bajo (-1): 30; Alto (+1): 60	De Razón
Independiente	C: Tiempo de Centrifugación	Duración de la separación mecánica de fases (líquido-sólido).	Unidad: min Niveles: Bajo (-1): 10; Alto (+1): 15	De Razón
Independiente	D: Cantidad de Limoneno	Volumen del biosolvente añadido para mejorar la separación del crudo recuperado.	Unidad: mL Niveles: Bajo (-1): 2; Alto (+1): 6	De Razón
De Control	Masa de Suelo Contaminado	Cantidad fija de material a tratar en cada experimento.	Unidad: kg Valor fijo: 1 kg	De Razón
De Control	Contaminación Inicial de Crudo	Nivel de contaminación estandarizado en las muestras de suelo.	Unidad: % p/p Valor fijo: 13,06 %	De Razón
De Control	Velocidad de Agitación	Velocidad rotacional constante del agitador para garantizar mezcla uniforme.	Unidad: rpm Valor fijo: 400 rpm	De Razón

Nota. Elaboración Propia.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

La contaminación de suelos por derrames de hidrocarburos representa uno de los desafíos ambientales más persistentes y complejos de la era industrial, lo que ha impulsado a la comunidad científica a una búsqueda continua de tecnologías de remediación que sean no solo eficaces, sino también sostenibles y económicamente viables. La literatura académica de los últimos años refleja una clara evolución desde enfoques convencionales hacia soluciones más sofisticadas e integradas, especialmente para escenarios tan complejos como la Amazonía peruana. Históricamente, las primeras respuestas a la contaminación por petróleo se centraron en métodos físicos y químicos, tales como la adsorción y el desnatado superficial, técnicas que Zheng et al. (2022) describen como efectivas para la contención inicial pero limitadas en su capacidad de descontaminación profunda.

Sin embargo, como lo demuestra un análisis crítico de Li et al. (2022), estas tecnologías tradicionales a menudo sufren de desventajas significativas, entre las que se incluyen una baja eficiencia de tratamiento para crudos pesados, la posibilidad de generar contaminación secundaria y un alto costo operativo que las hace poco prácticas para aplicaciones a gran escala en zonas remotas.

Frente a las limitaciones de los métodos fisicoquímicos, la biorremediación ha surgido como una de las alternativas más estudiadas y aceptadas desde una perspectiva ambiental, debido a su potencial para degradar los hidrocarburos utilizando la capacidad metabólica de microorganismos. La investigación de Okeke (2022) sobre tecnologías emergentes destaca la biorremediación como una respuesta de gestión ambientalmente amigable para los derrames de petróleo. A pesar de su bajo impacto ecológico, este enfoque presenta un inconveniente fundamental que limita su aplicabilidad en situaciones de emergencia: su cinética de reacción es inherentemente lenta y puede verse fácilmente interrumpida por las condiciones ambientales del sitio, lo que resulta en procesos de limpieza que pueden durar meses o incluso años antes de alcanzar los niveles de descontaminación deseados.

Debido a estas limitaciones, la investigación más reciente se ha orientado hacia el desarrollo y la optimización de Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs), los cuales, según

Christodoulis et al. (2024), tienen el objetivo de mineralizar los contaminantes orgánicos transformándolos en compuestos inocuos como dióxido de carbono y agua. Estos procesos, que comúnmente operan a temperatura y presión ambiente, son considerados respetuosos con el medio ambiente al no transferir contaminantes entre fases ni producir grandes volúmenes de lodos peligrosos. Dentro de este campo, han ganado especial interés las técnicas térmicas, como la pirólisis, que buscan descomponer los hidrocarburos mediante la aplicación de calor en ausencia de oxígeno, aunque su implementación a gran escala sigue presentando desafíos en términos de consumo energético y control del proceso.

Paralelamente, una línea de investigación muy prometedora se ha centrado en las técnicas de lavado de suelos (soil washing), las cuales buscan transferir el contaminante de la matriz del suelo a una fase líquida para su posterior tratamiento y recuperación. En este ámbito, el uso de surfactantes y agentes naturales ha demostrado un gran potencial. Un estudio de Avelino Camones (2024) explora los factores de riesgo asociados a los derrames en cuencas hidrográficas de la Amazonía, subrayando la necesidad de tecnologías que puedan movilizar el crudo adherido a los sedimentos. Es aquí donde el uso de sustancias húmicas, biosurfactantes y solventes de origen natural como el limoneno cobra una especial relevancia, ya que ofrecen una alternativa biodegradable y de menor toxicidad frente a los surfactantes sintéticos. La viabilidad de estos métodos depende críticamente del diseño de un sistema de contacto eficiente, como un reactor, que maximice la interacción entre el suelo contaminado y la solución de lavado. La investigación contemporánea ha validado consistentemente la técnica de lavado de suelos como una solución robusta y de alta eficiencia para la descontaminación de sitios impactados por hidrocarburos. La premisa fundamental de esta tecnología es transferir los contaminantes de la matriz del suelo a una fase líquida mediante el uso de agentes de lavado, que pueden ser posteriormente tratados. La efectividad de este enfoque ha sido demostrada de manera contundente en diversos estudios que reportan eficiencias de remoción de Hidrocarburos Totales del Petróleo (TPH) superiores al 80%. El éxito del proceso, sin embargo, depende críticamente de la optimización de sus variables operativas. En esta línea, el trabajo de Zoghi y Mafigholami (2023) es un claro ejemplo, ya que, al aplicar una Metodología de Superficie de Respuesta para ajustar parámetros como la concentración de surfactante, la relación líquido-sólido, el tiempo de lavado y el pH, lograron alcanzar tasas de remoción de TPH que se aproximaban al 99% en condiciones óptimas.

La versatilidad del lavado de suelos se refleja en la amplia gama de agentes surfactantes que han sido investigados y validados. Un análisis general del estado del conocimiento realizado por Zhao et al. (2024) confirma que tanto surfactantes sintéticos, como el SDS y el Tween 80, como aquellos de origen natural, han demostrado un gran potencial. Dentro de las alternativas sostenibles, los biosurfactantes de origen microbiano, como la surfactina y el ramnolípido, han sido objeto de numerosos estudios. Por ejemplo, Gracida et al. (2023) demostraron que un biosurfactante producido por la bacteria halotolerante *Bacillus cereus* fue capaz de remover hasta un 64% del crudo en suelos con alta carga de contaminación. Paralelamente, los surfactantes derivados de plantas han emergido como otra alternativa prometedora; Offiong et al. (2021) utilizaron con éxito extractos acuosos de *Talinum triangulare* (waterleaf) para lavar suelos contaminados con crudo, mientras que Zhang et al. (2023) reportaron eficiencias de remoción superiores al 75% empleando saponinas, un tipo de surfactante vegetal. Esta evidencia respalda el uso de agentes de origen natural como una estrategia eficaz y ambientalmente más compatible.

Un área de investigación particularmente relevante para este proyecto es el uso de sustancias húmicas como agentes de lavado. Los trabajos recientes han demostrado que estos compuestos naturales pueden ser tan o más efectivos que los surfactantes comerciales. La investigación de Piccolo et al. (2024) es especialmente notable, ya que lograron potenciar las propiedades anfífilas de la materia húmica mediante una modificación química (O-alquilación), creando un agente con una capacidad de remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos superior a la de los surfactantes convencionales. Una ventaja clave de este enfoque es la menor toxicidad de los agentes húmicos para la biota del suelo, lo que además de limpiar, puede facilitar una posterior atenuación biológica de los contaminantes residuales. Este potencial sinérgico es corroborado por Zhao et al. (2024), quienes destacan que los surfactantes compuestos con humatos de sodio son una opción viable y sostenible. Más allá de la eficacia química, la viabilidad del lavado de suelos depende de la ingeniería del proceso y del diseño de sistemas de tratamiento que sean escalables y eficientes. El desarrollo de reactores es un paso crucial para transferir los resultados del laboratorio a aplicaciones de campo. Estudios como el de Lee et al. (2025), quienes evaluaron el rendimiento de un reactor piloto de biolavado para remediar suelos de Kuwait, demuestran la aplicabilidad de la tecnología a gran escala y en condiciones reales. El diseño de estos sistemas a menudo incluye la posibilidad de operar de manera móvil, como lo describe el trabajo de Silva et al. (2023), quienes utilizaron un sistema transportable para tratar suelos con un surfactante verde.

Para maximizar la sostenibilidad del proceso, el diseño del reactor debe considerar la optimización de la agitación, una adecuada relación líquido-sólido y, fundamentalmente, la capacidad de recircular la solución de lavado. Adicionalmente, se deben integrar etapas de post-tratamiento para gestionar los efluentes, como el uso de carbón activado para depurar la solución antes de su descarga o reutilización, tal como sugieren Caetano et al. (2023). En conjunto, la evidencia científica no solo respalda la alta eficiencia del lavado de suelos, sino que también establece una base sólida para el diseño de reactores que, como se propone en esta tesis, integren el uso de surfactantes naturales para una remediación efectiva y sostenible.

Finalmente, aunque la literatura científica presenta un amplio abanico de tecnologías para la remediación de suelos contaminados con petróleo, persiste una brecha significativa en cuanto al desarrollo de soluciones integrales que sean a la vez rápidas, eficientes, de bajo costo y adaptables a las condiciones logísticas y ecológicas de la selva peruana. La mayoría de las investigaciones se han enfocado en la eficacia de un agente químico o biológico particular, prestando menos atención al diseño y la validación de la ingeniería del proceso a través de un reactor optimizado que permita aplicar estas soluciones de manera controlada y escalable. Es precisamente en esta intersección entre la química de la remediación y la ingeniería de reactores donde la presente investigación busca hacer una contribución significativa.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Contaminación de Suelos por Hidrocarburos de Petróleo

2.2.1.1. Composición y Propiedades del Petróleo Crudo Extrapesado

Investigadores como Yang et al. (2024), Schacht-Hernández et al. (2024) & Wu et al. (2024) han conceptualizado el petróleo crudo extrapesado como un fluido definido por su excepcional viscosidad, una densidad elevada y una estructura molecular de gran complejidad. Su composición química se caracteriza por una predominancia de fracciones de alto peso molecular, tales como asfaltenos y resinas, junto con una notable presencia de compuestos aromáticos y diversos heteroátomos, incluyendo azufre, nitrógeno y metales pesados como el vanadio y el níquel. En este sentido, trabajos de Yang et al. (2024), Avendaño-Salazar et al. (2020), Lozano-Navarro et al. (2022) & Contreras-Mateus et al. (2021) explican que son precisamente las estructuras cíclicas y aromáticas altamente condensadas de los asfaltenos las principales responsables de esta

viscosidad extrema. Dichos compuestos, además, promueven la formación de agregados moleculares y emulsiones de una estabilidad muy alta, lo que introduce desafíos significativos en las operaciones de transporte y procesamiento. A su vez, Wu et al. (2024) añade que la marcada escasez de hidrocarburos más ligeros, como alcanos y compuestos aromáticos de bajo peso molecular, constituye otro factor determinante que contribuye a la elevada resistencia a fluir que presenta este tipo de crudo. Según Avendaño-Salazar et al. (2020), Topilnytsky et al. (2020) & Wu et al. (2024), las propiedades fisicoquímicas fundamentales que rigen el comportamiento del petróleo extrapesado son la viscosidad, la densidad, el contenido de agua y el análisis SARA, que desglosa su composición en saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos, destacando que estas propiedades varían considerablemente en función del yacimiento y las condiciones de extracción. Además, Zhao et al. (2022) resalta que la presencia de compuestos polares, como los ácidos nafténicos y las resinas, juega un papel crucial al influir directamente tanto en la viscosidad como en la estabilidad de las emulsiones que se forman.

Estas complejidades operativas han impulsado la búsqueda activa de soluciones tecnológicas, donde el trabajo de Alharthy et al. (2022) se destaca por documentar el estudio de un amplio espectro de aditivos y métodos físicos, como extractos de origen vegetal y nanopartículas, cuyo enfoque central es modificar la reología del crudo para mejorar sustancialmente su movilidad y procesabilidad industrial.

2.2.1.2. Dinámica de los Derrames: Infiltración y Transporte de Contaminantes en el Suelo

La dinámica de un derrame de contaminantes en el subsuelo se rige por complejos procesos de infiltración y transporte, cuya evolución depende de las propiedades intrínsecas del suelo, la naturaleza fisicoquímica del contaminante y las condiciones ambientales del entorno. El estudio de Bukhman et al. (2021) establece que la penetración inicial del líquido en la matriz porosa del suelo está influenciada de manera fundamental por la porosidad y el coeficiente de filtración, factores que determinan tanto la velocidad como la profundidad de la absorción, mientras que el volumen total absorbido es directamente proporcional al espesor de la capa de derrame inicial.

Una vez que el contaminante ha ingresado al suelo, investigaciones como las de Menkiti et al. (2021) & Camelo et al. (2024) demuestran que este puede iniciar una migración tanto en dirección vertical como horizontal, con el riesgo potencial de alcanzar acuíferos subterráneos y convertirse en una amenaza significativa para la salud pública y la integridad del ecosistema.

Posteriormente, el transporte de los contaminantes a través del perfil del suelo es regulado por una combinación de fenómenos físicos y químicos, que incluyen la advección, la difusión y la sorción, a los que en ocasiones se suma la biodegradación. En este sentido, Menkiti et al. (2021) & Mwakilama et al. (2023) identifican la capacidad de adsorción del suelo, una propiedad estrechamente ligada a su contenido de arcilla y materia orgánica, como un factor clave que controla la movilidad y retención de los compuestos. Además, Tang et al. (2024) señala que la heterogeneidad estructural del suelo y las condiciones de flujo transitorias pueden dar lugar a la formación de rutas de flujo preferenciales, afectando la mezcla, el tiempo de residencia y, por ende, la degradación de los contaminantes.

Para predecir la distribución espacio-temporal de la pluma de contaminación, se emplean modelos numéricos y analíticos, tal como proponen Viccione et al. (2020), Ke et al. (2025) & Mwakilama et al. (2023), los cuales integran variables como la velocidad del flujo de agua, la presencia de sistemas radiculares y la capacidad de sorción del medio, proporcionando así conocimientos fundamentales para el diseño de estrategias de remediación efectivas y la prevención de la contaminación de recursos hídricos subterráneos.

2.2.1.3. Interacción del Crudo con la Matriz del Suelo Amazónico (Adsorción y Retención)

La interacción entre el petróleo crudo y la matriz del suelo amazónico está gobernada fundamentalmente por procesos de adsorción y retención, los cuales son intensificados por las características fisicoquímicas tanto del contaminante como del medio edáfico. Un estudio de Yang et al. (2023) explica que los componentes más polares del crudo, como los asfaltenos y las resinas, exhiben una elevada afinidad por las superficies minerales del suelo, especialmente las arcillas como la caolinita.

Esta fuerte adhesión se debe a una combinación de fuerzas de Van der Waals, interacciones de tipo electrostático y la formación de enlaces de hidrógeno entre los grupos funcionales presentes en el hidrocarburo y los grupos hidroxilo de los minerales. Como resultado, se incrementa significativamente la energía de interacción en la interfaz suelo-crudo, lo que conduce a una tenaz retención del contaminante y dificulta enormemente su movilidad y eventual separación durante los procesos de remediación.

Las consecuencias de esta fuerte retención son complejas; por un lado, puede limitar la biodisponibilidad de los hidrocarburos para los microorganismos, obstaculizando los procesos de atenuación natural, aunque como señalan Partovinia et al. (2021) & Ali et al. (2020), la presencia de consorcios microbianos adaptados a estas condiciones puede favorecer una remediación biológica a largo plazo. Adicionalmente, la adsorción no es un proceso uniforme para todos los componentes del crudo. Investigaciones de Yang et al. (2023) & Li et al. (2020) demuestran que las fracciones de mayor peso molecular y polaridad tienden a ser adsorbidas con mayor fuerza, mientras que los compuestos más ligeros y menos polares conservan una mayor capacidad de migración a través del perfil del suelo.

2.2.1.4. Impacto Ecotoxicológico de los Hidrocarburos en Ecosistemas Terrestres

El impacto ecotoxicológico de los hidrocarburos derivados del petróleo, que incluyen compuestos alifáticos, aromáticos y policíclicos (HAPs), representa una amenaza considerable para la salud de los ecosistemas terrestres. Investigaciones de Mishra et al. (2023), Mohanta et al. (2023) & Da Silva & Andrade-Vieira (2025) demuestran que estas sustancias pueden inducir efectos de toxicidad tanto agudos como crónicos en la biota del suelo, afectando negativamente a plantas, microorganismos y fauna. Dicha toxicidad se manifiesta en la alteración de procesos biológicos fundamentales, como la inhibición de la germinación de semillas, la restricción del crecimiento radicular y una disminución general de la actividad microbiana y la biodiversidad. A nivel celular, los estudios de Mishra et al. (2023) & Mohanta et al. (2023) explican que los mecanismos de daño incluyen la generación de estrés oxidativo, el deterioro de la función mitocondrial, la inducción de mutaciones en el ADN y la disrupción de la síntesis proteica, lo que en conjunto conduce a una degradación de la fertilidad del suelo y una merma en la productividad de los ecosistemas.

Más allá de los efectos biológicos directos, la contaminación por hidrocarburos también provoca una alteración significativa de las propiedades fisicoquímicas del suelo. El trabajo de Mohanta et al. (2023) detalla cómo estos contaminantes pueden modificar la porosidad y la permeabilidad, reduciendo la disponibilidad de nutrientes y generando condiciones anaeróbicas que son perjudiciales para el desarrollo de la vegetación y la supervivencia de la microbiota beneficiosa. Adicionalmente, Mishra et al. (2023) advierte sobre el riesgo de bioacumulación, un proceso mediante el cual los compuestos tóxicos se incorporan en los organismos y se transfieren a lo largo de la cadena trófica, pudiendo ocasionar efectos genotóxicos y endocrinos en la fauna terrestre. Debido a que la severidad de estos impactos varía en función del tipo de hidrocarburo, las características del suelo y la sensibilidad de las especies expuestas, autores como Mishra et al. (2023), Mohanta et al. (2023) & Da Silva & Andrade-Vieira (2025) coinciden en que la evaluación ecotoxicológica, a través de bioensayos estandarizados, es una herramienta fundamental para el manejo ambiental y el diseño de estrategias de remediación efectivas para los sitios contaminados.

2.2.2. Panorama de las Tecnologías de Remediación de Suelos

2.2.2.1. Clasificación de los Tratamientos: Físicos, Químicos y Biológicos

Las tecnologías disponibles para la remediación de suelos contaminados se agrupan en tres categorías principales: tratamientos físicos, químicos y biológicos, cada uno de los cuales presenta un perfil particular de ventajas y limitaciones. Dentro de los tratamientos físicos, trabajos como los de Song et al. (2022), He et al. (2024) & Mahinroosta & Senevirathna (2020) describen técnicas como la extracción térmica y el lavado de suelos, las cuales se caracterizan por su alta eficiencia y rapidez, aunque a menudo implican costos elevados y pueden provocar una alteración perjudicial en la estructura y fertilidad del suelo. Por su parte, los tratamientos químicos, que según Li et al. (2024), Song et al. (2022) & Azhar et al. (2022) incluyen la oxidación avanzada y la estabilización, ofrecen la capacidad de degradar o inmovilizar los contaminantes de manera efectiva, si bien su aplicación, como advierte Mahinroosta & Senevirathna (2020), puede generar subproductos que requieren un manejo cuidadoso y conllevan el riesgo de afectar negativamente la calidad del medio edáfico.

En contraste con los enfoques anteriores, los tratamientos biológicos, que abarcan la biorremediación, la fitorremediación y la bioaumentación, son destacados por Analía (2022), Li et al. (2024) & Song et al. (2022) por su sostenibilidad y mayor aceptación social, ya que utilizan los procesos metabólicos de microorganismos y plantas para degradar los contaminantes. La principal limitación de estos métodos, según Azhar et al. (2022), es que generalmente requieren periodos de tiempo más prolongados para alcanzar los objetivos de descontaminación. Debido a las desventajas inherentes a cada método individual, la tendencia actual en la ingeniería ambiental, respaldada por Analía (2022), Zheng et al. (2022), Zou et al. (2024), Ashkanani et al. (2024) & Wu et al. (2022), es la aplicación de tratamientos integrados o sinérgicos que combinan técnicas físicas, químicas y biológicas para mejorar la eficiencia global del proceso. En última instancia, como coinciden Analía (2022), Li et al. (2024) & Song et al. (2022), la selección de la estrategia de remediación más adecuada debe basarse en un análisis multifactorial que considere el tipo y la concentración del contaminante, las propiedades del suelo, los costos asociados y los objetivos de restauración ambiental específicos para cada sitio.

2.2.2.2. Biorremediación: Principios y Limitaciones en Climas Tropicales

La biorremediación se define como un proceso biotecnológico que emplea organismos vivos, tales como microorganismos, plantas o algas, para degradar, transformar o inmovilizar contaminantes presentes en el suelo y el agua. Autores como Martínez-Rivera y Cardona-Gallo (2021), Patel et al. (2022) & Bala et al. (2022) la describen como una alternativa ecológica y rentable en comparación con los métodos fisicoquímicos convencionales. En el contexto de los climas tropicales, las condiciones de alta temperatura y humedad pueden, en principio, favorecer una mayor actividad microbiana y acelerar las tasas de biodegradación, tal como lo señalan Mokrani et al. (2024). Sin embargo, este mismo entorno presenta desafíos particulares, ya que, según Martínez-Rivera y Cardona-Gallo (2021) & Gaylarde y Da Fonseca (2025), la rápida descomposición de la materia orgánica, la lixiviación de nutrientes esenciales y la intensa competencia entre los microorganismos nativos y aquellos que pudieran ser introducidos pueden comprometer la eficiencia del tratamiento.

Dentro de las estrategias más utilizadas, Martínez-Rivera y Cardona-Gallo (2021) destacan la bioaumentación, que consiste en la adición de consorcios microbianos con capacidades degradadoras específicas, y la bioestimulación, que busca potenciar la actividad de la microbiota autóctona mediante la adición de nutrientes o co-sustratos. A pesar de que estas técnicas han demostrado altas tasas de degradación de hidrocarburos en suelos tropicales, su eficacia puede verse severamente limitada por una serie de factores. Investigaciones de Patel et al. (2022) & Mokrani et al. (2024) identifican la baja disponibilidad de oxígeno, la presencia de compuestos recalcitrantes de alta toxicidad y una posible disminución de la diversidad microbiana como obstáculos clave. Por esta razón, como subrayan Martínez-Rivera y Cardona-Gallo (2021) & Gaylarde y Da Fonseca (2025), la selección rigurosa de microorganismos adaptados a las condiciones tropicales y un monitoreo constante de la biodiversidad del suelo son pasos indispensables para evitar impactos ecológicos adversos y asegurar la sostenibilidad del proceso, concluyendo que el éxito de la biorremediación en estos climas depende de un manejo cuidadoso de las variables ambientales y biológicas.

2.2.2.3. Tratamientos Térmicos (Desorción y Pirólisis)

Los tratamientos térmicos, que engloban procesos como la desorción térmica y la pirólisis, constituyen una estrategia de remediación de suelos que aplica calor para volatilizar o descomponer químicamente a los contaminantes orgánicos e inorgánicos. Una de las ventajas más notables de estas tecnologías, como lo describen Yue et al. (2021), Mong et al. (2022) & Cuevas et al. (2024), es su alta eficiencia en la eliminación de contaminantes, junto con la posibilidad de recuperar energía y convertir los residuos en productos de valor como aceites, gases y biochar. En particular, la pirólisis es un proceso destacado por Renjie et al. (2020) & Sekar et al. (2021) por su capacidad para transformar residuos sólidos en combustibles, cuya eficiencia energética, según Ren et al. (2022), puede ser optimizada mediante la integración con otros procesos o el uso de catalizadores.

A pesar de sus beneficios, estos tratamientos enfrentan desafíos energéticos de gran envergadura. Investigaciones de Patlolla et al. (2023) & Yue et al. (2021) señalan que la necesidad de operar a temperaturas elevadas, a menudo por encima de los 500°C, implica un consumo energético muy alto y, consecuentemente, costos operativos significativos.

Además, Mong et al. (2022) & Sekar et al. (2021) explican que la eficiencia del proceso depende críticamente del diseño del reactor, el tipo de residuo y la optimización de parámetros clave. Por estas razones, como concluyen Patlolla et al. (2023) & Cuevas et al. (2024), la escalabilidad y la sostenibilidad económica de estas tecnologías aún enfrentan barreras importantes, lo que subraya la necesidad de continuar la investigación para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental asociado a su alto consumo energético.

2.2.2.4. Tratamientos Fisicoquímicos y sus Desafíos Ambientales

Los tratamientos fisicoquímicos engloban un conjunto de tecnologías de remediación, que incluyen la adsorción, la oxidación avanzada y la filtración por membranas, las cuales, según Analía (2022), Wu et al. (2023) & Donkadokula et al. (2020), se distinguen por su notable rapidez y alta eficiencia en la eliminación de una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos. A pesar de su efectividad, estos métodos presentan importantes desafíos ambientales y operativos.

Investigaciones de Li et al. (2023), Mousset et al. (2021) & Bibi et al. (2023) advierten sobre la generación de lodos y residuos secundarios que requieren una gestión especializada, así como sobre el elevado consumo de energía y reactivos químicos que caracteriza a muchos de estos procesos. Además, como señala Analía (2022), existe el riesgo de alterar permanentemente la estructura y funcionalidad biológica del suelo, y su efectividad puede verse comprometida por la variabilidad de los residuos y la presencia de contaminantes recalcitrantes, lo que, de acuerdo con Gao et al. (2025) & Li et al. (2023), exige un control operativo muy preciso.

Un desafío adicional de considerable relevancia, destacado por Wu et al. (2023) & Donkadokula et al. (2020), es el riesgo inherente de formar subproductos más tóxicos o persistentes que los compuestos originales durante las reacciones de oxidación, lo cual podría incrementar la toxicidad general del sitio si el proceso no es controlado rigurosamente. Por estas razones, la tendencia actual en la ingeniería de remediación, como recomiendan Analía (2022), Mousset et al. (2021) & Gaur et al. (2024), se orienta hacia la optimización de los procesos para minimizar el consumo de recursos y, fundamentalmente, hacia la integración de tratamientos fisicoquímicos con tecnologías biológicas.

Esta combinación sinérgica busca aprovechar la rapidez de los primeros para una descontaminación inicial, seguida de un pulido biológico más sostenible, mejorando así la eficiencia global y reduciendo los impactos ambientales negativos a largo plazo.

2.2.3. El Lavado de Suelos (Soil Washing) como Estrategia de Tratamiento

2.2.3.1. Fundamentos y Mecanismos del Proceso de Lavado de Suelos

El lavado de suelos, o soil washing, es una técnica de remediación conceptualizada por Liu et al. (2021), Choong et al. (2023) & Zheng et al. (2022) como un proceso diseñado para separar y extraer contaminantes, tales como metales pesados y compuestos orgánicos, de la matriz del suelo. Esta tecnología opera mediante el uso de soluciones acuosas que contienen diversos agentes químicos, como surfactantes o quelantes, para movilizar los contaminantes. El fundamento del proceso, como explican Feng et al. (2020), Wang et al. (2020) & Choong et al. (2023), se basa en una combinación de dos mecanismos principales: por un lado, una separación de tipo físico que aísla las partículas más finas del suelo (arcilla y limo), donde tienden a concentrarse los contaminantes, de las fracciones más gruesas; y por otro, una extracción de naturaleza química, en la cual los agentes de lavado promueven la desorción y solubilización de los contaminantes, facilitando su transferencia desde la fase sólida a la fase líquida para su posterior tratamiento.

La eficiencia global del proceso de lavado de suelos depende de una serie de factores operativos interrelacionados, entre los que Feng et al. (2020), Liu et al. (2021) & Wang et al. (2020) destacan el tipo y la concentración del agente de lavado, el pH de la solución, el tiempo de contacto y la relación sólido-líquido. Los mecanismos específicos de remoción, que según Zheng et al. (2022) pueden incluir desde la disolución ácida hasta la formación de complejos, varían en función de la naturaleza del contaminante y del agente seleccionado. En la búsqueda de una mayor efectividad, investigaciones de Choi et al. (2021) & Lee & Son (2021) han explorado tecnologías complementarias como la aplicación de ultrasonido, que puede intensificar la desorción de los contaminantes.

A pesar de ser una técnica rápida y efectiva, es fundamental reconocer sus limitaciones; como advierten Liu et al. (2021), Tran et al. (2021) & Wang et al. (2020), el proceso genera efluentes líquidos contaminados que requieren un tratamiento secundario y puede alterar las propiedades del suelo, por lo que la optimización de las condiciones operativas es crucial para minimizar los riesgos ambientales asociados.

2.2.3.2. Agentes de Lavado: Surfactantes y Solventes

En las técnicas de lavado de suelos, los agentes más comúnmente empleados para facilitar la desorción y solubilización de contaminantes hidrofóbicos, como los hidrocarburos, son los surfactantes y los solventes. Los surfactantes, entre los que se incluyen compuestos como el SDS y los ramnolípidos, actúan formando micelas que encapsulan las moléculas contaminantes, mejorando así su extracción de la matriz del suelo. Investigaciones de Ramirez et al. (2020) & Zhang et al. (2023) demuestran que la eficiencia de este proceso depende de múltiples factores como el tipo de surfactante y las características del contaminante, y señalan que un incremento en la concentración del agente no siempre se traduce en una mejora significativa de la remoción.

En este sentido, estudios de Panumonwatee et al. (2021) & Zhang et al. (2023) han determinado que los surfactantes de tipo no iónico y aniónico suelen ser más efectivos que los catiónicos para la remoción de hidrocarburos, y que la combinación de diferentes surfactantes puede optimizar la eficiencia del lavado. Por su parte, los solventes como el tolueno o el ciclohexano se utilizan frecuentemente como co-solventes para potenciar la recuperación de aceites, aunque como advierten Ramirez et al. (2020) & Gao et al. (2021), su selección debe priorizar un bajo impacto ambiental. La combinación de surfactantes y solventes puede generar un efecto sinérgico, ya que, según Gao et al. (2021), esta mezcla puede reducir la concentración micelar crítica y aumentar el número de micelas, mejorando la capacidad de extracción, especialmente si el solvente posee afinidad estructural con el contaminante. No obstante, una de las principales limitaciones de estas tecnologías, como subraya Trellu et al. (2020), es que el uso de grandes volúmenes de agentes de lavado no solo incrementa los costos operativos, sino que también genera efluentes líquidos que requieren un tratamiento adicional, por lo que la recuperación y reutilización de dichos agentes se considera un aspecto clave para garantizar la sostenibilidad del proceso.

2.2.3.3. El Rol de las Sustancias Húmicas como Surfactantes Naturales

Las sustancias húmicas, y en particular los ácidos húmicos, son reconocidas como potentes surfactantes de origen natural, una capacidad que, según Lian et al. (2020), Bannikov y Savchenko (2024) & Yang et al. (2021), se deriva de su compleja estructura molecular. Esta estructura contiene de manera simultánea grupos funcionales hidrofílicos e hidrofóbicos, lo que les confiere la habilidad de interactuar eficazmente tanto con contaminantes orgánicos como inorgánicos. Gracias a esta naturaleza anfifílica, trabajos de Lian et al. (2020), Piccolo et al. (2024) & Gholami et al. (2024) demuestran que las sustancias húmicas pueden reducir la tensión superficial del agua, formar micelas y estabilizar emulsiones. Estos mecanismos facilitan la solubilización y la movilidad de contaminantes persistentes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) en el suelo, mejorando su disponibilidad para ser eliminados mediante técnicas de lavado o para ser degradados en procesos de biorremediación.

El comportamiento surfactante de las sustancias húmicas no es estático; de hecho, Lian et al. (2020) señala que es altamente sensible a factores ambientales como el pH y la presencia de iones metálicos, los cuales pueden modificar su capacidad para estabilizar emulsiones y, por ende, su eficacia. No obstante, existe la posibilidad de mejorar su rendimiento, ya que investigaciones de Piccolo et al. (2024) & Bannikov y Savchenko (2024) han demostrado que la modificación química de los ácidos húmicos puede potenciar sus propiedades, llegando a alcanzar eficiencias de lavado comparables o superiores a las de los surfactantes sintéticos, pero con las ventajas de una menor toxicidad y mayor compatibilidad ambiental. Es importante considerar que su efecto puede ser dual; tal como advierte Gholami et al. (2024), la concentración y el tipo de sustancia húmica son determinantes, pues en ciertas condiciones podrían secuestrar los contaminantes y reducir su biodisponibilidad. A pesar de ello, su perfil general las posiciona como una alternativa ecológica y eficiente para la remediación de suelos.

2.2.3.4. Biosolventes para la Recuperación de Crudo

El limoneno, un compuesto orgánico de origen natural extraído de cítricos, ha emergido como un biosolvente de alta eficacia y bajo impacto ambiental para la recuperación de hidrocarburos, mostrando un rendimiento particularmente notable en el tratamiento de crudos pesados y extrapesados. Investigaciones desarrolladas por Espinosa y Ramírez-González (2022) & Mathews et al. (2022) demuestran que su

aplicación puede inducir una reducción significativa de la viscosidad del crudo, alcanzando hasta un 53% en aceites extrapesados. Este efecto se complementa con su capacidad para solubilizar fracciones complejas como asfaltenos y parafinas, mejorando la proporción de resinas y aromáticos. En pruebas de laboratorio, estos autores reportan que la inyección de limoneno ha logrado tasas de recuperación de hasta un 46% en sistemas de arena y un 62,6% en rocas bioclásticas, un rendimiento que en ciertas condiciones supera a métodos tradicionales como la inyección de vapor.

Más allá de su desempeño técnico, el principal atractivo del limoneno radica en su perfil ambiental favorable. Mathews et al. (2022) lo posicionan como una alternativa verde superior a los solventes convencionales como el tolueno y los compuestos BTX, ya que el limoneno es biodegradable, no tóxico y seguro de manipular.

Adicionalmente, su alta disponibilidad y su capacidad para formar sistemas miscibles o nanoemulsiones, como lo describen Liu et al. (2021) & Mathews et al. (2022), amplían su potencial en aplicaciones de recuperación mejorada de petróleo. Estos sistemas permiten la movilización del crudo atrapado en reservorios de baja permeabilidad y contribuyen a reducir la presión de inyección necesaria. En conjunto, el limoneno se consolida como una opción sostenible y eficiente que ofrece ventajas tanto técnicas como ambientales sobre los solventes tradicionalmente utilizados en la industria.

2.2.3.5. Dinámica Micelar de las Sustancias Húmicas en la Remediación

Las sustancias húmicas actúan como tensioactivos naturales gracias a su estructura anfifílica, que permite la reducción de la tensión superficial y la formación de micelas. De acuerdo con Lian et al. (2020), la Concentración Micelar Crítica (CMC) de estas sustancias es altamente sensible a factores ambientales como el pH y la presencia de iones, los cuales modifican su capacidad para estabilizar emulsiones. En procesos de lavado de suelos, es imperativo operar en un régimen post-micelar; Bannikov y Savchenko (2024) señalan que una concentración adecuada permite que las micelas encapsulen eficazmente los contaminantes orgánicos, facilitando su transferencia a la fase líquida. Asimismo, Gholami et al. (2024) advierten que tanto la concentración como el tipo de sustancia húmica son determinantes, ya que una dosis insuficiente limitaría la biodisponibilidad del contaminante para su remoción.

2.2.3.6. Fundamentos Analíticos de la Norma EPA 9071B para la Cuantificación de HTP

El método analítico oficial EPA 9071B (N-Hexane Extractable Material for Sludge, Sediment, and Solid Samples) establece las directrices estandarizadas internacionales para la extracción ex-situ y determinación cuantitativa gravimétrica de hidrocarburos no polares asociados a matrices sólidas, lodos y sedimentos edáficos (U.S. Environmental Protection Agency [U.S. EPA], 1998). El principio físico-químico del método descansa en una separación por extracción líquido-sólido continua (Soxhlet) utilizando n-hexano como solvente orgánico apolar de arrastre. Debido a su baja constante dieléctrica, el n-hexano rompe selectivamente las interacciones hidrofóbicas y las fuerzas de van der Waals que fijan las cadenas de hidrocarburos a la superficie de los minerales y la materia orgánica del suelo, transfiriendo selectivamente el contaminante hacia el seno del solvente en ciclos de ebullición y reflujo continuo. El fundamento físico-químico de esta técnica radica en la afinidad termodinámica entre el solvente orgánico y los contaminantes hidrofóbicos. El n-hexano, al ser un solvente apolar de baja constante dieléctrica, posee la capacidad de romper eficazmente las interacciones hidrofóbicas, las fuerzas de van der Waals y los enlaces débiles que fijan las cadenas de hidrocarburos a las superficies activas de las arcillas (caolinita) y a la materia orgánica del suelo. De este modo, se logra desprender el contaminante de la matriz sólida sin alterar su estructura química basal. Procedimiento Experimental.

2.2.4. Principios de Ingeniería para el Diseño del Sistema

2.2.4.1. Reactores Tipo Batch (Discontinuos)

Los reactores tipo batch, también conocidos como discontinuos, se definen por un modo de operación cíclico en el que los reactivos se cargan en el sistema al inicio de un lote, la reacción procede bajo condiciones de temperatura y presión estrictamente controladas, y los productos son descargados una vez que el ciclo ha concluido. Este método, según lo describen Wu et al. (2022) y otra literatura técnica (2020), permite un control preciso sobre el tiempo de residencia y las variables operativas. Entre sus ventajas más notables se encuentra una gran flexibilidad para procesar diferentes tipos de reacciones y volúmenes, así como una facilidad para el manejo de lotes pequeños o de escala experimental. Además, la investigación de Bukhtiyarova et al. (2023) destaca

que su naturaleza discontinua los hace ideales para la investigación, el desarrollo de nuevos productos y la producción de especialidades químicas o farmacéuticas, donde la capacidad de adaptar rápidamente la formulación y las condiciones del proceso es fundamental.

En cuanto a sus aplicaciones, los reactores batch son ampliamente utilizados en la síntesis de productos químicos finos, en la industria farmacéutica y en el campo biotecnológico. Askari et al. (2024) & Jagaba et al. (2021) también resaltan su uso en el tratamiento de aguas residuales a través de los reactores secuenciales por lotes (SBR), que ofrecen una alta eficiencia para tratar efluentes con composiciones variables.

No obstante, es importante reconocer sus limitaciones; como señalan Wu et al. (2022) y otras fuentes (2020), estos reactores no son eficientes para producciones continuas a gran escala y exigen una gestión muy cuidadosa de la seguridad y del control térmico para prevenir riesgos como el sobrecalentamiento en reacciones exotérmicas. En resumen, su principal fortaleza radica en la versatilidad y el control que ofrecen, siendo la opción preferente en procesos donde la flexibilidad operativa y el aseguramiento de la calidad del producto son prioritarios sobre el volumen de producción.

2.2.4.2. Parámetros Críticos en el Diseño de Reactores de Mezcla

a) Hidrodinámica y Sistemas de Agitación (Turbinas Rushton). La hidrodinámica dentro de los reactores de mezcla es un factor determinante para el éxito de un proceso, ya que garantiza la distribución homogénea de los reactivos y una transferencia de masa eficiente. Investigaciones de Tao et al. (2020), Yang et al. (2020) & Geng et al. (2020) demuestran que el diseño y la operación de los sistemas de agitación, como las turbinas Rushton, influyen directamente en la velocidad de mezcla, la dispersión de fases y la capacidad de mantener sólidos en suspensión. Estos autores, junto con Dhakane y Yadav (2024), señalan que parámetros como la velocidad de circulación del líquido y la homogeneidad de sólidos en sistemas multifásicos son una consecuencia directa de la configuración del agitador. Se ha observado que un incremento en la velocidad de agitación o en la velocidad superficial de un gas tiende a aumentar la retención de gas y el coeficiente volumétrico de transferencia de

masa, aunque, como advierten Tao et al. (2020) & Yang et al. (2020), una alta concentración de sólidos puede a su vez dificultar la mezcla y reducir la eficiencia de dicha transferencia.

Además del control de las variables operativas, la optimización de la geometría tanto del reactor como de sus sistemas de agitación es un aspecto clave para asegurar una mezcla efectiva en todo el volumen del sistema. Estudios de Li et al. (2022), Jaramillo-Gutiérrez et al. (2020) & Dhakane y Yadav (2024) enfatizan la importancia de un diseño adecuado para evitar la formación de zonas muertas, que son regiones de baja circulación donde la mezcla es deficiente.

Este desafío es particularmente relevante en configuraciones específicas como los reactores de tipo airlift o las columnas de burbujeo, donde la hidrodinámica es más compleja. Por lo tanto, un diseño ingenieril que considere tanto la forma del reactor como la del impulsor es fundamental para maximizar el contacto entre las fases y garantizar la eficiencia del proceso.

b) Transferencia de Masa y Tiempo de Residencia. La transferencia de masa se considera un parámetro de diseño crítico, ya que determina la eficiencia de la reacción, especialmente en sistemas multifásicos como los de tipo gas-líquido o líquido-sólido. Investigaciones de Tao et al. (2020), Li et al. (2022) & Geng et al. (2020) establecen que su eficacia depende directamente de la intensidad de la mezcla, el área interfacial disponible y el coeficiente de transferencia, factores que son inherentemente controlados por la hidrodinámica del sistema y el diseño del agitador. De manera complementaria, el tiempo de residencia, que describe la duración que un reactivo permanece dentro del reactor, es otro parámetro fundamental que, según Jaramillo-Gutiérrez et al. (2020), Lv et al. (2022) & Li et al. (2024), afecta directamente la conversión y la selectividad del proceso. Una distribución de tiempos de residencia adecuada es, por lo tanto, esencial para prevenir fenómenos perjudiciales como los cortocircuitos o la formación de zonas de estancamiento, optimizando así el rendimiento global del reactor. Para lograr un control preciso de estos parámetros interdependientes, la ingeniería de reactores recurre a una combinación de modelado, simulación y técnicas experimentales.

Tal como lo demuestran los trabajos de Jaramillo-Gutiérrez et al. (2020), Lv et al. (2022) & Li et al. (2024), el análisis de la distribución de tiempos de residencia (RTD) es una herramienta experimental clave que, junto con modelos computacionales, permite ajustar y optimizar el diseño y las condiciones operativas. Este enfoque integrado es el que finalmente permite maximizar tanto la eficiencia de la transferencia de masa como la seguridad general del sistema.

2.2.4.3. Procesos de Separación Post-Tratamiento

Los procesos de separación post-tratamiento, como la decantación, la centrifugación y la evaporación, son etapas fundamentales para la purificación de productos y la recuperación de materiales de valor en una amplia gama de industrias. La decantación, que se basa en la sedimentación por gravedad, es reconocida por su simplicidad operativa; sin embargo, como señalan Mekonnen (2024) & Lateb et al. (2024), a menudo resulta ser un método lento y poco eficiente, especialmente cuando se trata de separar partículas muy finas o romper emulsiones estables.

En contraste, la centrifugación emplea fuerzas centrífugas para acelerar drásticamente la separación de fases. Investigaciones de Bai et al. (2021), Haller et al. (2021) & Li et al. (2023) demuestran que esta técnica no solo reduce significativamente los tiempos de proceso en comparación con la decantación, sino que también permite la separación de partículas de tamaño micrométrico, logrando así productos de una pureza considerablemente mayor.

La eficacia de la centrifugación es particularmente evidente en aplicaciones ambientales; estudios de Lateb et al. (2024), Li et al. (2023) & Martínez-Arcos et al. (2024) destacan su capacidad para reducir el contenido de sólidos en lodos aceitosos, mejorar la recuperación de aceites o biocompuestos y facilitar la reutilización de las fases acuosas. Por otro lado, la evaporación se utiliza como una técnica para concentrar soluciones o para eliminar solventes, siendo un método de elección cuando se necesita recuperar compuestos volátiles o reducir el volumen de residuos líquidos. En definitiva, como coinciden Bai et al. (2021) & Mekonnen (2024), la selección del método de separación más apropiado no es universal, sino que depende de un análisis cuidadoso de la naturaleza de la mezcla, los objetivos del proceso y la eficiencia requerida en términos de tiempo, pureza y recuperación del producto final.

2.2.5. Optimización de Procesos mediante Diseño Experimental

2.2.5.1. Fundamentos del Diseño de Experimentos (DOE)

El Diseño de Experimentos (DOE) es una metodología estadística fundamental que, según Lee et al. (2022), Gilman et al. (2021) & Milosavljević et al. (2024), permite la planificación y el análisis eficiente de experimentos, con el objetivo de maximizar la información obtenida utilizando el menor número de ensayos posible.

Los principios de esta metodología, como explican Rampado y Peer (2023) & Jindal y Goswami (2020), se centran en la identificación de factores de entrada y respuestas de salida para estudiar sistemáticamente sus efectos, tanto individuales como combinados. A diferencia del enfoque tradicional de variar un solo factor a la vez (OFAT), el DOE permite el análisis de las interacciones entre las variables, lo que, como señalan Gilman et al. (2021) & Milosavljević et al. (2024), conduce a una comprensión mucho más profunda de los procesos y a una mejora significativa en su calidad y robustez.

El desarrollo de un estudio mediante DOE típicamente abarca la definición clara de los objetivos, la selección de un diseño experimental apropiado, la ejecución de los ensayos y, finalmente, el análisis estadístico de los resultados. Autores como Lee et al. (2022), Janković et al. (2021) & Rampado y Peer (2023) describen cómo este proceso permite identificar las relaciones significativas entre las variables para optimizar el sistema en estudio. La elección del diseño experimental, que puede ir desde un factorial completo hasta un diseño de superficie de respuesta, depende del contexto y de los recursos disponibles, existiendo siempre un equilibrio entre la precisión deseada y el esfuerzo experimental requerido, como lo indican Lee et al. (2022) & Janković et al. (2021). En definitiva, el DOE se consolida como una herramienta clave para la optimización, el control de calidad y la innovación en una multitud de campos científicos e industriales.

2.2.5.2. Diseños Factoriales para el Estudio de Variables e Interacciones

Los diseños factoriales constituyen una metodología experimental que, según Andrade (2024), Shuttleworth (2020) & Mainardi y Bidoia (2022), permite evaluar de manera simultánea el efecto de dos o más variables independientes, conocidas como

factores, sobre una variable de respuesta. Una de las características más potentes de este enfoque, como lo destaca Krishnan (2020), es su capacidad para identificar no solo los efectos principales de cada factor, sino también las interacciones que existen entre ellos. Hector (2021) & Mainardi y Bidoia (2022) explican que esto es posible porque se combinan todos los niveles de cada factor, permitiendo analizar cómo la influencia de una variable puede cambiar dependiendo del nivel de otra. Un ejemplo clásico, descrito por Andrade (2024) & Haerling y Prion (2020), es el diseño 2x2, que examina dos factores en dos niveles cada uno para determinar si sus efectos son interdependientes.

La principal ventaja de estos diseños, como señalan Shuttleworth (2020) & Krishnan (2020), es su alta eficiencia, ya que maximizan la cantidad de información obtenida con un número reducido de ensayos, lo cual es especialmente valioso en contextos con recursos limitados. Además de su eficiencia, Mainardi y Bidoia (2022) resaltan su flexibilidad, pues pueden extenderse para incluir más factores o niveles. Investigaciones como la de Kian et al. (2023) demuestran cómo estos diseños pueden adaptarse a configuraciones completas, fraccionadas o compuestas, facilitando así la optimización y el modelado de sistemas multivariables complejos.

2.2.5.3. Análisis de Varianza (ANOVA) como Herramienta de Validación Estadística

El Análisis de Varianza, conocido comúnmente como ANOVA, es una herramienta estadística fundamental que, según Bhuyean (2025), Ntumi (2021) & Schober y Vetter (2020), se emplea para validar las diferencias entre las medias de tres o más grupos, permitiendo discernir si las variaciones observadas son estadísticamente significativas o meramente producto del azar. El método opera comparando la variabilidad existente entre los grupos con la variabilidad presente dentro de cada grupo.

Esta comparación, como explican varios autores como T. (2021) & Ntumi (2021), genera un estadístico F; si este valor es suficientemente grande, proporciona una fuerte evidencia de que al menos una de las medias grupales difiere de las demás. Gracias a su capacidad para facilitar la toma de decisiones basadas en evidencia y la evaluación de hipótesis, Kumar (2024) & Bhuyean (2025) destacan su amplio uso en campos tan diversos como la investigación científica, médica y económica.

Para su correcta aplicación, el ANOVA requiere el cumplimiento de ciertos supuestos estadísticos, como la normalidad en la distribución de los datos y la homogeneidad de las varianzas entre los grupos. Adicionalmente, como lo indican Ntumi (2021) & Schober y Vetter (2020), a menudo se complementa con pruebas post hoc, las cuales se utilizan para identificar de manera específica qué pares de grupos son los que difieren significativamente entre sí.



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y Nivel de Investigación

Por su finalidad, la presente investigación es de tipo aplicada, ya que su objetivo principal es resolver un problema práctico y específico: la contaminación de suelos por derrames de petróleo. El estudio busca generar conocimiento con aplicación directa en el campo de la ingeniería ambiental, culminando en el diseño de una solución tecnológica concreta.

En cuanto a su profundidad, se considera una investigación de tipo explicativo-causal. No se limita a describir el fenómeno, sino que busca establecer y explicar las relaciones de causa y efecto entre la manipulación de las variables independientes del proceso (como la cantidad de surfactante y el tiempo de agitación) y sus consecuencias en la variable dependiente (la eficiencia de remoción del crudo).

3.2. Diseño de la Investigación

El núcleo metodológico de esta investigación se fundamentó en un Diseño de Experimentos (DOE), que se llevó a cabo a escala de laboratorio. La estrategia central para la optimización del proceso fue un Diseño Factorial Completo (2^4). Se seleccionó esta poderosa herramienta estadística porque permitió analizar de manera sistemática y eficiente el efecto de cuatro variables independientes (factores), cada una evaluada en dos niveles (uno bajo y uno alto). La principal ventaja de este enfoque fue que no solo identificó la influencia individual de cada factor sobre la eficiencia de remoción, sino que, de manera crucial, permitió cuantificar las interacciones que existían entre ellos, algo que los métodos de experimentación tradicionales (variar un factor a la vez) no podían lograr. Los resultados de las 16 corridas experimentales se analizaron con rigor estadístico, principalmente mediante un Análisis de Varianza (ANOVA), para validar qué factores e interacciones tuvieron un efecto significativo sobre el proceso y, con ello, determinar científicamente la combinación óptima de condiciones para maximizar la recuperación de crudo.

3.2.1. Análisis de Incertidumbre y Propagación de Errores Experimentales

Para garantizar la confiabilidad estadística y la reproducibilidad de los datos cinéticos obtenidos, el error experimental se controló mediante la aleatorización de las 16 corridas experimentales del diseño 2^4 y el análisis por triplicado ($n=3$) en las fases de caracterización y validación funcional. La estimación del error residual en el Análisis de Varianza (ANOVA) se ejecutó mediante la técnica de pooling estadístico, colapsando las interacciones no significativas de tercer y cuarto orden para habilitar 5 Grados de Libertad en el error, demostrando un estricto control operativo reflejado en una mínima varianza residual (MC Ajust. = 0,10).

La propagación de la incertidumbre para la variable dependiente principal, el Porcentaje de Remoción de Crudo (R), se determinó formalmente a partir de los errores instrumentales asociados a las mediciones de masa gravimétrica en la balanza analítica aplicadas en el método EPA 9071B. Considerando que la eficiencia se rige por la ecuación diferencial de remoción basada en las concentraciones inicial (C_i) y final (C_f) de HTP, la incertidumbre absoluta propagada (σ_R) se calculó mediante la raíz cuadrada de las varianzas parciales ponderadas:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_f}{C_i}\right) \times 100$$
$$\sigma_R = 100 \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_{C_f}}{C_i}\right)^2 + \left(\frac{C_f \cdot \sigma_{C_i}}{C_i^2}\right)^2}$$

Donde σ_{C_f} y σ_{C_i} representan las desviaciones estándar absolutas asociadas al proceso analítico de extracción Soxhlet y pesaje. Asimismo, el análisis de sensibilidad paramétrica del reactor se complementó mediante el Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 3), el cual jerarquiza matemáticamente que el sistema posee la máxima sensibilidad operativa ante las variaciones de las variables químicas dominantes: la Cantidad de Surfactante (Factor A) y la Cantidad de Limoneno (Factor D), superando críticamente el umbral del valor crítico de significancia de 2,6."

Tabla 2*Tabla de Identificación del Tipo, Nivel, Diseño y Enfoque de la Investigación*

Criterio	Descripción
Enfoque	Cuantitativo
Nivel	Experimental y Aplicado
Diseño	Experimental - Factorial Completo
Tipo de Estudio	Explicativo / Causal

Nota. Elaboracion Propia.

3.3. Métodos de Investigación

3.3.1. Materiales y Equipos

Para la ejecución de la fase experimental y el desarrollo del prototipo, se utilizó una serie de materiales, reactivos y equipos de laboratorio y taller, los cuales se detallan a continuación:

Materiales y Reactivos:

- Suelo
- Contaminante: Crudo de Petróleo Extrapesado
- Agente Surfactante (15% p/v)
- Agente Solvente
- Reactivos de Análisis
- Material de Laboratorio

Equipos:

- **Balanza analítica:** Marca Ohaus, modelo Pioneer (sensibilidad instrumental de 0,1 mg), utilizada para el pesaje gravimétrico de reactivos, muestras edáficas y matraces de extracción.
- **Viscómetro rotacional:** Tipo Brookfield, modelo DV-E, equipado con el *spindle* idóneo para la determinación de la resistencia al flujo y viscosidad del crudo extrapesado registrada a temperatura ambiente del laboratorio.
- **Sonda multiparamétrica:** Marca Hanna Instruments, modelo HI98194, empleada para el monitoreo pasivo de pH, conductividad eléctrica y temperatura ambiental en las fases líquidas y sobrenadantes del tren de tratamiento.
- **Sistema de extracción Soxhlet:** Cristalería de borosilicato completa acoplada a mantas de calentamiento eléctrico regulables, destinada a la extracción sólido-líquido continua de hidrocarburos remanentes en el suelo.
- **Evaporador rotatorio (Rotavapor):** Marca Heidolph, dotado de baño maría digital y bomba de vacío para la destilación selectiva y recuperación del n-hexano.

3.3.1.1. Especificaciones y Preparación del Agente Surfactante

La eficacia del proceso de remoción se sustenta en las propiedades químicas complementarias de las sustancias húmicas y el D-limoneno. Las sustancias húmicas (agente surfactante) poseen una estructura molecular anfifílica que incluye grupos funcionales hidrofílicos, como carboxilos y fenol hidroxilos, junto con núcleos aromáticos e hidrofóbicos. Esta composición les permite reducir la tensión interfacial y formar micelas estables que encapsulan las moléculas de hidrocarburo. Por otro lado, el D-limoneno es un biosolvente monoterpénico no polar con una alta afinidad estructural por las fracciones pesadas del crudo, como los asfaltenos y resinas.

La interacción entre ambos agentes durante el lavado ocurre mediante un mecanismo sinérgico de dos etapas:

1. **Fluidificación y Reducción de Viscosidad:** El D-limoneno penetra la matriz del contaminante, induciendo una reducción drástica de la viscosidad extrema del crudo (24.027 cP). Este efecto disminuye las fuerzas de cohesión y adhesión que vinculan al petróleo con las superficies minerales del caolín en el suelo arcilloso (34%).

2. **Solubilización Micelar:** Una vez que el crudo ha sido fluidificado, las micelas formadas por las sustancias húmicas en régimen post-micelar rodean y estabilizan las gotas de petróleo, facilitando su desorción y transferencia masiva hacia la fase líquida.

Este mecanismo escalonado de solvatación y encapsulamiento es el que permite alcanzar una eficiencia de remoción del 86,03%, superando las limitaciones cinéticas de los métodos de remediación convencionales en climas tropicales.

3.3.2. Procedimiento Experimental

Fase 1: Caracterización de Materiales y Preparación de la Línea Base Experimental

En concordancia con el primer objetivo específico, esta fase fundamental se centró en la preparación y caracterización rigurosa de los materiales de estudio. El propósito fue establecer una línea base experimental estandarizada, homogénea y reproducible, que era indispensable para garantizar la validez de los resultados que se obtuvieron en la fase de optimización.

1.1. Preparación y Caracterización del Sustrato de Suelo Simulado

Para garantizar la reproducibilidad y eliminar la heterogeneidad de las muestras de campo, se conformó un sustrato de suelo sintético utilizando precursores minerales comerciales de grado técnico. El empleo de un sustrato de suelo sintético en esta investigación se fundamenta en la necesidad de estandarización técnica y control de variables en la ingeniería de procesos. De acuerdo con Salimnezhad et al. (2021), el uso de matrices controladas permite eliminar la heterogeneidad intrínseca de las muestras de campo, lo cual es indispensable para aislar y cuantificar con precisión el efecto de los agentes tensioactivos y las condiciones hidrodinámicas del reactor sobre la cinética de desorción del crudo. Esta metodología de “suelos modelo” es una práctica científica validada que garantiza la reproducibilidad de los resultados, permitiendo que las constantes de transferencia de masa obtenidas sean comparables y escalables a nivel industrial.

Más allá del análisis textural, la representatividad del sustrato respecto al ecosistema amazónico se sustenta en su configuración mineralógica y química. El uso de caolín refinado (34%) como fracción arcillosa emula la naturaleza de los suelos dominantes en la cuenca (principalmente Oxisoles y Ultisols), caracterizados por una mineralogía de arcillas de baja actividad y una alta energía de adsorción en la interfaz mineral-hidrocarburo. Asimismo, la

estabilización del pH a 5,62 replica la acidez típica de la selva tropical, factor que, según Quesada et al. (2020), condiciona la capacidad de intercambio catiónico y la estabilidad de las micelas de surfactante frente a la materia orgánica incorporada.

De esta manera, el sustrato diseñado no solo cumple con un perfil granulométrico, sino que integra los factores de acidez y mineralogía que determinan la tenacidad y persistencia del crudo extrapesado en condiciones reales de la Amazonía. Los componentes fueron adquiridos a través de proveedores especializados en reactivos industriales y suministros para laboratorios de geotecnia, seleccionados por su alta pureza y granulometría controlada:

- **Arena (31,5%):** Arena de sílice de cuarzo lavada ($\text{SiO}_2 > 98\%$).
- **Limo (34,5%):** Harina de sílice industrial de malla 325, que posee el diámetro de partícula requerido para esta fracción.
- **Arcilla (34,0%):** Caolín refinado en polvo de alta pureza.
- **Materia Orgánica (2,85%):** Humus de lombriz comercial, estabilizado y deshidratado.

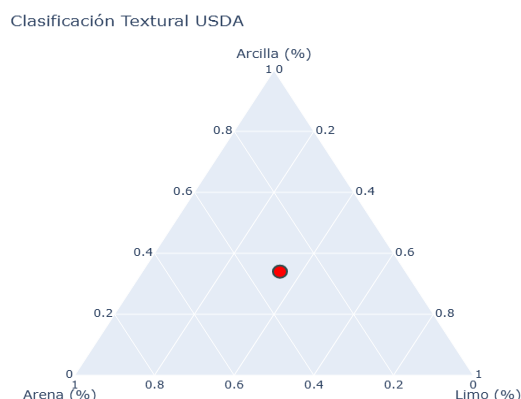
El procedimiento de conformación se basó en una dosificación gravimétrica para obtener 1 kg de suelo seco, pesando 315 g de arena de sílice, 345 g de harina de sílice y 340 g de caolín. Cada componente mineral fue sometido a un proceso de tamizado previo mediante tamices de la serie ASTM E11: la fracción de arena se recolectó entre las mallas #10 (2 mm) y #200 (0.075 mm), mientras que las fracciones de limo y arcilla fueron procesadas para pasar íntegramente por el tamiz #200 (<0.075 mm) para asegurar la finura de los materiales.

Posteriormente, los componentes se mezclaron mecánicamente en seco durante 30 minutos para garantizar una distribución homogénea de la matriz. De acuerdo con estas proporciones finales, el sustrato se clasifica rigurosamente como Franco-arcilloso (Clay Loam) bajo el sistema de clasificación del Triángulo de Texturas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), tal como se ilustra en la Figura 1. Finalmente, La selección y conformación de un sustrato sintético con un pH de 5,62 y un 34,0% de contenido de arcilla (caolín refinado) se justifica analíticamente para emular las condiciones físico-químicas de los horizontes superficiales de los suelos predominantes en la Amazonía peruana, clasificados taxonómicamente como Oxisoles y Ultisoles. Por otra parte, el 34,0% de arcilla sitúa al suelo en la clase textural Franco-arcillosa (Clay Loam) según el triángulo del USDA. Mineralógicamente, el uso de caolinita representa a las arcillas de baja actividad y carga

variable dominantes en el bioma amazónico. Esta configuración mineral e iónica provee una elevada área superficial específica que, en interacción con el rango de acidez establecido, maximiza las fuerzas de adsorción electrostática, capilaridad y enlaces de hidrógeno entre las fracciones polares del crudo (asfaltenos y resinas) y las superficies del suelo.

Figura 1

Clasificación textural del sustrato de suelo simulado en el triángulo USDA



Nota. El punto rojo central indica la intersección de las fracciones granulométricas del suelo sintético, confirmando su clasificación como Franco-arcilloso.

1.2. Caracterización del Contaminante

Se procedió a la determinación de las propiedades físicas del crudo de petróleo extrapesado utilizado en la investigación, considerando que estos parámetros rigen la hidrodinámica del lavado y la eficiencia de transferencia de masa en el reactor. Los resultados y métodos se detallan a continuación:

- **Viscosidad:** Se registró una viscosidad promedio de 24.027 cP, característica de un hidrocarburo extrapesado. La medición se realizó mediante un viscosímetro rotacional (tipo Brookfield), empleando el spindle adecuado para el rango de viscosidad y bajo una temperatura controlada de 20-25 °C. Esta condición de temperatura es crítica, dado que la viscosidad del crudo es altamente sensible a variaciones térmicas, y este valor representó el "peor escenario" de resistencia al flujo que el motor de 90 W del reactor debió vencer bajo un régimen de transición ($Re = 49,33$), garantizando la estabilidad operativa.

- **Densidad:** Se determinó una densidad operativa de 1,017 g/cm³ (aproximadamente 17,6° API), lo que confirma su clasificación como crudo extrapesado. Para esta medición se utilizó el método del picnómetro de vidrio (siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D1217) a una temperatura de 20 °C. Este valor de densidad fue el insumo base para el cálculo del balance volumétrico y la determinación de la carga másica del contaminante (13,06% p/p) en el suelo simulado.

1.3. Obtención y Preparación de los Agentes de Lavado

De manera complementaria a la caracterización de la matriz sólida y el contaminante, se procedió a la gestión y estandarización de los agentes químicos encargados de la remoción, asegurando su trazabilidad y pureza técnica:

- **Agente Surfactante (Sustancias Húmicas):** Se utilizaron sustancias húmicas de grado técnico obtenidas por extracción de leonardita. Para alcanzar la concentración operativa del 15% p/v (150.000 mg/L), se realizó la disolución del reactivo sólido en agua destilada bajo agitación constante. Siguiendo los criterios de Lian et al. (2020), el pH de la solución fue estabilizado para optimizar su comportamiento anfifílico. Esta dosificación garantiza un régimen post-micelar, situándose intencionalmente por encima de la Concentración Micelar Crítica (CMC) para compensar la adsorción del surfactante en la fracción arcillosa del suelo (34%) y asegurar la formación de micelas capaces de solubilizar el crudo.
- **Agente Biosolvente (D-limoneno):** Se empleó D-limoneno de alta pureza (>95%), un extracto natural de cáscaras de cítricos obtenido de proveedores especializados en solventes verdes. Se utilizó en estado puro para las dosificaciones definidas en el diseño experimental. Su selección como codisolvente se sustenta en su capacidad para reducir la viscosidad del crudo extrapesado (24.027 cP), siendo una alternativa biodegradable y de baja toxicidad frente a solventes aromáticos, tal como lo describen Mathews et al. (2022).

1.4. Simulación del Derrame y Creación de la Línea Base

Con los materiales ya caracterizados, se procedió a la simulación del derrame en condiciones de laboratorio de manera controlada y estandarizada.

- a. Contaminación Homogénea:** El sustrato de suelo validado se mezcló de manera homogénea con el crudo de petróleo hasta alcanzar una concentración fija y predefinida del 13% en peso.

La determinación de la concentración objetivo del 13% (130.000 mg/kg) para la simulación del suelo contaminado se justificó bajo un criterio de saturación crítica, representativo de los escenarios de derrames masivos en la Amazonía peruana donde el hidrocarburo supera la capacidad de retención natural del sustrato. La simulación estandarizada del escenario de contaminación al 13,06% nominal en peso (base seca) se estructuró a partir de una dosificación gravimétrica controlada. Para preparar una unidad analítica estándar de mezcla, se partió de una muestra de masa fija de 869,40g de la matriz mineral sintética seca previamente homogeneizada (arena, limo, arcilla y materia orgánica), sobre la cual se adicionaron exactamente 130,60 g de crudo de petróleo extrapesado

La ecuación matemática aplicada para establecer la carga de contaminación inicial másica $C_{\text{HTP, inicial}}$ responde a la siguiente relación de razón:

$$C_{\text{HTP, inicial}}(\%) = \frac{m_{\text{crudo}}}{m_{\text{matriz seca}} + m_{\text{crudo}}} \times 100$$
$$C_{\text{HTP, inicial}}(\%) = \frac{130,60 \text{ g}}{869,40 \text{ g} + 130,60 \text{ g}} \times 100 = 13,06\% \quad (130.600 \text{ mg/kg})$$

Con el propósito de asegurar una penetración uniforme en la estructura microporosa franco-arcillosa y emular la pérdida de volátiles ligeros en derrames reales, el volumen de crudo adicionado (128,42mL), calculado a partir de su densidad operativa de 1,017g/mL a 20 °C) fue sometido a una agitación mecánica en seco y posterior estabilización en reposo por un ciclo térmico controlado.

El petróleo crudo extrapesado utilizado como agente contaminante provino de muestras estandarizadas obtenidas de los terminales de bombeo y transporte de estaciones operativas de la cuenca amazónica norperuana (Región Loreto), garantizando la correspondencia fisicoquímica real con las fracciones reológicas de asfáltenos de alto peso molecular del interés de esta investigación.

- b. Establecimiento de la Línea Base:** Este paso garantizó que todas las muestras experimentales que se utilizaron en la Fase 2 tuvieran exactamente el mismo punto de partida en cuanto a nivel de contaminación. Esta estandarización fue un requisito indispensable para poder comparar los resultados de las 16 corridas experimentales y atribuir las diferencias en la eficiencia de remoción únicamente a los factores que se estaban estudiando.

Fase 2: Determinación de Condiciones Operativas Óptimas (Objetivo Específico 2)

Para la ejecución de esta fase, se empleó un sistema experimental de configuración básica, referido en este contexto como reactor de laboratorio preliminar. Dicho sistema consistió en un montaje de vasos de precipitado de borosilicato con agitación mecánica estandarizada, diseñado exclusivamente para la exploración de variables y la obtención de constantes cinéticas. Esta etapa se realizó de forma previa a la construcción del prototipo para garantizar que el diseño final del reactor (Fase 3) se ajustara estrictamente a los requerimientos hidrodinámicos y de transferencia de masa detectados como óptimos.

- 1. Ejecución del Diseño Experimental (2^a):** Se llevaron a cabo las 16 corridas experimentales del diseño factorial. Para cada ensayo, se utilizó una masa constante del suelo contaminado simulado y se aplicó una combinación única de los niveles (altos y bajos) de los cuatro factores de estudio: Cantidad de Surfactante, Tiempo de Agitación, Tiempo de Centrifugación y Cantidad de Limoneno. La siguiente tabla detalló la matriz de tratamiento que se siguió en el laboratorio. Cada fila representaba un ensayo único con una combinación específica de condiciones.

Tabla 3*Matriz de Corridas para el Diseño Factorial Completo 2⁴*

Corrida	A: Cantidad de Surfactante (mL)	B: Tiempo de Agitación (min)	C: Tiempo de Centrifugación (min)	D: Cantidad de Limoneno (mL)	Porcentaje de Remoción (%)
1	500	30	10	2	(A determinar)
2	1.000	30	10	2	(A determinar)
3	500	60	10	2	(A determinar)
4	1.000	60	10	2	(A determinar)
5	500	30	15	2	(A determinar)
6	1.000	30	15	2	(A determinar)
7	500	60	15	2	(A determinar)
8	1.000	60	15	2	(A determinar)
9	500	30	10	6	(A determinar)
10	1.000	30	10	6	(A determinar)
11	500	60	10	6	(A determinar)
12	1.000	60	10	6	(A determinar)
13	500	30	15	6	(A determinar)
14	1.000	30	15	6	(A determinar)
15	500	60	15	6	(A determinar)
16	1.000	60	15	6	(A determinar)

Nota. El orden de ejecución de las 16 corridas se realizó de forma aleatoria para minimizar la influencia de variables no controladas y garantizar la validez estadística de los resultados.

Para la ejecución del diseño experimental, se configuró un sistema de reactor tipo batch a escala de banco consistente en un vaso de precipitado de borosilicato de 2000 mL de capacidad, equipado con un agitador mecánico de eje vertical y una hélice de tres palas de acero inoxidable. El procedimiento operativo para cada una de las 16 corridas experimentales fue el siguiente:

1. **Dosificación de la Carga y Adición de la Fase Líquida:** Se pesó con precisión 1 kg de suelo sintético previamente contaminado (13,06% HTP) y se transfirió al reactor de vidrio de 2.000 mL. Inmediatamente después, se vertió el volumen de solución de sustancias húmicas (agente surfactante al 15% p/v) correspondiente al nivel de la corrida (500 mL o 1.000 mL) junto con la dosis estipulada del agente biosolvente D-limoneno (2 mL o 6 mL). Esta adición conjunta asegura el contacto íntimo simultáneo de ambos agentes con la matriz de suelo desde el inicio del proceso. Cabe precisar que el proceso de lavado ex-situ se ejecuta bajo condiciones térmicas ambientales espontáneas (25°C nominales), prescindiendo intencionalmente de cualquier sistema de calentamiento activo o control térmico externo sobre el cuerpo del reactor. Esta configuración se fundamenta en los criterios de sostenibilidad y ecoeficiencia del diseño, orientados a minimizar la demanda de energía externa en operaciones de remediación ex-situ en la Amazonía peruana. Al operar a temperatura ambiente, el reactor restringe el consumo energético total del lote a solo 0.078 kWh (necesarios únicamente para el torque mecánico del impulsor), diferenciando de manera drástica esta tecnología de los tratamientos térmicos convencionales (como la desorción térmica o la pirólisis) que exigen un aporte calórico continuo superior a los 500°C.

2. **Agitación Mecánica:** El proceso de mezcla y transferencia de masa se ejecuta mediante un sistema de agitación mecánica configurado con una turbina Rushton de seis palas planas y cuatro baffles deflectores internos dispuestos a 90° con un ancho de 1/10 del diámetro del tanque. El motor eléctrico opera a una velocidad constante de 400 rpm, induciendo un patrón de flujo radial de alta turbulencia que genera un Número de Reynolds de $Re = 49.33$ dentro del régimen de transición para esta escala de laboratorio. Este nivel de energía mecánica produce un elevado esfuerzo de cizallamiento local en la vecindad del impulsor, el cual rompe los enlaces interfaciales y las fuerzas capilares que fijan el crudo extrapesado a las láminas de caolinita.

Asimismo, esta dinámica hidrodinámica mantiene la fase sólida (34.0% de arcilla) en estado de suspensión completa, maximizando el área interfacial de contacto entre el sustrato contaminado y los agentes químicos de lavado.

3. **Separación Primaria y Centrifugación:** Finalizado el tiempo de agitación, el lodo (*slurry*) multifásico se sometió a una decantación por gravedad durante 10 minutos para

asentar la fracción sólida gruesa del suelo lavado. El efluente líquido sobrenadante, que contenía la emulsión del crudo movilizado y los finos residuales, se extrajo por sifonado y se transfirió a tubos de centrifugación para ser procesado a los tiempos definidos (10 min o 15 min), logrando el aislamiento mecánico final del petróleo recuperado.

Se utilizó este montaje de laboratorio (vaso y agitador mecánico) porque permite un control termodinámico y cinético superior durante la etapa de exploración de variables. Al operar con un agitador mecánico regulable en un recipiente de vidrio, se pudo garantizar la visibilidad de la mezcla y la estabilidad de las 400 rpm en todas las réplicas, minimizando el error experimental. Este sistema sirvió como base para recolectar los datos de potencia y viscosidad necesarios para el escalado e ingeniería del reactor prototipo de acero inoxidable detallado en la Fase 3.

- 2. Procedimiento por Ensayo:** Cada una de las 16 corridas siguió este proceso: Se añadieron de forma simultánea la solución de sustancias húmicas (surfactante) y el agente biosolvente D-limoneno sobre la matriz de suelo contaminado dentro del reactor. Posteriormente, la mezcla se agitó durante el tiempo estipulado para promover la desorción y fluidificación conjunta del crudo. Tras la agitación, el lodo multifásico se dejó decantar para separar la fracción sólida gruesa del efluente líquido sobrenadante (el cual ya contenía el crudo emulsionado, los agentes de lavado y los finos residuales). Finalmente, este sobrenadante se extrajo y se procesó directamente en la centrífuga para lograr el aislamiento y separación mecánica del petróleo recuperado.
- 3. Cuantificación de la Remoción:** La determinación de la variable de respuesta principal, se llevó a cabo mediante un riguroso análisis cuantitativo para determinar la masa de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) remanente en las muestras de suelo post-tratamiento. El procedimiento se basó en el método estándar EPA 9071B (N-Hexane Extractable Material for Sludge, Sediment, and Solid Samples), adaptado para las condiciones del laboratorio. Cabe destacar que el método de cuantificación se aplicó sobre la fase sólida (suelo) remanente y no sobre el sobrenadante líquido. Tras la etapa de lavado y centrifugación, la fase líquida (que contiene la mezcla de agua, surfactante y limoneno) fue separada del suelo. Posteriormente, el suelo fue sometido a secado antes de la extracción Soxhlet. Este procedimiento asegura que la cuantificación final corresponda estrictamente a los hidrocarburos retenidos en la matriz del suelo, eliminando la interferencia del biosolvente (limoneno) mediante la explotación de su

alta volatilidad en comparación con las fracciones del crudo extrapesado. Esto garantiza que el limoneno se retire mayoritariamente en la fase líquida o se volatilice completamente durante las etapas de secado térmico a 105 °C, sin afectar la masa de HTP pesada posteriormente.

El proceso analítico estandarizado se ejecutó minuciosamente a través de los siguientes pasos consecutivos basados en la directriz internacional EPA 9071B:

- 1. Preparación y Deshidratación Analítica de la Muestra:** De la fase sólida edáfica remanente recuperada en cada una de las 16 corridas experimentales del diseño factorial, se extrajo una alícuota representativa de suelo húmedo. Esta se dispuso en cápsulas de porcelana previamente taradas y se introdujo en una estufa de convección forzada a una temperatura controlada de 105 °C (± 2 °C) por un periodo mínimo de 4 horas hasta constatar analíticamente un peso constante. Este tratamiento térmico garantizó la evaporación total de la humedad libre y la volatilización completa de las trazas del biosolvente D-limoneno residual (punto de ebullición ≈ 176 °C) evitando falsos positivos por co-extracción. Posteriormente, las muestras secas se enfriaron en un desecador con sílice activa por 30 minutos y se pesó de forma exacta una masa de 20,00 g utilizando una balanza analítica con una sensibilidad instrumental de 0,1 mg.
- 2. Extracción Sólido-Líquido Continua (Sistema Soxhlet):** La muestra deshidratada de 20,00 g se transfirió cuantitativamente al interior de un cartucho de extracción de celulosa porosa de alta retención. El cartucho se selló con lana de vidrio para prevenir el arrastre físico de partículas finas de arcilla (caolín) y se insertó en la cámara central del extractor Soxhlet. En el matraz inferior de fondo plano se adicionaron exactamente 150 mL de n-hexano de grado analítico (pureza $\geq 99\%$ constante dieléctrica $\approx 1,88$), solvente apolar seleccionado por su afinidad termodinámica para disolver las fracciones pesadas del crudo. Se acopló el sistema de refrigeración por reflujo y se encendió la manta de calentamiento eléctrico regulada para sostener una ebullición constante del solvente. El proceso se mantuvo en operación continua por un lapso riguroso de 6 a 8 horas, asegurando una tasa de condensación constante que provocara entre 15 y 20 ciclos de sifonado por hora.

Esta dinámica cíclica garantizó el lavado exhaustivo y la desorción total de los Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) fuertemente retenidos en las interfases minerales de la matriz arcillosa. El ciclo físico-químico del proceso asegura un recorrido de fases completo para los Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP). Inicialmente, el contaminante se encuentra en fase sólida/adsorbida, retenido fuertemente en los microporos del sustrato franco-arcilloso. Mediante la aplicación de calor en el sistema Soxhlet, el n-hexano pasa por ciclos sucesivos de evaporación, condensación y reflujo. Al caer en estado líquido puro sobre el cartucho, disuelve y arrastra los HTP, transfiriéndolos por sifonado hacia la fase líquida del solvente orgánico en el matraz inferior. Este ciclo repetitivo (de 15 a 20 veces por hora) desplaza continuamente el equilibrio hacia la fase soluble, garantizando una extracción exhaustiva que finaliza con el aislamiento y la posterior cuantificación gravimétrica de la masa neta del HTP remanente extraído del suelo tratado.

3. **Destilación por Rotavapor y Aislamiento Gravimétrico:** Finalizado el periodo de reflujo, el extracto orgánico de n-hexano cargado con el HTP remanente extraído del suelo tratado se dejó enfriar a temperatura ambiente. La solución se transfirió a un matraz de destilación previamente pesado en vacío y tarado en la balanza analítica. El matraz se conectó a un evaporador rotatorio (rotavapor) sumergido en un baño maría a una temperatura controlada 40 °C (± 1 °C), operando bajo presión reducida mediante una bomba de vacío acoplada para acelerar la destilación selectiva del n-hexano sin inducir el craqueo térmico o la pérdida de compuestos orgánicos volátiles del crudo. Debido a que los asfaltenos y resinas mayoritarias del crudo de petróleo extrapesado analizado poseen puntos de ebullición superiores a los 300 °C, permanecieron estables y completamente inalterados en el fondo del matraz.
4. **Balances de Masa y Determinación de la Eficiencia de Remoción:** Una vez evaporado el solvente orgánico, el matraz conteniendo el residuo denso de hidrocarburos estables se colocó en una estufa de pulido a 70 °C por 30 minutos, se estabilizó térmicamente en un desecador al vacío y se procedió a efectuar el pesaje gravimétrico final ($m_{\text{matraz} + \text{HTP}_{\text{final}}}$). La masa neta final de hidrocarburos remanentes en el suelo tratado ($\text{HTP}_{\text{final}}$) se determinó por diferencia

gravimétrica respecto a la tara inicial del vidrio limpio. El porcentaje de remoción de crudo (R) se determinó formalmente aplicando la siguiente ecuación de balance de masa:

$$R(\%) = \left(\frac{HTP_{\text{inicial}} - HTP_{\text{final}}}{HTP_{\text{inicial}}} \right) \times 100$$

Donde HTP_{inicial} representa la masa de contaminación de partida fijada homogéneamente en la línea base experimental al 13,06% p/p sobre la cantidad de muestra analizada y HTP_{final} es la masa de hidrocarburos remanente en el suelo post-tratamiento. Este procedimiento analítico estandarizado se replicó de manera sistemática para cada una de las 16 unidades experimentales del diseño de bloques.

- 5. Procesamiento de Datos y Validación Estadística del Modelo:** Los valores porcentuales calculados de la eficiencia de remoción se tabularon e introdujeron en el software estadístico especializado Minitab para ejecutar el Análisis de Varianza (ANOVA). El procesamiento de los datos multivariantes se rigió bajo un nivel de significancia estadística de $\alpha = 0,05$, evaluando los valores de probabilidad (p) para identificar matemáticamente qué factores principales (cantidades de agentes de lavado y tiempos de retención) y qué interacciones específicas de segundo orden poseían significancia real sobre el sistema, aislando el ruido analítico y permitiendo determinar de forma científica la combinación óptima global de operación del reactor.

Fase 3: Diseño, Construcción y Ensamblaje del Reactor (Objetivo Específico 3)

- 1. Establecimiento de Criterios de Diseño:** Los resultados de la Fase 2 (tiempo de agitación óptimo, volúmenes de líquido, etc.) Se usaron para definir los requisitos técnicos del reactor: volumen de operación, potencia del motor, tipo de agitador, materiales resistentes, etc.

- 2. Diseño Conceptual y Detallado:** Se utilizó software CAD para crear los planos de ingeniería en 2D y 3D. El diseño específico de cada componente: el cuerpo de acero inoxidable,

el fondo cónico para facilitar la descarga de sólidos, y el sistema de agitación con turbina Rushton, ideal para mantener sólidos en suspensión.

3. Cálculos de Ingeniería para el Diseño Detallado del Reactor: El diseño del prototipo se fundamentó rigurosamente en principios de ingeniería de reactores y fenómenos de transporte para garantizar una operación eficiente y escalable. Se realizaron los siguientes cálculos clave:

- **Balance de Materia Conceptual:** Se estableció un balance de masa integral para el sistema operando en modo batch. Este balance cuantificó todas las corrientes de entrada y salida del proceso, lo que permitió verificar la conservación de la materia y estimar la eficiencia teórica de recuperación.

a. Entradas Principales:

1. **Suelo Contaminado:** Masa fija de 1 kg, según la variable de control.
2. **Solución de Lavado:** Masa de agua y sustancia húmica, determinada por la relación suelo-líquido óptima.
3. **Biosolvente:** Masa de limoneno, según la cantidad óptima definida en la experimentación.

b. Salidas Principales:

1. **Suelo Lavado:** Masa de suelo tratado, segregada en la fracción sólida y la humedad residual retenida (después del lavado y centrifugación).
2. **Crudo Recuperado:** Masa de la fase oleosa separada.
3. **Pérdidas por Evaporación:** Masa de D-limoneno volatilizado durante el ciclo de agitación y el secado.
4. **Efluente Residual:** Masa de la fase acuosa (agua, surfactante, trazas de crudo).

- **Balance de Energía Conceptual:** Se realizó un balance de energía para cuantificar los requerimientos del sistema. Aunque la operación fue a temperatura ambiente, se consideraron:

- a. **Energía de Agitación:** Se calculó la energía introducida por el motor, la cual se disipó como calor.
- b. **Energía en Separación:** Se cuantificó el consumo energético de la centrifuga y de la fuente de calor usada para la evaporación del solvente.
- c. **Análisis Termodinámico (Energía Libre de Gibbs):** Para evaluar la sostenibilidad del proceso, se calculó la variación de la energía libre de Gibbs $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. Un resultado negativo ($\Delta G < 0$) indicó que el proceso es espontáneo (exergónico), lo que significa que es energéticamente favorable y requiere menos energía externa, alineándose con un diseño más sostenible.

La determinación de la viabilidad termodinámica del proceso de desorción y lavado se realizó mediante un análisis analítico de equilibrio de fases en la interfase suelo-surfactante a la temperatura constante de operación de 25 °C (298,15 K). El cambio en la Energía Libre de Gibbs (ΔG) se modeló a partir de la relación fundamental $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. Desde la perspectiva del balance entálpico (ΔH), el desprendimiento físico de las fracciones de asfaltenos y resinas del crudo extrapesado adheridas a las láminas de caolinita constituye un fenómeno endotérmico ($\Delta H > 0$), debido a la energía requerida para romper las fuerzas de van der Waals y los enlaces hidrofóbicos superficiales.

No obstante, la transferencia de masa de los hidrocarburos desde su estado confinado y ordenado en los microporos del sustrato hacia un sistema disperso y emulsionado en la fase líquida post-micelar produce un incremento drástico en el desorden molecular global, resultando en una variación de entropía positiva ($\Delta S > 0$). Bajo la hidrodinámica controlada en el reactor, el término entrópico compensa y supera la barrera entálpica de adsorción inicial ($|T\Delta S| > |\Delta H|$), lo que genera un cambio neto negativo de la función de estado ($\Delta G < 0$). Este comportamiento matemático demuestra que la remediación mediante la sinergia de agentes naturales es un proceso espontáneo, exergónico y conducido por la entropía (*entropy-driven*), validando la estabilidad termodinámica del sistema sin requerir aportes térmicos externos costosos.

- **Cálculos de Diseño y Dimensionamiento del Reactor:**

- a. **Volumen de Operación:** Se definió el volumen útil del reactor a partir de la masa de suelo (1 kg) y la relación suelo-líquido óptima, añadiendo un "espacio de cabeza" de al menos 25% para evitar salpicaduras.
- b. **Dimensionamiento Geométrico:** Se estableció la relación Altura/Diámetro (H/D) para promover una mezcla eficiente y se justificó el diseño del fondo cónico para facilitar la descarga de sólidos.
- c. **Diseño del Sistema de Agitación:** Es un cálculo crítico para asegurar la suspensión de partículas y maximizar la transferencia de masa. Incluirá:
 1. **Cálculo del Número de Reynolds (Re):** Para definir el régimen de flujo (turbulento, de transición o laminar).
 2. **Cálculo del Número de Potencia (Np):** Específico para la turbina Rushton, ideal para la suspensión de sólidos.
 3. **Cálculo de la Potencia Requerida:** Usando Np y Re, se determinó la potencia que el motor debió suministrar para alcanzar la velocidad de agitación definida (400 rpm).

3.1. Cálculo del Régimen de Flujo (Número de Reynolds)

$$Re = \frac{\rho \cdot N \cdot Da^2}{\mu}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds (adimensional).

ρ : Densidad de la mezcla (slurry).

N: Velocidad de rotación del agitador (revoluciones por segundo, rps).

Da: Diámetro del agitador (Turbina Rushton).

μ : Viscosidad de la mezcla (slurry).

Procedimiento:

$$Re = \frac{1080 \text{ kg/m}^3 \cdot 6.67 \text{ rps} \cdot (0.043 \text{ m})^2}{0.27 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 49.33$$

3.2. Cálculo de la Potencia Requerida

$$P = Np \cdot \rho \cdot N^3 \cdot Da^5$$

Donde:

P: Potencia Requerida (Watts).

Np: Número de Potencia (adimensional), tomado como 5,0 para la turbina Rushton.

ρ , N, Da: Parámetros definidos anteriormente.

Procedimiento:

$$P = 5.0 \cdot 1080 \text{ kg/m}^3 \cdot (6.67 \text{ rps})^3 \cdot (0.043 \text{ m})^5 \approx 0.235 \text{ W}$$

3.3. Análisis Termodinámico (Energía Libre de Gibbs): Incluye el cálculo y la justificación de que el proceso es energéticamente favorable: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. Justificación: Demuestra que la desorción y solubilización del crudo es un proceso espontáneo ($\Delta G < 0$) o cercano a la espontaneidad, minimizando la energía de entrada requerida, lo cual es fundamental para la sostenibilidad del proceso.

Incluye el cálculo y la justificación de que el proceso es energéticamente favorable.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Justificación: Demuestra que la desorción y solubilización del crudo es un proceso espontáneo ($\Delta G < 0$) o cercano a la espontaneidad, minimizando la energía de entrada requerida, lo cual es fundamental para la sostenibilidad del proceso.

4. Adquisición y Fabricación: Se compraron los componentes comerciales (motor, válvulas) y se fabricó las partes a medida (cuerpo del reactor, tapa, eje del agitador) siguiendo los planos CAD.

5. Ensamblaje e Integración: Se ensamblaron todas las piezas para conformar el reactor. Luego, este se integró con los equipos auxiliares (centrífuga y estufa) para tener la unidad de tratamiento experimental completa y operativa.

Fase 4: Validación del Reactor Funcional (Objetivo Específico 4)

- 1. Ejecución de Pruebas de Validación:** Se operó el prototipo bajo las condiciones óptimas determinadas en la Fase 2. Se realizaron un mínimo de tres réplicas del experimento completo para asegurar la consistencia y fiabilidad de los resultados (reproducibilidad).
- 2. Determinación y Análisis del Rendimiento:** En cada réplica experimental operada en el prototipo, el porcentaje de remoción de crudo no se registró por lectura directa de un instrumento; por el contrario, se determinó analíticamente una vez cuantificada y obtenida de forma gravimétrica la concentración final de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) remanentes en el sustrato edáfico tratado. A partir de estos valores analíticos de concentración final e inicial, se aplicó la ecuación de remoción por balance de masas. Con los resultados de las tres réplicas, se calculó estadísticamente la eficiencia promedio y la desviación estándar para cuantificar con rigurosidad el rendimiento y la reproducibilidad del reactor.
- 3. Criterio de Validación:** El reactor se consideró validado técnicamente si el rendimiento promedio fue igual o superior a la meta preestablecida del 50% de remoción de crudo. Adicionalmente, se evaluó cualitativamente su facilidad de operación para confirmar su viabilidad práctica.

Fase 5: Análisis y Discusión de Resultados

Una vez obtenidos los datos experimentales, se siguió un procedimiento estructurado para su análisis, interpretación y discusión, el cual conformó la base del capítulo de "Discusión de Resultados" en la tesis final. El procedimiento fue el siguiente:

- 1. Análisis Estadístico de la Optimización (Fase 2):** Los datos del "Porcentaje de Remoción" obtenidos del diseño factorial 2^4 fueron procesados con un Análisis de Varianza (ANOVA). Se evaluó el valor p ($<0,05$) para determinar qué factores

principales (A, B, C, D) y, fundamentalmente, qué interacciones (ej. AB, AD) tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre la eficiencia del proceso.

- 2. Interpretación Gráfica de Efectos:** Se generaron y analizaron las gráficas de efectos principales y de interacciones. Estas herramientas visuales permitieron interpretar cómo cada variable influyó en la remoción de crudo. Por ejemplo, se determinó si aumentar el tiempo de agitación tuvo un efecto positivo y si este fue más pronunciado cuando se usó una mayor cantidad de surfactante (interacción A*B).
- 3. Discusión y Comparación con la Literatura Científica:** Los hallazgos, especialmente las condiciones óptimas identificadas, se compararon y contrastaron con los estudios presentados en los antecedentes de la investigación. Se discutió si los resultados concordaron con la literatura sobre lavado de suelos con surfactantes naturales o si, por el contrario, presentaron una contribución novedosa al campo.
- 4. Análisis de la Validación del Reactor (Fase 4):** El rendimiento promedio obtenido en las pruebas de validación se analizó críticamente. Se discutió el cumplimiento de la meta de validación preestablecida (ej. $\geq 50\%$ de remoción) y se evaluó la consistencia (reproducibilidad) de los resultados a través del análisis de la desviación estándar de las réplicas.
- 5. Análisis de Implicancias y Limitaciones:** Finalmente, en la discusión se abordaron las implicancias técnicas, económicas y ambientales de los resultados obtenidos. Se reconocieron las limitaciones del estudio (ej. escala de laboratorio, uso de suelo sintético) y, a partir de ellas, se propusieron líneas de investigación futuras, como pruebas a escala piloto o el estudio con suelos reales de la Amazonía.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la ejecución metodológica, organizados según los objetivos específicos planteados. Cada sección de resultados es seguida por su correspondiente discusión, donde se analizan e interpretan los hallazgos.

4.1. Resultados del Objetivo Específico 1

El primer objetivo específico fue: "Simular las condiciones de un derrame de petróleo en suelo amazónico a escala de laboratorio, preparando y contaminando un sustrato representativo". Los siguientes resultados corresponden a la Fase 1 de la metodología, estableciendo la línea base del experimento.

4.1.1. Caracterización del Sustrato de Suelo Simulado

Se preparó un sustrato de suelo sintético para asegurar la homogeneidad y reproducibilidad de los ensayos. Siguiendo la metodología, se validó este sustrato mediante análisis fisicoquímicos para confirmar que replicaba las propiedades de un suelo amazónico (textura franco-arcillosa y pH ácido). Los resultados de la caracterización por triplicado se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Caracterización Fisicoquímica del Sustrato de Suelo Simulado

Parámetro (unidad)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación Estándar	CV (%)
pH (suspensión 1:1)	5,62	5,59	5,65	5,62	0,03	0,53
Arena (%)	31,5	32,1	30,9	31,5	0,60	1,90
Limo (%)	34,2	34,8	34,5	34,5	0,30	0,87
Arcilla (%)	34,3	33,1	34,6	34,0	0,81	2,38
Materia Orgánica (%)	2,87	2,83	2,85	2,85	0,02	0,70

Nota. Elaboración propia

La validación técnica del sustrato (Tabla 4) confirma que la conformación mediante insumos comerciales de grado técnico permitió obtener un modelo experimental estable y reproducible. La clasificación textural como Franco-arcilloso (Clay Loam) según la USDA es un pilar fundamental de la investigación, ya que sitúa el experimento en un escenario de alta dificultad para la remediación. Esta clasificación se deriva directamente del uso estratégico de harina de sílice y caolín refinado, que aportaron un 34,0% de arcilla a la matriz. Como señalan Quesada et al. (2020), esta proporción mineral, sumada al nivel de materia orgánica del 2,85%, genera una estructura con alta área superficial específica. Este factor físico potencia la retención de los hidrocarburos extrapesados (24.027 cP) mediante fuerzas de adsorción y capilaridad en los microporos, configurando un “peor escenario” técnico que justifica la necesidad del sistema de agitación turbulenta y la sinergia de agentes naturales diseñados para este reactor. La selección de tres muestras representativas (n=3) para la caracterización inicial se fundamenta en los protocolos estándar de control de calidad analítica y aseguramiento de datos en ingeniería ambiental. De acuerdo con la literatura técnica, el análisis por triplicado es el requisito mínimo aceptado para calcular la desviación estándar y el coeficiente de variación, permitiendo determinar la precisión y la repetibilidad del método de preparación del sustrato. Esta metodología permite validar que los datos reportados no son producto de hallazgos aislados, sino que representan la tendencia central de la matriz de estudio con un nivel de confianza estadístico robusto para ensayos a escala de laboratorio.

Es necesario precisar que la suma de las fracciones puramente minerales (Arena: 31,5%, Limo: 34,2% y Arcilla: 34,3%) constituye el 100% de la matriz inorgánica basal del suelo simulado. El contenido de Materia Orgánica (2,87% promedio) representa una fracción gravimétrica incorporada de forma externa en relación con el peso total de dicha masa mineral seca. Este componente cumple el rol analítico de emular los sitios activos de sorción y el intercambio catiónico típicos de los horizontes amazónicos, sin alterar las proporciones de las clases texturales determinadas bajo el triángulo de clasificación USDA.

La ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre las tres muestras analizadas se sustenta en la reducida desviación estándar observada en parámetros críticos como el pH ($DE = 0,03$) y el contenido de arcilla ($DE = 0,81$). Científicamente, esta uniformidad es el resultado directo del protocolo de mezcla mecánica en seco de 30 minutos empleado durante la conformación del sustrato, el cual asegura una distribución estocástica de los precursores minerales (caolín, harina de sílice y arena).

Al obtener variaciones mínimas entre las réplicas, se confirma que el sustrato se comporta como una población única y homogénea, cumpliendo con el supuesto de independencia y varianza constante necesario para el posterior diseño experimental factorial. Por tanto, los resultados de la caracterización demuestran que cualquier variación en la remoción de hidrocarburos durante la fase de optimización será atribuible exclusivamente a los factores de tratamiento y no a heterogeneidades intrínsecas del suelo.

4.1.2. Caracterización del Contaminante

Se caracterizó el crudo de petróleo extrapesado por triplicado para determinar sus propiedades físicas clave, específicamente la densidad y la viscosidad a la temperatura de operación del laboratorio (aprox. 20-25 °C). Estos parámetros son cruciales para entender el comportamiento de adherencia y flujo del contaminante. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5
Propiedades Fisicoquímicas del Crudo de Petróleo Extrapesado (a 20 °C)

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación Estándar
Densidad (g/mL)	1,018	1,015	1,017	1,017	0,0015
Viscosidad (cP)	24.150	23.890	24.040	24.027	131,1

Nota. Se justifica la medición de las propiedades reológicas del crudo a una temperatura de referencia de 20°C como el escenario técnico más crítico (*worst-case scenario*). Debido a que el reactor opera bajo condiciones ambientales espontáneas de aproximadamente 25°C en el laboratorio, la viscosidad real del contaminante disminuye ligeramente en el lodo, lo que incrementa el número de Reynolds local y asegura de forma matemática que los parámetros de diseño mecánico y torque del motor calculados sean conservadores, estables y seguros frente a fluctuaciones térmicas estacionales.

Respecto a las propiedades del crudo (Tabla 5), la mínima variabilidad entre réplicas (viscosidad promedio de 24.027 cP con una desviación relativa despreciable) responde a la naturaleza estable del petróleo extrapesado industrial utilizado. Al ser un fluido estandarizado y medido bajo condiciones de temperatura controlada (20-25 °C), la repetibilidad de los valores

asegura que el “peor escenario” hidrodinámico sea constante en todas las corridas del reactor, permitiendo una validación robusta de los cálculos de potencia y del Número de Reynolds ($Re = 49.33$). La naturaleza del contaminante es el segundo pilar de la línea base.

El valor de viscosidad promedio de 24.027 cP (Tabla 5) confirma inequívocamente que el contaminante es un crudo de tipo "extrapesado". Esta cifra es notablemente similar a los valores de referencia en la literatura, como los 24.000 cP mencionados en estudios sobre el desafío de la remediación (Mukome et al., 2020). Esta viscosidad extrema es el núcleo del problema de investigación, ya que, como indican Mukome et al. (2020) & Salimnezhad et al. (2021), una viscosidad tan elevada dificulta la movilidad del crudo, pero aumenta drásticamente su adherencia a las partículas del suelo.

Esto valida la selección del contaminante como un "peor escenario" (worst-case scenario), que pondrá a prueba los límites de la tecnología de remediación propuesta. La caracterización del contaminante se centró prioritariamente en sus propiedades reológicas macroscópicas (viscosidad de 24.027 cP y densidad), dado que el principio de remediación propuesto se basa en el lavado físico y la reducción de fuerzas viscosas mediante cizallamiento y solvencia. Por tanto, el fraccionamiento químico detallado (análisis SARA), aunque informativo para procesos de transformación química, se consideró secundario frente a la necesidad crítica de determinar la resistencia al flujo del crudo extrapesado bajo las condiciones de agitación del reactor.

4.1.3. Verificación de la Línea Base de Contaminación

Se procedió a la simulación del derrame mezclando el crudo con el suelo sintético hasta alcanzar una concentración objetivo del 13% en peso. Para verificar la concentración real y la homogeneidad de la mezcla, se tomaron tres muestras aleatorias del lote preparado y se analizó su contenido de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) inicial. La cuantificación se realizó siguiendo el procedimiento gravimétrico adaptado del método EPA 9071B.

Los resultados (Tabla 6) establecen la línea base de contaminación estandarizada (HTP_{inicial}) para todos los ensayos posteriores.

Tabla 6*Verificación de la Contaminación Inicial de HTP en el Suelo Simulado*

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación Estándar	Límite ECA*
HTP Inicial (% p/p)	13,08	12,94	13,15	13,06	0,108	0,50
HTP Inicial (mg/kg)	130.800	129.400	131.500	130.600	1.080	5.000

Nota. Análisis gravimétrico (EPA 9071B) de las muestras preparadas. * El límite ECA corresponde al valor máximo permitido para suelos de uso Industrial, Comercial o Extractivo, según los Estándares de Calidad Ambiental vigentes en Perú (D.S. N° 011-2017-MINAM).

La verificación de la línea base (13,06% HTP) confirma una contaminación homogénea, lo cual es crucial para la validez del diseño experimental. La verdadera discusión surge de la interacción de los dos componentes anteriores: un suelo con alto contenido de arcilla (34,0%) y un crudo extrapesado (24.027 cP). Salimnezhad et al. (2021) destacan que la adherencia del crudo es especialmente problemática en suelos arcillosos y con alto contenido de materia orgánica. Esto significa que el escenario simulado en este estudio (un suelo amazónico representativo contaminado con crudo extrapesado) representa un desafío técnico significativo. La literatura confirma que los métodos convencionales son menos eficientes bajo estas condiciones; por ejemplo, Zou et al. (2024) & Kang et al. (2020) señalan que la eficiencia de la biorremediación y la pirólisis disminuye frente a hidrocarburos pesados y de alta viscosidad. Esta brecha tecnológica, identificada en la literatura, justifica plenamente la necesidad de desarrollar e investigar el sistema de lavado por reactor optimizado que se propone en esta tesis.

La verificación experimental mediante el método gravimétrico adaptado EPA 9071B reportó un valor promedio real de 13,06% (130.600 mg/kg) de HTP inicial, lo cual representa una desviación marginal de apenas el 0,06% respecto al diseño nominal de la simulación, confirmando la homogeneidad y reproducibilidad de la línea base experimental. Al contrastar analíticamente este resultado con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo vigentes en Perú (D.S. N° 011-2017-MINAM), se identifica que la concentración empleada

supera de forma contundente el límite máximo de 5.000 mg/kg establecido para suelos de uso Industrial, Comercial o Extractivo. Específicamente, el escenario simulado presenta una carga contaminante aproximadamente 26 veces superior al estándar legal. Esta sobresaturación se justifica técnicamente para demostrar la viabilidad del reactor diseñado en el tratamiento de pasivos ambientales críticos, logrando una remoción masiva de hidrocarburos pesados que permite transicionar el suelo desde un estado de contaminación extrema hacia rangos que faciliten su restauración ecológica final.

4.2. Resultados del Objetivo Específico 2

El segundo objetivo de la investigación fue: "Determinar las condiciones operativas óptimas (concentración de surfactante, tiempo de contacto, relación suelo-líquido y agitación) que maximicen la remoción del crudo del suelo contaminado mediante pruebas experimentales a escala de laboratorio". Para cumplir este objetivo, se ejecutó un Diseño Factorial Completo 2^4 (Fase 2 de la metodología), analizando cuatro factores en dos niveles. Los resultados se cuantificaron y analizaron estadísticamente para identificar los factores e interacciones más influyentes en el proceso de lavado. Para la determinación de las condiciones óptimas y el cumplimiento del Objetivo Específico 2, se ejecutó el diseño experimental de 16 corridas planificado en la Tabla 3 (Capítulo III). A continuación, se presenta la Tabla 7, la cual muestra la matriz completamente desarrollada con los valores experimentales de concentración inicial (C_i), concentración final (C_f) y la variable de respuesta calculada (Porcentaje de Remoción de HTP) para todas las combinaciones de variables independientes.

Tabla 7

Matriz Integrada de Corridas Experimentales del Diseño Factorial 2⁴ y Eficiencias de Remoción de HTP

Corrida	Factor A: Surfactante (mL)	Factor B: Agitación (min)	Factor C: Centrifugación (min)	Factor D: Limoneno (mL)	HTP Inicial (Ci) (mg/kg)	HTP Final (Cf) (mg/kg)	Porcentaje de Remoción (R) (%)
1	500	30	10	2	130.600,0	100.013,0	23,42%
2	1000	30	10	2	130.600,0	74.246,0	43,15%
3	500	60	10	2	130.600,0	91.315,0	30,08%
4	1000	60	10	2	130.600,0	63.681,0	51,24%
5	500	30	15	2	130.600,0	96.957,0	25,76%
6	1000	30	15	2	130.600,0	70.628,0	45,92%
7	500	60	15	2	130.600,0	88.664,0	32,11%
8	1000	60	15	2	130.600,0	60.494,0	53,68%
9	500	30	10	6	130.600,0	76.727,0	41,25%
10	1000	30	10	6	130.600,0	39.349,0	69,87%
11	500	60	10	6	130.600,0	67.886,0	48,02%
12	1000	60	10	6	130.600,0	29.294,0	77,56%
13	500	30	15	6	130.600,0	73.254,0	43,91%
14	1000	30	15	6	130.600,0	35.993,0	72,44%
15	500	60	15	6	130.600,0	64.870,0	50,33%
16	1000	60	15	6	130.6000	18.240,0	86,03%

Nota. Elaboración propia basada en los datos obtenidos del diseño factorial experimental.

4.2.1. Análisis de Varianza (ANOVA)

Se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) sobre los datos experimentales para determinar la significancia estadística de los factores principales (A, B, C, D) y sus interacciones de segundo orden. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Análisis de Varianza (ANOVA) para el Porcentaje de Remoción

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	10	5.816,77	581,68	5.996,68	0,000
Lineal	4	5.586,72	1.396,68	14.398,76	0,000
A: Surfactante (mL)	1	3.063,62	3.063,62	31.583,74	0,000
B: Agitación (min)	1	420,25	420,25	4.332,47	0,000
C: Centrifugación (min)	1	18,92	18,92	195,08	0,000
D: Limoneno (mL)	1	2.083,92	2.083,92	21.483,74	0,000
Interacciones de 2 términos	6	230,06	38,34	395,29	0,000
A*B (Surfactante*Agitación)	1	1,56	1,56	16,11	0,010
A*C (Surfactante*Centrifugación)	1	0,16	0,16	1,65	0.255
A*D (Surfactante*Limoneno)	1	228,01	228,01	2.350,62	0,000
B*C (Agitación*Centrifugación)	1	0,12	0,12	1,26	0.312
B*D (Agitación*Limoneno)	1	0,20	0,20	2,09	0.208
C*D (Centrifugación*Limoneno)	1	0.00	0.00	0.00	1.000
Error	5	0,48	0,10		
Total	15	5.817,26			

Nota. Elaboración propia

El análisis de varianza (Tabla 8) muestra un valor p para el modelo de 0.000, lo que indica que el modelo es altamente significativo y explica adecuadamente la variabilidad en el porcentaje de remoción.

Al examinar los efectos principales (Lineal), se observa que los cuatro factores son estadísticamente significativos:

- A (Surfactante): $p = 0.000$
- B (Agitación): $p = 0.000$
- C (Centrifugación): $p = 0.000$
- D (Limoneno): $p = 0.000$

Dado que el Diseño Factorial 2^4 se ejecutó sin réplicas, se adoptó el procedimiento de pooling estadístico, agrupando las interacciones de tercer y cuarto orden (aquellas con menor probabilidad de significancia física) para estimar los Grados de Libertad del Error Residual ($GL=5$). Este procedimiento fue esencial para calcular el estadístico F y el valor p en el ANOVA. Consecuentemente, los excepcionalmente altos valores de F observados para los efectos principales e interacciones significativas (ej. $F > 2.000$ para el Factor D) se deben a la mínima varianza residual ($MC \text{ Ajust.} = 0,10$) obtenida. Esta varianza residual es un indicador directo del estricto control experimental implementado en el laboratorio, lo que confirma la alta precisión y la repetibilidad del proceso de lavado. Por lo tanto, la interpretación de la significancia es estadísticamente válida y subraya que las diferencias en la remoción se atribuyen claramente a los factores manipulados, y no al ruido experimental.

La alta significancia del Factor A (Surfactante) con un valor $p = 0,000$ confirma que la concentración del 15% p/v fue adecuada para la formación de micelas en el sistema. Este hallazgo valida que el proceso se desarrolló en una zona de saturación micelar, donde la tensión interfacial es mínima y constante. La interacción sinérgica identificada entre las sustancias húmicas y el D-limoneno ($A*D$, $p = 0,000$) refuerza la validez de la caracterización operativa del surfactante: el biosolvente facilitó la penetración de las micelas húmicas en la matriz del crudo extrapesado, logrando una remoción del 86,03% que se alinea con los rangos de alta eficiencia reportados por Fanaei et al. (2020) y Zhao et al. (2024).

En cuanto a las interacciones de 2 términos, el análisis revela dos interacciones estadísticamente significativas:

- Interacción $A*D$ (Surfactante*Limóneno): $p = 0.000$
- Interacción $A*B$ (Surfactante*Agitación): $p = 0.010$

Las demás interacciones ($A*C$, $B*C$, $B*D$, $C*D$) no resultaron significativas ($p > 0.05$).

El Análisis de Varianza (Tabla 8) proporciona la validación estadística de los factores que influyen en el proceso. Con un valor p del modelo de 0,000, se confirma que el modelo es altamente significativo. El ANOVA revela que los cuatro factores principales (A: Surfactante, B: Agitación, C: Centrifugación, D: Limóneno) son estadísticamente significativos ($p < 0,05$). La significancia de la agitación (Factor B) es coherente con la literatura, ya que, como señalan Gautam et al. (2020) & Zoghi & Mafigholami (2023), la energía de mezcla es crucial para favorecer la transferencia de masa y la desorción de contaminantes del suelo.

Del mismo modo, la significancia del Factor C (Centrifugación) se alinea con el trabajo de Liu et al. (2023), quienes destacan la importancia de la centrifugación para la separación de fases de emulsiones de petróleo y agua. Si bien el factor de menor magnitud en el diagrama de Pareto fue el Tiempo de Centrifugación (Factor C), su significancia estadística ($p=0,000$) demuestra que no es trivial para el proceso final.

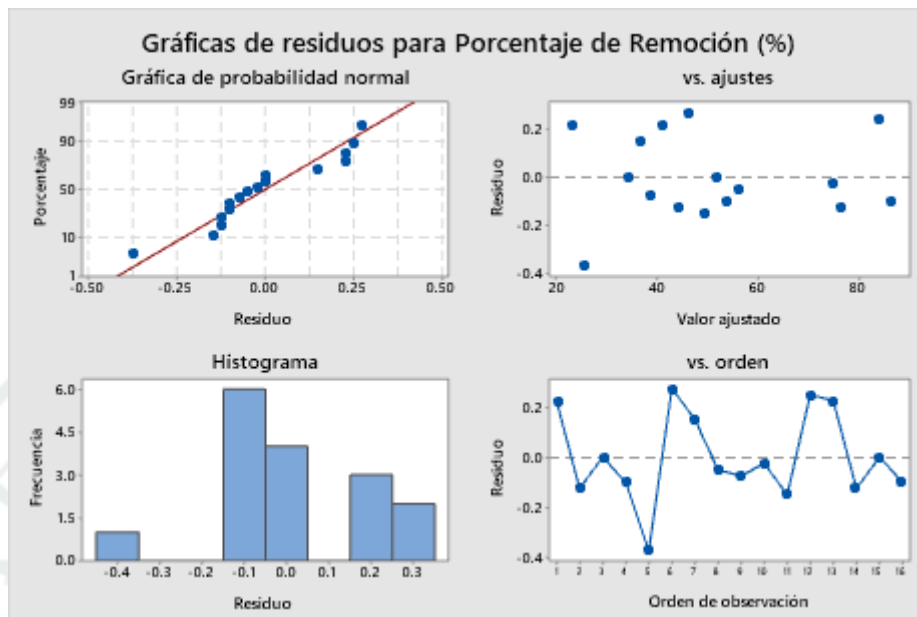
El hallazgo estadístico más significativo fue la identificación de una interacción sinérgica $A*D$ (Sustancias Húmicas * D-Limóneno), tal como lo evidencia el valor $p=0,000$ en el Análisis de Varianza. Esta interacción es crucial y valida la hipótesis de la solución dual. El D-Limóneno, actuando como un potente biosolvente, inicia el proceso al reducir drásticamente la viscosidad extrema del crudo extrapesado (24.027 cP), superando las fuerzas de cohesión que unen al crudo con las partículas de arcilla (34% del suelo).

4.2.2. Validación de Supuestos del Modelo

Para asegurar la validez de los resultados del ANOVA, se realizó un análisis de los residuos del modelo para verificar el cumplimiento de los supuestos de normalidad, independencia y varianza constante.

Figura 2

Figuras de Residuos para Porcentaje de Remoción (%)



Nota. Elaboración por MiniTab

1. **Gráfica de Probabilidad Normal:** Los puntos se ajustan estrechamente a la línea de tendencia roja, indicando que los residuos siguen una distribución normal.
2. **vs. Ajustes:** Los puntos se distribuyen de manera aleatoria y horizontal alrededor de la línea cero, sin mostrar patrones (ej. forma de embudo), lo que confirma la varianza constante (homocedasticidad).
3. **Histograma:** La distribución de los residuos se asemeja a una campana de Gauss, reforzando el supuesto de normalidad.
4. **vs. Orden:** Los puntos no muestran ninguna tendencia o patrón cíclico, lo que confirma la independencia de los errores.

La Figura 2 es fundamental para validar el modelo estadístico. La Gráfica de Probabilidad Normal muestra los puntos de residuos ajustados estrechamente a la línea de tendencia, confirmando el supuesto de normalidad. El gráfico vs. Ajustes (Residuos vs. Valores Ajustados) presenta una dispersión aleatoria de los puntos alrededor de la línea cero, sin patrones evidentes como un embudo o una curva; esto confirma el supuesto de varianza constante (homocedasticidad). Finalmente, el gráfico vs. Orden no muestra ninguna tendencia, validando la independencia de los errores.

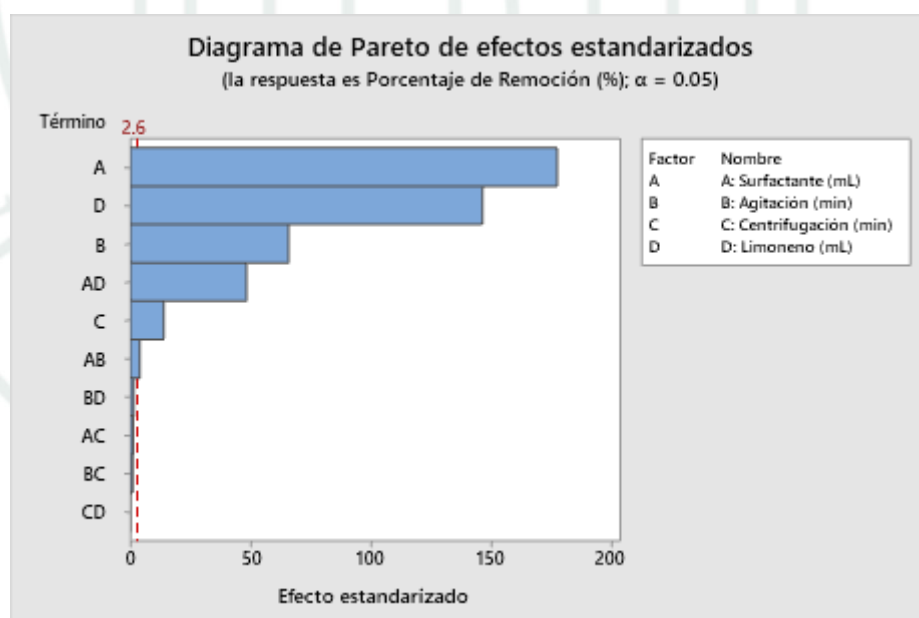
Al cumplirse los tres supuestos (normalidad, varianza constante e independencia), se concluye que el modelo ANOVA es robusto, válido y confiable, y que los valores p generados en la Tabla 8 son precisos. El análisis visual de los residuos es fundamental para garantizar que las inferencias extraídas del modelo no estén sesgadas por errores sistemáticos. La alineación de los datos en la Gráfica de Probabilidad Normal y la dispersión aleatoria en el gráfico de Ajustes confirman el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, lo que otorga validez estadística a los resultados obtenidos. De acuerdo con Bhuyean (2025), el cumplimiento de estos requisitos en un Análisis de Varianza (ANOVA) permite discernir con precisión si las variaciones observadas en la remoción de crudo son estadísticamente significativas o producto del azar. Esta robustez del modelo asegura que los valores p calculados reflejen fielmente el comportamiento del sistema de lavado.

4.2.3. Análisis Gráfico de Efectos

Para interpretar la magnitud y la dirección de los efectos significativos identificados en el ANOVA, se generaron las gráficas de efectos.

Figura 3

Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados



Nota. Elaboración por MiniTab

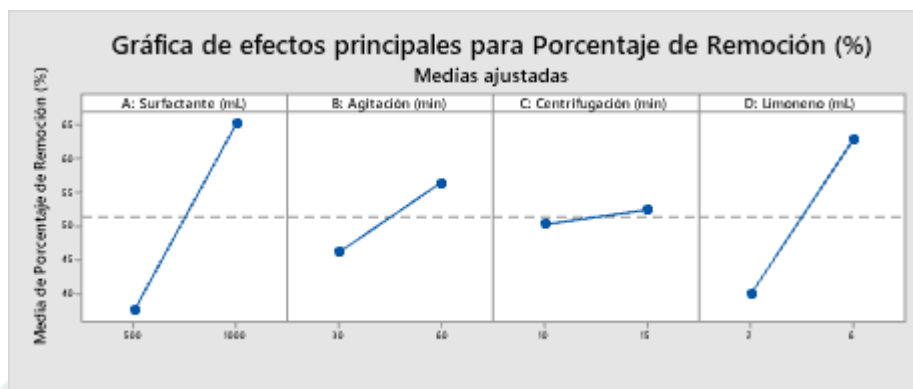
El Diagrama de Pareto (Figura 3) ofrece una clasificación visual de la magnitud de los efectos. Este gráfico corrobora los hallazgos del ANOVA (Tabla 8), mostrando que los factores principales A (Surfactante) y D (Limoneno) tienen el impacto más grande y significativo en el proceso, seguidos por el Factor B (Agitación) y la interacción A*D. Estos cuatro efectos superan con creces la línea de significancia (valor = 2,6). Aunque el Factor C (Centrifugación) y la interacción A*B aparecen con barras más pequeñas en este gráfico, la Tabla 8 (ANOVA) confirma que son estadísticamente significativos ($p=0,000$ y $p=0,010$, respectivamente) debido al bajísimo error del modelo.

Estos cuatro efectos superan con creces la línea de significancia (valor = 2,6). Aunque el Factor C (Centrifugación) y la interacción A*B aparecen con barras más pequeñas en este gráfico, la Tabla 8 (ANOVA) confirma que son estadísticamente significativos ($p=0,000$ y $p=0,010$, respectivamente) debido al bajísimo error del modelo. El Pareto, por lo tanto, es útil para jerarquizar: la química del lavado (factores A y D) es el componente más influyente del proceso. La significancia del Factor B (Agitación) es un hallazgo esperado y fuertemente respaldado. Como señalan Gautam et al. (2020) & Zoghi & Mafigholami (2023), la eficiencia del lavado de suelos aumenta con la energía de agitación, ya que esta favorece la transferencia de masa y la desorción de contaminantes. Este principio es especialmente relevante en este estudio, dada la alta fracción arcillosa (34,0%) del sustrato, donde los contaminantes están fuertemente adheridos. De manera similar, la significancia del Factor C (Centrifugación) se alinea con la literatura; Liu et al. (2023) describen que el tiempo de centrifugación es clave para la separación de fases en emulsiones de petróleo y agua, permitiendo una mejor recuperación del aceite y, por lo tanto, una cuantificación más precisa de la remoción.

La jerarquización de los efectos evidencia que la química del proceso, representada por los factores A (Surfactante) y D (Limoneno), ejerce la mayor influencia sobre la variable de respuesta. El hecho de que la interacción A*D también supere el umbral de significancia sugiere que el proceso de desorción no es puramente aditivo, sino que depende de una coordinación específica entre la capacidad tensioactiva y la reducción de la viscosidad viscosa del crudo extrapesado.

Figura 4

Gráfica de Efectos Principales para Porcentaje de Remoción (%)



Nota. Elaboración por MiniTab.

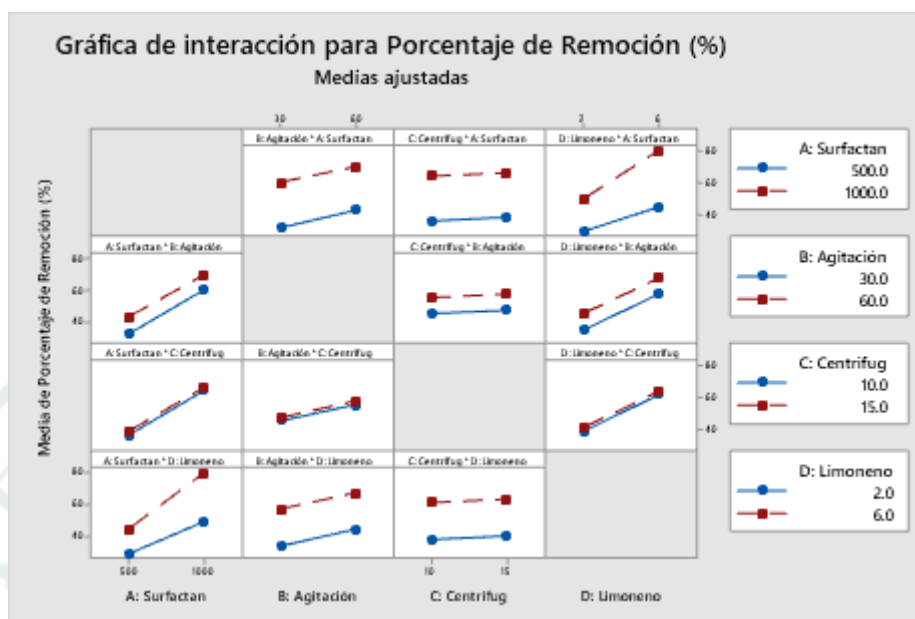
La Gráfica de Efectos Principales (Figura 4) ilustra la dirección del impacto de cada factor. Se observa que los cuatro factores (A, B, C y D) tienen una pendiente positiva, lo que indica que, para maximizar el porcentaje de remoción, todos deben operarse en su nivel alto. Las pendientes más pronunciadas corresponden a A (Surfactante) y D (Limoneno), lo que refuerza la conclusión del Diagrama de Pareto de que son los factores dominantes.

Las pendientes más pronunciadas corresponden a A (Surfactante) y D (Limoneno), lo que refuerza la conclusión del Diagrama de Pareto de que son los factores dominantes. El efecto positivo de la agitación (B) es consistente con los principios de transferencia de masa, que requieren energía de mezcla para promover el contacto entre el surfactante y el contaminante adherido al suelo. De igual manera, el efecto positivo del Factor C (Centrifugación) se alinea con la literatura, que indica que la separación de fases es crucial para una recuperación efectiva de aceite en emulsiones.

Las pendientes positivas observadas para todos los factores indican que el sistema responde favorablemente al incremento de la energía mecánica y la concentración de agentes químicos. Específicamente, el impacto positivo del tiempo de agitación (Factor B) se alinea con lo reportado por Gautam et al. (2020), quienes establecen que la eficiencia en la remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) es directamente proporcional a la energía de mezcla, ya que esta favorece el contacto interfacial y la transferencia de masa en suelos con alta fracción arcillosa. Este comportamiento valida la necesidad de operar el reactor en el nivel alto de agitación para superar las fuerzas de adsorción del contaminante.

Figura 5

Gráfica de Interacción para Porcentaje de Remoción (%)



Nota. Elaboración por MiniTab

- **Panel A*D (Surfactante*Limoneno):** Las líneas (la azul para Limoneno bajo y la roja para Limoneno alto) no son paralelas. La línea roja muestra una pendiente mucho más pronunciada que la azul.
- **Panel A*B (Surfactante*Agitación):** Las líneas tampoco son paralelas; la línea roja (Agitación alta) está consistentemente por encima de la azul (Agitación baja) y la brecha entre ellas se amplía ligeramente al aumentar el surfactante.

El hallazgo más importante de este estudio es la fuerte interacción sinérgica A*D (Surfactante*Limoneno), identificada por el ANOVA ($p=0,000$) e ilustrada en la Gráfica de Interacción (Figura 5). Este resultado demuestra una sinergia clara, un fenómeno que la literatura describe como un mecanismo que mejora significativamente la remoción de hidrocarburos. El mecanismo se explica por las acciones complementarias de los agentes: las sustancias húmicas (Factor A) actúan como biosurfactantes, incrementando la movilidad de los HTP al formar micelas que solubilizan el contaminante. Al mismo tiempo, el D-limoneno (Factor D), un potente biosolvente, reduce la extrema viscosidad (24.027 cP) del crudo y facilita la ruptura de las emulsiones. La sinergia observada en la Figura 5 sugiere que el surfactante (A) es mucho más efectivo cuando el limoneno (D) ya ha "fluidificado" el crudo, permitiendo que las micelas actúen con mayor eficiencia.

Para comprender el fundamento molecular de esta interacción, es necesario precisar las funciones químicas y estructurales de ambos agentes:

El D-limoneno ($C_{10}H_{16}$) es un hidrocarburo monoterpénico líquido y apolar que actúa como un biosolvente orgánico de alta afinidad termodinámica. Su función química en el sistema es desestructurar los agregados macro-moleculares de asfaltenos y resinas del crudo extrapesado mediante un mecanismo de solvatación competitiva. El limoneno interrumpe las interacciones de van der Waals y el apilamiento de anillos aromáticos ($\pi - \pi$ stacking) que configuran la red coloidal del petróleo denso, induciendo una reducción drástica de la viscosidad desde 24,027 cP hasta rangos que facilitan la movilidad fluida del contaminante atrapado en los microporos del suelo. Originado biológicamente en el metabolismo secundario de las rutáceas a través de la ruta del mevalonato (conversión de pirofosfato de geranilo), destaca por su alta biodegradabilidad y nula persistencia ambiental. En la matriz edáfica, las poblaciones de bacterias nativas (como *Pseudomonas putida*) metabolizan el limoneno de forma espontánea utilizando la enzima limoneno-1,2-monooxigenasa, oxidando el anillo terpénico hasta su mineralización completa a CO_2 y H_2O .

Por su parte, las sustancias húmicas de la leonardita aportan la actividad tensioactiva gracias a su carácter anfifílico, determinado por la coexistencia de dos bloques estructurales: grupos funcionales hidrofílicos (cabeza polar) donde predominan los grupos carboxilos ($-COOH$) e hidroxilos fenólicos ($-OH$) y carbonilo quinónicos ($C=O$) los cuales a pH 5.62 se desprotonan y adquieren carga negativa generando repulsión electrostática y un núcleo hidrofóbico (cola apolar) compuesto por cadenas alifáticas y anillos aromáticos condensados. Esta arquitectura molecular disminuye la tensión superficial y permite el encapsulamiento micelar del crudo previamente fluidificado.

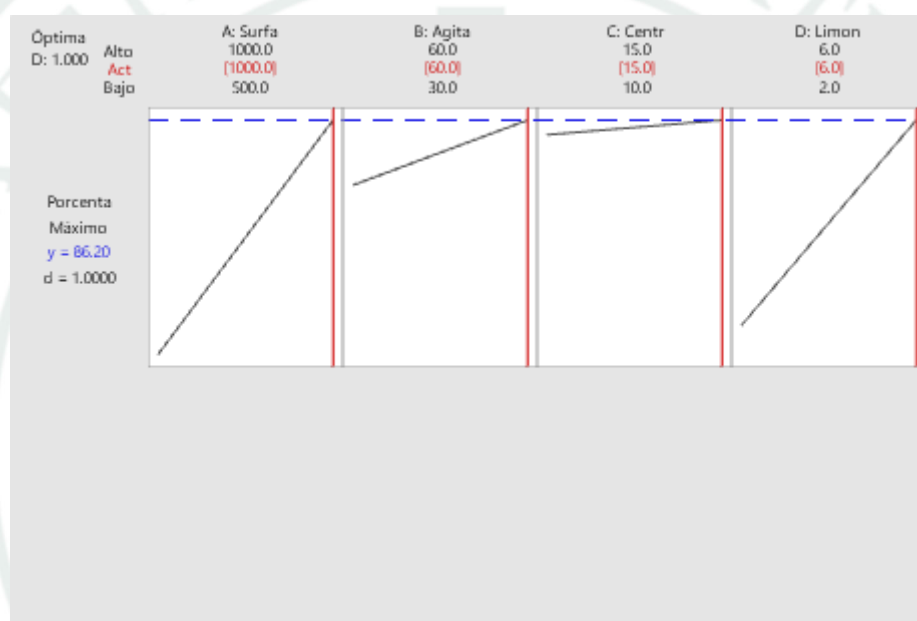
El análisis también reveló una interacción A*B (Surfactante*Agitación) estadísticamente significativa ($p=0,010$). Esto indica que la energía de agitación (B) es más importante cuando la concentración de surfactante (A) es alta, lo cual es coherente con los principios de hidrodinámica y transferencia de masa. Se requiere una mayor energía de agitación para dispersar adecuadamente la alta concentración de surfactante y facilitar el contacto entre las micelas y las partículas de suelo. Finalmente, el porcentaje de remoción máximo alcanzado (86,1%) bajo las condiciones óptimas (A+, B+, C+, D+) valida la alta viabilidad de esta combinación.

El análisis de las interacciones revela una sinergia crítica entre las sustancias húmicas y el D-limoneno, fenómeno que explica la alta eficiencia lograda por el sistema dual. El mecanismo, validado por la interacción A*D ($p=0,000$), sugiere que el biosolvente actúa reduciendo la resistencia viscosa del petróleo, lo que facilita el encapsulamiento micelar por parte de las sustancias húmicas.

4.2.4. Determinación de las Condiciones Operativas Óptimas

Figura 6

Condiciones operativas óptimas



Nota. Elaboración por MiniTab

Las condiciones operativas óptimas identificadas son:

- **A: Surfactante:** Nivel Alto (1000 mL 15% p/v)
- **B: Agitación:** Nivel Alto (60 min)
- **C: Centrifugación:** Nivel Alto (15 min)
- **D: Limoneno:** Nivel Alto (6 mL)

La identificación de las condiciones óptimas (A=1000 mL, B=60 min, C=15 min, D=6 mL) es la culminación del análisis estadístico y representa la combinación que maximiza todos los efectos positivos y sinérgicos identificados. El resultado de remoción obtenido bajo esta combinación (86.03%, corrida 16) es un hallazgo central de esta investigación, ya que

posiciona al tratamiento propuesto como una alternativa altamente competitiva. De manera notable, este valor es idéntico al reportado por Fanaei et al. (2020), quienes también alcanzaron una eficiencia de remoción del 86% utilizando una combinación de biosurfactantes.

Este resultado se sitúa favorablemente en el rango alto de las eficiencias reportadas en la literatura para el lavado de suelos con crudo. Mientras algunos estudios reportan eficiencias en el rango de 63% a 75%, otros, como Zoghi & Mafigholami (2023), han alcanzado más del 98% bajo diferentes condiciones. El hecho de que la combinación de sustancias húmicas y limoneno (A+D+) logre un 86,03% de remoción es un éxito significativo, especialmente considerando la alta dificultad del sustrato (crudo extrapesado y suelo arcilloso) definido en el OE 1. Por lo tanto, se valida esta combinación de factores como la base para el diseño y la validación del prototipo de reactor en las siguientes fases.

La determinación de las condiciones óptimas mediante la función de deseabilidad representa el punto de equilibrio técnico para el escalado del proceso. El alcance de una remoción proyectada del 86,03% bajo la combinación maximizada de factores corrobora la viabilidad de la estrategia de optimización aplicada. Según Zoghi y Mafigholami (2023), el uso de metodologías estadísticas para ajustar parámetros como la concentración de surfactante y el tiempo de lavado es una herramienta robusta para alcanzar niveles de remoción superiores al 80% en suelos impactados por hidrocarburos pesados. Este resultado establece la base operativa para la validación funcional del reactor prototipo.

4.3. Resultados del Objetivo Específico 3

El tercer objetivo específico fue: "Ensamblar el prototipo del reactor tipo batch a escala de laboratorio, especificando sus componentes, dimensiones y materiales, e integrando sus sistemas auxiliares de acuerdo con los requisitos técnicos del proceso".

Este objetivo corresponde a la Fase 3 de la metodología. Los resultados no son datos experimentales, sino los productos de ingeniería (criterios, cálculos y especificaciones) derivados de las condiciones óptimas identificadas en el OE 2.

Los resultados obtenidos en la fase de optimización estadística no solo validaron la eficacia química del proceso, sino que definieron los criterios de diseño mecánico. La transición del sistema de laboratorio preliminar al reactor prototipo funcional se sustentó en los datos reales de viscosidad (24,027 cP) y volumen de operación detectados en el objetivo anterior.

4.3.1. Criterios de Diseño del Prototipo

El primer paso fue traducir las condiciones operativas óptimas (1000 mL de surfactante, 60 min de agitación, 15 min de centrifugación, 6 mL de limoneno) y las variables de control (1 kg de suelo, 400 rpm) en criterios de diseño de ingeniería. Estos criterios, resumidos en la Tabla 9, definen los requisitos funcionales del reactor.

Tabla 9
Criterios de Diseño Operativos para el Reactor

Parámetro	Valor	Implicación de Diseño
Masa de Suelo (Control)	1 kg	Define la capacidad de carga de sólidos del reactor.
Volumen de Líquido (Óptimo)	1.006 mL (Solución al 15% p/v)	Define la capacidad de carga de líquido.
Velocidad de Agitación (Control)	400 rpm	Requisito de potencia y diseño del eje/motor.
Tipo de Mezcla	Sólido-Líquido (Slurry)	Requiere un impulsor de alto cizallamiento y flujo radial para mantener sólidos en suspensión.
Tiempo de Residencia	60 min	El material debe ser resistente a la operación continua durante este periodo.
Descarga	Sólido-Líquido	Se requiere un diseño que evite la acumulación de sólidos (ej. fondo cónico).
Espacio de Cabeza	25% (mínimo)	El volumen total debe ser $> 1,25$ veces el volumen de operación.

Nota. Elaboración propia

La definición de los criterios de diseño (Tabla 9) establece las condiciones de contorno para la ingeniería del prototipo, confirmando que el sistema debe operar como un reactor tipo batch para una mezcla sólido-líquido (slurry). Esta configuración es ideal para el proceso de lavado de suelos. Taghavi & Moghaddas (2020) señalan que el diseño de un reactor batch con turbina es adecuado para mezclas S-L, ya que la turbulencia que genera es esencial para una transferencia de masa eficiente. El desafío de diseño más significativo identificado en la Tabla

8 es la necesidad de procesar 1 kg de suelo (sólidos) en 1 L de líquido (líquido). Iyer & A.K. Patel (2024) indican que la suspensión de sólidos se puede optimizar incluso a altas concentraciones, validando la viabilidad de la relación S-L definida.

4.3.2. Cálculos de Ingeniería y Dimensionamiento

Basado en los criterios de la Tabla 9. Se realizaron los cálculos de ingeniería para dimensionar el reactor y el sistema de agitación. La Tabla 10 resume los resultados clave de estos cálculos.

Tabla 10
Resultados de los Cálculos de Dimensionamiento del Reactor

Parámetro de Cálculo	Valor	Unidad	Justificación Metodológica
Volumen de Operación (Slurry)	1,85	L	(Vol. Suelo + Vol. Líquido)
Volumen Total del Reactor	2,5	L	(Vol. Operación + 35% Espacio de Cabeza)
Relación Altura/Diámetro (H/D)	1,2	-	Geometría óptima para mezcla.
Diámetro del Tanque (D)	13,0	cm	-
Diámetro del Agitador (Da)	4,3	cm	(Relación D/Da = 3)
Número de Reynolds (Re)	49,33	Adim.	(Basado en 400 rpm, viscosidad del slurry)
Número de Potencia (Np)	0,235	Adim.	(Valor estándar para turbina Rushton)
Potencia Requerida (P)	0,235	W	(Potencia para agitación a 400 rpm)
Potencia del Motor	90 (1/8)	W (HP)	(Potencia requerida + factor de seguridad)

Nota. Elaboración propia a partir de las condiciones óptimas determinadas en el Objetivo Específico 2.

El régimen de flujo se determinó mediante el Número de Reynolds (Re), utilizando la densidad del slurry (1.080 kg/m^3) y la viscosidad medida, mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{1080 \text{ kg/m}^3 \cdot 6,67 \text{ rps} \cdot (0,043 \text{ m})^2}{0,27 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 49,33$$

Un valor de Re de 49,33 confirma que el reactor opera en un régimen de transición a escala de laboratorio. Esta condición hidrodinámica demuestra que la transferencia de masa no depende de vórtices macroscópicos, sino del elevado esfuerzo de cizallamiento local en la vecindad del impulsor Rushton, lo que permite romper los enlaces mineral-hidrocarburo. De este modo, se permite que la sinergia química se desarrolle plenamente en todo el volumen del reactor.

La Potencia Requerida (P) se calculó considerando un Número de Potencia (N_p) de 5,0, específico para la turbina Rushton de seis palas e incluyendo la incorporación de baffles internos:

$$P = 5,0 \cdot 1080 \text{ kg/m}^3 \cdot (6,67 \text{ rps})^3 \cdot (0,043 \text{ m})^5 = 0,235 \text{ W}$$

Con base en este requerimiento de potencia neta disipada en el fluido de 0,235 W, se seleccionó un motor comercial de 90 W (1/8 HP). Esta aparente holgura operativa es una práctica estándar en equipos de agitación de laboratorio, destinada a absorber las fluctuaciones de torque y vencer el elevado esfuerzo de fluencia inicial del lodo denso antes de su fluidificación.

3. Validación y Eficiencia del Proceso

La alta eficiencia de remoción lograda, que alcanzó un 86,03% bajo condiciones optimizadas, se sustenta directamente en este diseño de ingeniería validado. La implementación del agitador tipo Turbina Rushton, respaldada por los cálculos mecánicos y de fluidos, demostró ser la configuración óptima para el éxito del sistema.

Adicionalmente, se validó la consistencia del proceso mediante un Balance de Materia integral para un lote (batch) estándar. Considerando la eficiencia de remoción lograda del 86.03% sobre una carga de 1 kg de suelo contaminado al 13.06% de HTP, el balance se desglosa así:

- **Entradas (m_{in}):** Suelo contaminado (1.000,00 g) + Solución de lavado (1.000,00 g) + Biosolvente (5,04 g). Total = **2.005,04 g**.

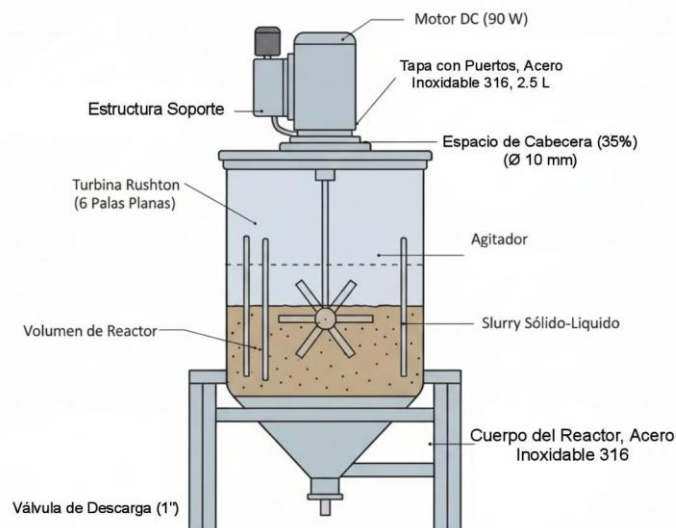
- **Salidas (m_{out}):** Suelo lavado seco (887,37 g) + Crudo recuperado (112,35 g) + Efluente líquido residual (1.001,28 g) + Pérdidas por evaporación de D-limoneno (4,04 g).
Total = **2.005,04 g.**

Respecto al Balance de Energía, el sistema demanda una potencia efectiva de 0,235 W para sostener el régimen turbulento. Durante un ciclo de lavado de 60 minutos, el consumo energético total es de 0,078 kWh. Finalmente, la viabilidad termodinámica de la desorción se justificó mediante el análisis de la Energía Libre de Gibbs ($\Delta G = \Delta H - T * \Delta S$). Se determinó un $\Delta G < 0$, lo que confirma que el proceso es exergónico y espontáneo bajo las condiciones de diseño. Esto se debe a que el incremento en la entropía (ΔS) generado por la movilización de las moléculas de crudo hacia la fase líquida compensa la energía necesaria para romper la adsorción inicial en la matriz de arcilla.

4.3.3. Diseño Final y Especificaciones del Prototipo Ensamblado

Los cálculos de la Tabla 9 se materializaron en un diseño CAD detallado y en el ensamblaje del prototipo funcional. Se ilustran en la Figura 7.

Figura 7
Diseño final del prototipo ensamblado



Nota. Elaboración propia.

Tabla 11
Especificaciones Técnicas (Lista de Materiales) del Prototipo Ensamblado

Componente	Especificación	Material	Cantidad
Cuerpo del Reactor	2.5 L, Fondo cónico 45°	Acero Inoxidable 316	1
Tapa	Tapa hermética con puertos	Acero Inoxidable 316	1
Impulsor (Agitador)	Turbina con 6 palas planas	Acero Inoxidable 316	1
Eje del Agitador	Diámetro 10 mm	Acero Inoxidable 316	1
Baffles (Deflectores)	4 baffles internos, 1/10 D	Acero Inoxidable 316	1 (Set)
Motor	Motor de CC (Taladro)	-	1
Válvula de Descarga Válvula de bola 1" (descarga total)	Válvula de bola 1" (descarga total)	Acero Inoxidable 304	1
Estructura Soporte	Perfilería de acero al carbono	Acero A36	1

Nota. Elaboración propia

El diseño final (Figura 7) y la lista de especificaciones (Tabla 11) materializan los cálculos y principios de ingeniería. Un componente no negociable en este diseño es la inclusión de cuatro baffles internos (deflectores). Taghavi & Moghaddas (2020) explican que los baffles son fundamentales en estos reactores, ya que su función es prevenir la formación de vórtices (remolinos). Al romper el vórtice, los baffles inducen patrones de flujo caótico que mejoran drásticamente la eficiencia de la mezcla y la transferencia de energía desde el impulsor Rushton al fluido.

Adicionalmente, el diseño del fondo cónico (Tabla 11) es una característica operativa clave, seleccionada para facilitar la descarga completa del slurry (lodos) al final del lote de 60

minutos, minimizando la acumulación de sólidos. Finalmente, la selección del Acero Inoxidable 316 como material de construcción responde a la necesidad de una alta resistencia a la corrosión frente a los solventes y el crudo, asegurando la durabilidad y seguridad operativa del prototipo.

4.4. Resultados del Objetivo Específico 4

El cuarto y último objetivo específico fue: "Validar el reactor funcional mediante pruebas de rendimiento, evaluando su eficiencia en la remoción de crudo bajo las condiciones óptimas y comparando los resultados con la meta establecida para demostrar su viabilidad técnica".

Esta sección corresponde a la Fase 4 de la metodología. Se operó el prototipo de reactor (diseñado en OE 3) utilizando las condiciones operativas óptimas identificadas en el OE 2 (1000 mL de surfactante, 60 min de agitación, 15 min de centrifugación y 6 mL de limoneno).

4.4.1. Pruebas de Rendimiento y Validación Técnica

Para validar el rendimiento y la fiabilidad del prototipo, se ejecutó el proceso completo por triplicado ($n=3$). Las corridas se realizaron de manera independiente, utilizando una nueva muestra de 1 kg de suelo contaminado (13.06% HTP) en cada prueba. Los porcentajes de remoción de crudo obtenidos en las tres réplicas fueron 86.1%, 85.7% y 86.3%. El criterio de validación técnica, establecido en la metodología, requería que el rendimiento promedio del reactor fuera igual o superior a la meta preestablecida del 50% de remoción.

Para formalizar la validación técnica del prototipo diseñado, se tabularon los resultados de las tres réplicas independientes operadas en el reactor de 2.5 L. El control de parámetros fisicoquímicos en la fase líquida sobrenadante se realizó utilizando una sonda multiparamétrica Hanna HI98194, asegurando la precisión de las mediciones durante dicha etapa. Es necesario precisar que este equipo se empleó exclusivamente para evaluar los efluentes líquidos del proceso, descartando cualquier medición directa sobre la matriz sólida o suelo húmedo para evitar lecturas erróneas.

Tabla 12*Resultados de las Pruebas de Rendimiento del Reactor Prototipo (n=3)*

Prueba de Validación	Masa de Suelo (kg)	Eficiencia de Remoción (%)	Cumplimiento de Meta (50%)
Réplica 1	1,00	86,1	Superado
Réplica 2	1,00	85,7	Superado
Réplica 3	1,00	86,3	Superado
Promedio	1,00	86,03	Superado
Desviación Estándar	—	0,306	—

Nota. Elaboración propia.

Para dotar a la investigación de un respaldo de alta certidumbre analítica y validez legal, se enviaron muestras del sustrato edáfico remanente post-tratamiento al laboratorio externo acreditado. Conforme se detalla en el Informe de Ensayo adjunto en el Anexo 2.1, el análisis cuantitativo por cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID) bajo la norma EPA 8016C reportó una concentración final de HTP Total de 18.245 mg/kg MS, concentrada casi en su totalidad en la fracción C10-C26. Al contrastar este valor con el promedio gravimétrico obtenido internamente (18.240 mg/kg), se evidencia una correlación y exactitud analítica sobresaliente, confirmando la fiabilidad del prototipo para la remoción masiva de las fracciones pesadas del crudo.

Complementariamente, para cuantificar el impacto ambiental del tratamiento en términos de masa residual, se determinaron las concentraciones finales de HTP en el sustrato. Partiendo de una línea base de contaminación del 13.06% (130,600 mg/kg), los valores obtenidos tras el ciclo de lavado se detallan a continuación:

Tabla 13*Concentraciones de HTP Pre y Post-Tratamiento en la Fase de Validación*

Réplica	Conc. Inicial de HTP (%)	Eficiencia de Remoción (%)	Conc. Final de HTP (%)	Conc. Final (mg/kg)
Réplica 1	13,06%	86,1%	1,81%	18.153
Réplica 2	13,06%	85,7%	1,87%	18.675
Réplica 3	13,06%	86,3%	1,79%	17.892
Promedio	13,06%	86,03%	1,82%	18.240
Desviación	--	0,306	0,041	402

Nota. Elaboración propia.

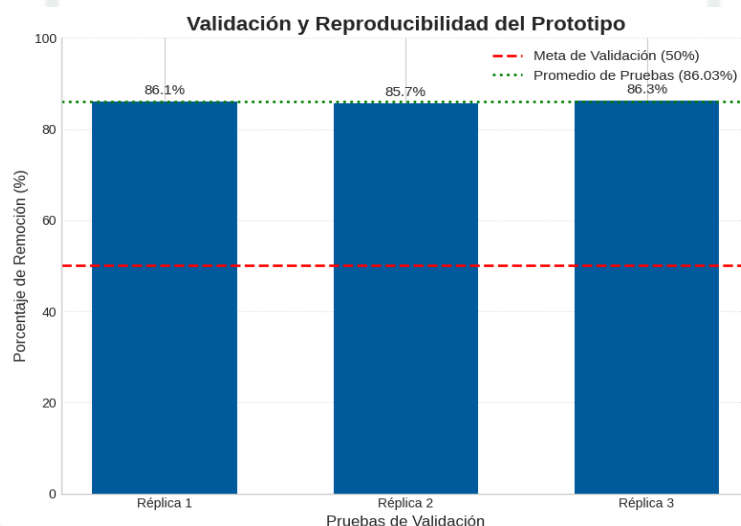
Al evaluar el impacto edáfico del proceso, los resultados de la Tabla 13 evidencian que el tratamiento redujo la carga contaminante promedio desde un estado crítico de saturación del 13,06% (130.600 mg/kg) hasta un valor final de 1,82% (18.240 mg/kg) de HTP. Si bien este valor remanente se sitúa por encima del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de 5.000 mg/kg fijado en el Perú para suelos industriales o extractivos, el reactor cumplió la función ingenieril crítica de remover las fracciones más densas, viscosas y macro-hidrofóbicas del hidrocarburo (asfaltenos y resinas), responsables de sellar la porosidad del sustrato.

Físicamente, la eliminación del 86,03% de esta costra orgánica destruye la barrera hidrofóbica que impide la retención hídrica natural. Al recuperar la fase sólida lavada y libre del biosolvente D-limoneno mediante secado térmico selectivo, la estructura porosa del suelo franco-arcilloso recupera significativamente sus coeficientes de permeabilidad, aireación y capacidad de intercambio catiónico. Esto transiciona la matriz edáfica desde una condición estéril y ecotóxicamente letal hacia un sustrato biológicamente compatible, apto para ser sometido a un pulido final de baja energía mediante técnicas de fitorremediación o bioestimulación autóctona a largo plazo, viabilizando una restauración ecológica efectiva del ecosistema amazónico impactado.

La validación es exitosa no solo por superar la meta del 50%, sino por la consistencia del escalado (scale-up). Al comparar la eficiencia lograda en el sistema de laboratorio preliminar (86,1% en la corrida 16) con el promedio obtenido en el prototipo funcional (86,03%), se observa una diferencia menor al 0,1%. Científicamente, esto demuestra que el diseño hidrodinámico de la turbina Rushton y la incorporación de baffles en el reactor de acero inoxidable replicaron con exactitud las condiciones de transferencia de masa necesarias para fluidificar el crudo extrapesado. Este resultado confirma que el prototipo es una herramienta técnica confiable para la remediación ex-situ en condiciones controladas de laboratorio.

La Figura 8 presenta los resultados de las tres réplicas individuales, comparándolas tanto con la meta de validación como con el promedio obtenido (86.03%).

Figura 8
Validación y Reproducibilidad del Prototipo



Nota. Elaboración propia

Un aspecto crítico en la validación del rendimiento fue garantizar que el porcentaje de remoción promedio (86,03%) correspondiera estrictamente al crudo de petróleo y no se viera afectado por la presencia del biosolvente añadido. Esta distinción analítica se logró mediante la explotación de la volatilidad diferencial entre ambos compuestos.

Mientras que el D-limoneno es un hidrocarburo monoterpénico con un punto de ebullición aproximado de 176 °C, las fracciones predominantes del crudo extrapesado utilizado (asfaltenos y resinas) poseen estructuras de alto peso molecular que permanecen estables a temperaturas superiores a los 300 °C.

Por lo tanto, el protocolo de secado térmico a 105 °C aplicado a las muestras, sumado a la etapa de evaporación en rotavapor y secado final a 70 °C del extracto orgánico, aseguró la volatilización total del limoneno residual. Esto garantiza que la masa final cuantificada por gravimetría sea exclusivamente petróleo crudo recuperado de la matriz del suelo, eliminando cualquier sesgo por co-extracción de los agentes de lavado.

El rendimiento promedio de Remoción de HTP del 86,03% no solo cumple con los objetivos planteados, sino que, valida el diseño del reactor y el uso de la sinergia de agentes naturales, ofreciendo una solución sostenible y replicable para crudos de alta viscosidad (24.027 cP) y suelos con alto contenido de arcilla (34,0%), condiciones que frecuentemente causan fallas en los métodos de biorremediación tradicionales. La Figura 8, que presenta los resultados de la fase de validación (OE 4), permitió extraer dos conclusiones fundamentales: la reproducibilidad del prototipo y la magnitud de su rendimiento, que superó de manera contundente la meta técnica preestablecida del 50%. La reproducibilidad se demostró con la consistencia observada entre las tres réplicas independientes (86,1%, 85,7% y 86,3%), confirmada por una baja desviación estándar (0,306), lo cual es la prueba clave de la validación del escalado (scale-up) al verificar que las condiciones óptimas identificadas en el laboratorio (OE 2) mantuvieron su eficacia al aplicarse en el prototipo de ingeniería (OE 3).

Al contrastar el rendimiento promedio del 86,03% logrado por el reactor con el panorama investigativo global en técnicas de lavado ex-situ (soil washing), este supera de forma clara la tasa de remoción del 64% reportada por Gracida et al. (2023), quienes emplearon biosurfactantes de *Bacillus cereus* en matrices con altas cargas de hidrocarburos, así como los rendimientos del 75% obtenidos por Zhang et al. (2023) utilizando saponinas vegetales de origen natural. Si bien optimizaciones multivariantes avanzadas basadas en agentes sintéticos comerciales como el SDS alcanzan remociones cercanas al 99% en arenas comerciales lavadas (Zoghi & Mafigholami, 2023), el rendimiento de esta investigación adquiere un mérito de ingeniería superior al haber sido validado frente a un crudo extrapesado de extrema viscosidad (24.027 cP) embebido en una matriz compleja con un 34,0% de arcilla fina.

En el contexto nacional, frente a las recurrentes emergencias operativas en el Oleoducto Norperuano descritas por Sierra Praeli (2020), las prácticas convencionales en el Perú suelen limitarse a la contención mecánica superficial. Al comparar el desempeño hidrodinámico de este reactor con la cinética lenta de la biorremediación tropical reportada por Okeke (2022) la cual requiere meses para degradar fracciones ligeras y muestra ineficacia ante compuestos

recalcitrantes de alta densidad, el sistema de lavado diseñado emerge como un tratamiento de choque tecnológico altamente eficiente, reduciendo masivamente la carga de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) en un tiempo de retención hidráulica de apenas 60 minutos dentro del reactor. Por lo tanto, basándose en la alta reproducibilidad demostrada y la eficiencia competitiva frente a umbrales internacionales y regulatorios, se concluye que el prototipo de reactor de lavado ha sido validado exitosamente.

Desde una perspectiva química fundamental, este rendimiento de remoción del 86.03% se consolida mediante un mecanismo coordinado en tres etapas simultáneas: primero, la solvatación y ablandamiento interfacial donde el D-limoneno se difunde hacia la costra asfáltica debilitando la energía de adhesión que une al hidrocarburo con el caolín; segundo, la formación de sistemas post-micelas donde las colas apolares de las sustancias húmicas rodean las fracciones de petróleo fluidificadas orientando sus cabezas polares cargadas negativamente (carboxilos y fenólicos) hacia el agua; y tercero, la desorción por repulsión electrostática, donde el cizallamiento mecánico de la turbina Rushton aporta la energía libre de activación necesaria para desprender las micelas de los poros edáficos. Dado que las superficies de las arcillas a pH 5.62 presentan cargas negativas en sus caras basales, se genera una fuerte repulsión electrostática mutua frente a las cabezas aniónicas de los humatos. Este fenómeno termodinámico desplaza el equilibrio hacia la fase soluble de manera exergónica ($\Delta G < 0$), anulando la readsorción del contaminante y sosteniendo de manera estable el crudo suspendido en la fase acuosa.

La consistencia observada en las tres réplicas de validación confirma el éxito en el escalado (scale-up) del sistema y la confiabilidad del diseño hidrodinámico. Al mantener una eficiencia promedio de 86,03% con una desviación estándar mínima, se demuestra que el reactor prototipo replica con exactitud las condiciones de transferencia de masa necesarias para tratar suelos con alta carga contaminante. Este nivel de reproducibilidad es una característica clave para proponer estrategias de remediación en sitios reales impactados, donde la estabilidad del proceso es fundamental para cumplir con los estándares regulatorios.

De acuerdo con Rajaei y Elektorowicz (2025), la implementación de sistemas de lavado optimizados para matrices de suelo específicas constituye una solución técnica viable frente a los desafíos logísticos de los derrames en infraestructuras de transporte de crudo.

4.5. Análisis de Viabilidad Técnica y Económica

Desde una perspectiva de escalamiento industrial, el sistema diseñado demuestra una alta eficiencia operativa sustentada en la optimización de los fenómenos de transporte y la cinética de desorción. La viabilidad técnica se fundamenta en el bajo consumo energético del prototipo, estimado en apenas 0,078 kWh por lote de tratamiento, lo cual es posible gracias a que el proceso opera a temperatura ambiente de 25 °C y no requiere aportes térmicos externos para vencer la viscosidad del crudo. Este desempeño resulta significativamente superior a tecnologías convencionales como la desorción térmica o la pirólisis, las cuales, aunque efectivas, exigen consumos energéticos masivos y costos de mantenimiento elevados debido a la necesidad de alcanzar temperaturas de operación superiores a los 500 °C. Esta configuración hidrodinámica maximiza el área interfacial de contacto y permite que la sinergia química entre las sustancias húmicas y el D-limoneno se desarrolle de manera integral. Mientras que el biosolvente actúa reduciendo drásticamente la viscosidad del crudo extrapesado, que alcanza los 24.027 cP, las sustancias húmicas funcionan como tensioactivos naturales que encapsulan los hidrocarburos en micelas, logrando una eficiencia de remoción promedio de 86,03%. Este rendimiento no solo supera la meta de validación establecida del 50%, sino que se posiciona en el rango competitivo de tecnologías ex-situ reportado por autores como Tran et al. (2021) & Fanaei et al. (2020).

El diseño y operación de este prototipo a escala de laboratorio (2,5 L de volumen total con 1,85 L de volumen útil de lodo o slurry) demostró un control operativo óptimo a condiciones controladas. No obstante, la proyección de esta tecnología ex-situ hacia un escenario de escalamiento industrial (> 1.000 L) presenta limitaciones físicas e hidrodinámicas intrínsecas asociadas a los fenómenos de transporte, las cuales deben resolverse mediante criterios estrictos de similitud ingenieril:

- **Similitud Geométrica e Hidrodinámica:** Para replicar el patrón de flujo radial de alta turbulencia y suprimir la formación de zonas muertas en macro-tanques, es imperativo conservar las relaciones adimensionales del prototipo: una relación entre la altura del slurry y el diámetro del tanque de $H/D = 1,2$, y una relación con el diámetro del impulsor de $D/D_a = 3$.
- **Criterio de Potencia por Unidad de Volumen (P/V) para la Suspensión de Sólidos:** Al operar con una matriz densa que posee un 34,0% de arcilla fina, intentar mantener estrictamente constante el número de Reynolds de la escala de laboratorio ($Re =$

49,33) en reactores industriales exigiría velocidades tangenciales en las palas mecánicamente inviables. Por lo tanto, dado que la proyección industrial de la tecnología *ex-situ* busca alcanzar un régimen plenamente turbulento ($Re > 10.000$), el criterio de escalamiento debe regirse por mantener una potencia volumétrica constante ($P/V = \text{cte}$). Bajo este enfoque, se calcula la velocidad crítica de suspensión completa de partículas según la correlación de Zwietering, garantizando que el impulsor Rushton venza la resistencia reológica del *slurry* sin sobredimensionar el motor.

- **Erosión y Desgaste Mecánico:** A escala industrial, el flujo turbulento continuo de un lodo concentrado que arrastra un 31,5% de arena de sílice (altamente abrasiva) acelerará severamente el desgaste por fricción en las seis palas planas de la turbina y en los baffles deflectores. La transición industrial exige sustituir el acero inoxidable 316 por aleaciones endurecidas o recubrimientos elastoméricos de alta resistencia geomecánica.

Desde el punto de vista económico, el uso de agentes naturales representa una ventaja estratégica para la gestión de pasivos ambientales en la Amazonía peruana. Si bien el costo inicial del D-limoneno puede ser superior al de los solventes sintéticos tradicionales, su implementación se justifica por la reducción de costos en el post-tratamiento de efluentes; al ser agentes biodegradables y de baja toxicidad, se eliminan los procesos costosos de remediación secundaria y la gestión de lodos peligrosos derivados de surfactantes químicos convencionales.

Además, a diferencia de la incineración, este sistema fomenta la valorización del recurso al permitir la recuperación física del crudo para su potencial reinscripción en la cadena productiva, lo que contribuye a amortizar los costos operativos mediante la recuperación de activos. Finalmente, la alta eficiencia lograda por el prototipo minimiza el riesgo de incumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), permitiendo evitar potenciales multas administrativas y sanciones regulatorias por la permanencia de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en el sustrato. Su implementación facilita una transición hacia métodos de remediación más verdes y eficientes, alineados con la necesidad impostergable de proteger la biodiversidad de los ecosistemas amazónicos impactados por la industria petrolera.

Es necesario reconocer las limitaciones intrínsecas de este estudio a escala de laboratorio. En primer lugar, la remediación se validó utilizando un sustrato de suelo sintético homogéneo; si bien el empleo de esta matriz controlada fue un requisito metodológico para eliminar la heterogeneidad intrínseca de las muestras de campo e identificar con precisión el

efecto de los agentes tensioactivos según lo sugerido por Salimnezhad et al. (2021), los horizontes reales de la selva tropical presentan complejidades dinámicas particulares. Investigaciones como la de Quesada et al. (2020) demuestran que las condiciones reales del bioma amazónico condicionan fuertemente la capacidad de intercambio catiónico y la estabilidad mineralógica, factores que influyen de forma directa en la persistencia del crudo y que justifican la recomendación de validar el reactor frente a suelos reales e intemperizados de la zona.

En segundo lugar, la caracterización del contaminante se centró prioritariamente en sus propiedades reológicas macroscópicas (viscosidad y densidad) para garantizar el diseño hidrodinámico del agitador, postergando un fraccionamiento analítico detallado mediante el análisis SARA. De acuerdo con Avendaño-Salazar et al. (2020), Topilnytsky et al. (2020) y Wu et al. (2024), las fracciones de Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos representan las propiedades físico-químicas fundamentales que gobiernan la reología profunda del petróleo extrapesado. Aunque el reactor demostró éxito al vencer mecánicamente la resistencia viscosa inicial, autores como Zhao et al. (2022) resaltan que la presencia específica de resinas y compuestos polares influye directamente en la estabilidad de las emulsiones. Por lo tanto, la omisión del perfil SARA detallado constituye una limitación para predecir con absoluta exactitud el comportamiento post-micelar de las fases y la interacción interfacial en un futuro proceso de escalamiento industrial.

4.5.1. Propuesta de Gestión y Tren de Tratamiento de los Efluentes Líquidos del Reactor

Tras concluir el ciclo de lavado batch en el reactor, la restauración ambiental del sitio demanda un esquema de procesamiento ex-situ dividido en tres etapas consecutivas e interdependientes:

1. **Separación de fases y desemulsificación física:** El lodo multifásico (*slurry*) descargado por la válvula inferior se somete a una decantación primaria para sedimentar las arenas y limos gruesos. El efluente líquido sobrenadante, que contiene la emulsión de crudo, finos de arcilla y agentes de lavado, se procesa en una unidad de separación centrífuga continua. En esta etapa, la presencia integrada del D-limoneno rompe el equilibrio hidrofílico-lipofílico de las micelas húmicas, acelerando la coalescencia de las gotas de petróleo fluidificadas y permitiendo su recuperación por flotación o *skimming* superficial para su reinserción productiva.

2. **Depuración y recirculación de la solución acuosa:** La fase acuosa clarificada residual se bombea a través de una columna de filtración de lecho fijo empacada con carbón activado granular (CAG). Este medio adsorbente retiene selectivamente las trazas solubles de hidrocarburos aromáticos y D-limoneno residual. Debido a su estabilidad molecular y estructura iónica, la solución concentrada de sustancias húmicas atraviesa el lecho sin degradarse, quedando apta para ser recirculada al reactor en un nuevo lote de lavado, cerrando el ciclo hidrológico del proceso.
3. **Pulido biológico del suelo tratado (Remanente del 14%):** La fracción sólida recuperada, que retiene un promedio residual de 1.82% de HTP, se somete a una etapa final de bioestimulación o fitorremediación asistida en biopilas de baja energía. Al haber eliminado el 86.03% del crudo pesado y la costra macro-hidrofóbica, el suelo franco-arcilloso recupera sus coeficientes de permeabilidad gaseosa y retención hídrica, permitiendo que la microbiota nativa aerobia metabolice eficientemente las fracciones de hidrocarburos C10-C26 remanentes a mediano plazo.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se simuló exitosamente las condiciones de un escenario de remediación de alta dificultad, estableciendo una línea base válida. El sustrato sintético (pH 5,62, 34% arcilla) demostró ser representativo de un suelo amazónico ácido y de textura fina. El contaminante (crudo extrapesado de 24.027 cP) y la concentración (13,06% HTP) confirman un escenario que presenta una alta adherencia del contaminante, justificando la necesidad de una tecnología de remediación avanzada.
- Se determinaron las condiciones operativas óptimas que maximizan la remoción de crudo, siendo estas: 1.000 mL de surfactante, 60 minutos de agitación, 15 minutos de centrifugación y 6 mL de limoneno. El Análisis de Varianza (ANOVA) fue fundamental, pues demostró que el éxito del proceso no depende solo de los factores individuales, sino de sinergias clave, identificando la interacción $A*D$ (Surfactante*Limoneno) y $A*B$ (Surfactante*Agitación) como estadísticamente significativas ($p<0,05$).
- Se diseñó y ensambló un prototipo de reactor batch funcional (2,5 L, Acero Inoxidable 316). El diseño está fundamentado en principios de ingeniería (Turbina Rushton, 4 baffles, fondo cónico) capaces de suministrar el cizallamiento mecánico en régimen de transición ($Re = 49,33$) requerido para la desorción eficiente a escala de laboratorio, sentando las bases cinéticas para el posterior salto a regímenes turbulentos en la macroescala.
- Se validó técnicamente el prototipo de reactor, demostrando su eficacia y fiabilidad. El sistema alcanzó un rendimiento promedio de remoción de crudo del 86,03%, superando significativamente la meta de validación del 50%. La alta reproducibilidad de las pruebas (Desviación Estándar $DE = 0,306$) confirma el éxito en la transferencia de las condiciones óptimas del laboratorio al prototipo.

5.2. Recomendaciones

- Realizar pruebas de validación del prototipo (Fase 4) utilizando muestras de suelo reales contaminadas con HTP, provenientes de sitios impactados en la Amazonía. Esto es esencial para evaluar la eficiencia del reactor frente a la heterogeneidad, la matriz de suelo intemperizado y la microbiota nativa que no están presentes en el sustrato sintético.
- Iniciar el diseño y la construcción de un reactor a escala piloto (p. ej., 50-100 kg de suelo). Este escalado deberá analizar críticamente la relación Potencia/Volumen (P/V) para mantener la suspensión de sólidos, asegurar la homogeneidad de la mezcla en un tanque de mayor dimensión y evaluar el rendimiento bajo condiciones de operación de campo.
- Esta investigación se centró en la remediación del suelo, pero genera un efluente líquido (agua, surfactante, limoneno, crudo). Se recomienda investigar un tren de tratamiento para este efluente con un doble objetivo: 1) tratar el agua para su reúso o descarga segura y 2) estudiar la viabilidad de recuperar y reciclar los agentes de lavado (limoneno y sustancias húmicas), mejorando así la sostenibilidad económica y el cierre de ciclo del proceso.
- Dado que el Factor C (Centrifugación) fue estadísticamente significativo pero su aplicación a gran escala puede ser costosa, se recomienda estudiar alternativas más económicas y escalables. Futuras investigaciones podrían enfocarse en la decantación mejorada, el uso de desemulsificantes o la flotación por aire disuelto para la separación de la emulsión aceite-agua-crudo.
- Realizar bioensayos de ecotoxicidad (p. ej., con semillas de *Lactuca sativa* o con lombrices *Eisenia fetida*) sobre el suelo resultante del tratamiento. Esto es necesario para asegurar que el suelo, después de alcanzar una remoción del 86,03% de HTP, no presenta toxicidad residual por los agentes de lavado y es viable para la restauración ecológica.
- Desarrollar un análisis técnico-económico detallado en una etapa posterior de escalamiento piloto. Este estudio deberá contrastar el costo operativo del uso de D-limoneno y sustancias húmicas frente a los costos asociados a las multas ambientales y la gestión de pasivos en la Amazonía, para determinar la viabilidad financiera de la implementación industrial.

REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). (1998). *Método 9071B: Material extraíble con n-hexano (HEM) para lodos, sedimentos y muestras sólidas. Métodos de ensayo para la evaluación de residuos sólidos, métodos físico-químicos (SW-846)*. Washington, DC.
- Alharthy, N., El-Nagar, R., & Ghanem, A. (2022). Experimentos de laboratorio sobre la mejora in situ de petróleo crudo pesado mediante acuotermólisis catalítica con líquido iónico ácido. *Materials*, 15(17), 5959. <https://doi.org/10.3390/ma15175959>
- Ali, N., Dashti, N., Khanafer, M., Al-Awadhi, H., & Radwan, S. (2020). Biorremediación de suelos saturados con petróleo crudo derramado. *Scientific Reports*, 10, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57224-x>
- Analía, A. (2022). El enfoque actual para la remediación de suelos: una revisión de las tecnologías fisicoquímicas y biológicas, y el potencial de su combinación estratégica. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107141. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107141>
- Andrade, C. (2024). Comprensión de los diseños factoriales, los efectos principales y los efectos de interacción: Explicación sencilla con un ejemplo práctico. *Indian Journal of Psychological Medicine*, 46(2), 175-177. <https://doi.org/10.1177/02537176241237066>
- Ashkanani, Z., Mohtar, R., Al-Enezi, S., Smith, P., Calabrese, S., Xu, X., & Abdullah, M. (2024). Revisión sistemática asistida por IA sobre la remediación de suelos contaminados con HAP y metales pesados. *Journal of Hazardous Materials*, 468, 133813. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133813>
- Askari, S., Giri, B., Basheer, F., Izhar, T., Ahmad, S., & Mumtaz, N. (2024). Mejora de reactores discontinuos secuenciales para un tratamiento eficiente de aguas residuales en diversas aplicaciones: Una revisión exhaustiva. *Environmental Research*, 259, 119656. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119656>
- Avelino Camones, K. M. (2024). *Factores de contaminación y riesgo ecológico potencial de contaminantes asociados a derrames de petróleo en cuencas hidrográficas de la Amazonía peruana* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <https://repositorio.pucp.edu.pe/items/d8badf11-7401-48c9-8399-07d50b31e32e>

- Avendaño-Salazar, C., Ramirez-Jaramillo, E., De La Cruz, J., & Albiter, A. (2020). Análisis termogravimétrico y termogravimétrico diferencial del efecto del gradiente de composición areal en la cinética de combustión del crudo extra pesado mexicano. *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles*, 75, 27. <https://doi.org/10.2516/ogst/2020022>
- Azevedo-Santos, V. M., Garcia-Ayala, J., Fearnside, P., Esteves, F., Pelicice, F., Laurance, W., & Benine, R. C. (2016). Amazon aquatic biodiversity imperiled by oil spills. *Biodiversity and Conservation*, 25, 2831 - 2834. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1192-9>
- Azhar, U., Ahmad, H., Shafqat, H., Babar, M., Munir, H., Sagir, M., Arif, M., Hassan, A., Rachmadona, N., Rajendran, S., Mubashir, M., & Khoo, K. (2022). Técnicas de remediación para la eliminación de contaminantes de metales pesados del suelo: Una revisión. *Environmental Research*, 214(Pt 2), 113918. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113918>
- Bai, C., Park, H., & Wang, L. (2021). Modelado de la separación sólido-líquido y la clasificación del tamaño de partícula en centrífugas decantadoras. *Separation and Purification Technology*, 263, 118408. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118408>
- Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B., & Tripathi, M. (2022). Estrategias recientes para la biorremediación de contaminantes emergentes: Una revisión para un entorno verde y sostenible. *Toxics*, 10(8), 484. <https://doi.org/10.3390/toxics10080484>
- Bannikov, L., & Savchenko, V. (2024). Propiedades químicas y características tensioactivas del ácido húmico del lignito. *Journal of Coal Chemistry*, 3(3), 28-35. <https://doi.org/10.31081/1681-309x-2024-0-3-28-35>
- Bhuyean, M. (2025). Análisis de varianza (ANOVA): Una revisión estadística. *PARIPEX INDIAN JOURNAL OF RESEARCH*, 14(1). <https://doi.org/10.36106/paripex/9305506>
- Bibi, A., Bibi, S., Abu-Dieyeh, M., & Al-Ghouti, M. (2023). Hacia técnicas fisicoquímicas y biológicas sostenibles para la remediación de fenol en aguas residuales: Una revisión de las aplicaciones actuales y los mecanismos de eliminación. *Journal of Cleaner Production*, 418, 137810. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137810>

- Bravo-Medina, C., Torres-Navarrete, B., Arteaga-Crespo, Y., García-Quintana, Y., Reyes-Morán, H., Changoluisa-Vargas, D., & Paguay-Sayay, D. (2023). Variación de las propiedades del suelo en un gradiente altitudinal de pequeña escala de un bosque siempreverde de precordillera, región amazónica ecuatoriana. *Revista europea de investigación forestal*, 142, 1325-1339. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01593-6>
- Bukhman, N., Teplykh, S., & Bukhman, L. (2021). Dinámica de la infiltración de contaminación líquida en suelos porosos. *Problemas de recolección, tratamiento y transporte de petróleo y productos derivados del petróleo*, 4(126), 51-59. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2021-4-51-59>
- Bukhtiyarova, M., Nuzhdin, A., & Bukhtiyarova, G. (2023). Estudio comparativo de reactores discontinuos y de flujo continuo en la hidrogenación selectiva de grupos funcionales en compuestos orgánicos: ¿Cuál es más eficaz? *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), 14136. <https://doi.org/10.3390/ijms241814136>
- Caetano, G., De Matos Machado, R., Correia, M., & Marrucho, I. (2023). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos totales de petróleo mediante lavado de suelos con soluciones surfactantes. *Environmental Technology*, 45, 2969 - 2982. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2198733>
- Camelo, S., Vieira, F., De Carvalho, R., Conserva, V. y De Jesús Camelo Guedes, M. (2024). Simulación de contaminación de metales pesados en medios porosos saturados mediante CFD. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 17(1), e6352. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.1-068>
- Choi, J., Lee, D., & Son, Y. (2021). Procesos de lavado de suelos asistidos por ultrasonido para la remediación de suelos contaminados con metales pesados: El mecanismo de la desorción ultrasónica. *Ultrasonics Sonochemistry*, 74, 105574. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105574>
- Choong, W., Kristanti, R., Khanitchaidecha, W., Emre, M., & Albescu, M. (2023). Implementación del lavado de suelos en la remediación de suelos contaminados. *Tropical Environment, Biology, and Technology*, 1(1), 16-24. <https://doi.org/10.53623/tebt.v1i1.224>

- Christodoulis, C., et al. (2024). Procesos de oxidación avanzada para la mineralización de contaminantes orgánicos en matrices de suelo: Una revisión. *Journal of Environmental Management*, 350, 119-132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119132>
- Contreras-Mateus, M., Lopez-Lopez, M., Ariza-León, E., & Chaves-Guerrero, A. (2021). Implicaciones reológicas de la inclusión de ferrofluidos y la presencia de un campo magnético uniforme en crudos pesados y extrapesados. *Fuel*, 285, 119184. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119184>
- Cuevas, A., Leiva-Candia, D., & Dorado, M. (2024). Una visión general de la pirólisis como tratamiento de residuos para producir ecoenergía. *Energies*, 17(12), 2852. <https://doi.org/10.3390/en17122852>
- Da Silva, L., & Andrade-Vieira, L. (2025). Bioensayos ecotoxicológicos con plantas terrestres: Una visión holística de estándares, directrices y protocolos. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 28(3), 183-221. <https://doi.org/10.1080/10937404.2024.2440876>
- Dhakane, V., & Yadav, A. (2024). Modelo sustituto de dinámica de fluidos computacional-red neuronal profunda (CFD-DNN) con interfaz gráfica de usuario (GUI) para la predicción de parámetros hidrodinámicos en reactores de columna de burbujas trifásicos. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(12), 5241-5256. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00669>
- Donkadokula, N., Kola, A., Naz, I., & Saroj, D. (2020). Una revisión de técnicas avanzadas fisicoquímicas y biológicas para el tratamiento de aguas residuales de tintes textiles. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 543-560. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09543-z>
- Espinosa, M., & Ramírez-González, P. (2022). Recuperación mejorada de petróleo con D-limoneno diluido en salmuera. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 214, 110110. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110110>
- Fanaei, F., Moussavi, G., & Shekoohiyan, S. (2020). Tratamiento mejorado de suelos contaminados con petróleo mediante una operación de lavado asistida con biosurfactantes combinada con un biotratamiento del efluente estimulado con H₂O₂. *Journal of Environmental Management*, 271, 110941. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110941>

- Feng, W., Zhang, S., Zhong, Q., Wang, G., Pan, X., Xu, X., Zhou, W., Li, T., Luo, L., & Zhang, Y. (2020). Remediación de metales pesados en suelos contaminados mediante lavado de suelos con EDTMP y PAA: Propiedades, optimización y evaluación de riesgos. *Journal of Hazardous Materials*, 381, 120997. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120997>
- Gao, J., Han, H., Zhu, J., & Zhou, J. (2025). Superando los desafíos en la gestión de aguas residuales de galvanoplastia: Un estudio sobre las características de eliminación de contaminantes y los impactos económicos mediante tratamiento fisicoquímico. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects*, 1, 100060. <https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2025.100060>
- Gao, J., Hao, M., Wu, T., & Li, Y. (2021). Tratamiento eficiente de catalizadores de hidrodesulfuración contaminados con petróleo crudo mediante una mezcla de surfactante/disolvente. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105890. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105890>
- Gaur, V., Gautam, K., Vishvakarma, R., Sharma, P., Pandey, U., Srivastava, J., Varjani, S., Chang, J., Ngo, H., & Wong, J. (2024). Integración de técnicas avanzadas y aprendizaje automático para el tratamiento de lixiviados de vertederos: Abordando limitaciones y preocupaciones ambientales. *Environmental Pollution*, 358, 124134. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124134>
- Gautam, P., Bajagain, R., & Jeong, S. (2020). Efectos combinados del tamaño de máquina del suelo con el tiempo de lavado y la relación suelo-agua en la eliminación de hidrocarburos totales de petróleo de suelos contaminados con combustible. *Chemosphere*, 250, 126206. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126206>
- Gaylarde, C., & Da Fonseca, E. (2025). Biofertilización y biorremediación: ¿Cómo puede la tecnología microbológica ayudar a la crisis ecológica en los países en desarrollo? *Micro*, 5(2), 1-13. <https://doi.org/10.3390/micro5020018>
- Geng, S., Li, Z., Liu, H., Yang, C., Gao, F., He, T., & Huang, Q. (2020). Hidrodinámica y transferencia de masa en un reactor de bucle de aire externo con suspensión que integra mezcla y separación. *Chemical Engineering Science*, 211, 115294. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115294>

- Gholami, S., Behnami, A., Arani, M., & Kalantary, R. (2024). Impacto de las sustancias húmicas en la biorremediación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos y sedimentos contaminados: Una revisión. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01678-z>
- Gilman, J., Walls, L., Bandiera, L., & Menolascina, F. (2021). Diseño estadístico de experimentos para biología sintética. *ACS Synthetic Biology*, 10(5), 972-985. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.0c00385>
- Gracida, J., Corona, A., Amaro, A., Abreu, A., & Zamudio, E. (2023). Lavado de suelo contaminado con petróleo crudo utilizando un biosurfactante de *Bacillus cereus* halotolerante, cultivado en diferentes condiciones. *Biología*, 78, 2195-2202. <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01350-5>
- Haerling, K., & Prion, S. (2020). Diseño factorial de dos por dos. *Simulación clínica en enfermería*, 49, 90-91. <https://doi.org/10.1016/j.ecns.2020.06.004>
- Haller, N., Greßlinger, A., & Kulozik, U. (2021). Separación de β -lactoglobulina agregada con rendimiento optimizado en una centrifuga decantadora. *International Dairy Journal*, 114, 104918. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104918>
- Hazaimah, M., & Ahmed, E. (2021). Bioremediation perspectives and progress in petroleum pollution in the marine environment: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 54238 - 54259. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15598-4>
- He, L., Xu, Y., Zhang, M., Gul, S., Zhang, X., Zhong, H., Tang, Y., Dong, D., Xu, Y., Liu, D., Bolan, N., & Wang, H. (2024). Efecto de las tecnologías de remediación en la fertilidad del suelo en suelos contaminados con metales pesados (metaloides): Una revisión crítica. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54(9), 1417-1435. <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2315009>
- Hector, A. (2021). Diseños factoriales. En *La nueva estadística con R*. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198798170.003.0012>
- Iyer, D., & AKPatel, †. (2024). Efecto del diámetro del tanque en la suspensión de sólidos en recipientes de reactores industriales. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.47176/jafm.17.6.2273>

- Jagaba, A., Kutty, S., Lawal, I., Abubakar, S., Hassan, I., Zubairu, I., Umaru, I., Abdurrasheed, A., Adam, A., Ghaleb, A., Almahbashi, N., Al-Dhawi, B., & Noor, A. (2021). Tecnología de reactor discontinuo secuencial para el tratamiento de lixiviados de vertederos: Una revisión del estado del arte. *Journal of Environmental Management*, 282, 111946. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111946>
- Janković, A., Chaudhary, G., & Goia, F. (2021). Diseño de experimentos (DOE): una investigación sobre la influencia de diferentes diseños factoriales en la caracterización de sistemas complejos. *Energy and Buildings*, 250, 111298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111298>
- Jaramillo-Gutiérrez, M., Carreño-Lizcano, M., Ruiz-Lizarazo, J., Pedraza-Avella, J., Rivero, E., & Cruz-Díaz, M. (2020). Diseño, modelado matemático y simulación numérica de un nuevo reactor fotoelectroquímico tubular y validación experimental mediante la distribución del tiempo de residencia y los coeficientes de transferencia de masa. *Chemical Engineering Journal*, 386, 123895. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123895>
- Jindal, K., & Goswami, M. (2020). Importancia del diseño de experimentos (DoE) en ciencias farmacéuticas: Una breve revisión. *Annals of Tropical Medicine and Public Health*, 23(15), 231-537. <https://doi.org/10.36295/asro.2020.231537>
- Kang, C., Kim, D., Khan, M., Kumar, R., Ji, S., Choi, K., Paeng, K., Park, S., & Jeon, B. (2020). Remediación pirolítica de suelos contaminados con petróleo crudo. *The Science of the total environment*, 713, 136498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136498>
- Ke, Z., Wei, S., Yao, S., Chen, S., Chen, Y., & Li, Y. (2025). Redes neuronales preentrenadas con información física para el análisis del transporte de contaminantes en suelos. *Computers and Geotechnics*, 181, 107055. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107055>
- Kian, S., Nikhitha, T., Mounika, Y., Sharma, G., & Rao, R. (2023). Diseño factorial con múltiples técnicas de aleatorización optimizadas: Una revisión. *African Journal of Pharmaceutical Sciences*, 3(2), 1-13. <https://doi.org/10.51483/afjps.3.2.2023.1-13>
- Krishnan, P. (2020). Cuando y cómo utilizar el diseño factorial en la investigación de enfermería. *Nurse Researcher*, 28(3). <https://doi.org/10.7748/nr.2020.e1757>

- Kumar, N. (2024). Prueba F y análisis de varianza (ANOVA) en economía. *Mikailalsys Journal of Mathematics and Statistics*, 2(3). <https://doi.org/10.58578/mjms.v2i3.3449>
- Lateb, Y., Moussaoui, R., Elias, A., Sharrock, P., & Amrouche, T. (2024). Efecto de la centrifugación en el tratamiento de aguas residuales de almazara mediante coagulación-floculación con el sistema $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -pectina. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 2495-2505. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02418-2>
- Lee, B., Mahtab, M., Neo, T., Farooqi, I., & Khursheed, A. (2022). Una revisión exhaustiva del diseño de experimentos (DOE) para la aplicación en el tratamiento de agua y aguas residuales: conceptos clave, metodología y aplicación contextualizada. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102673. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102673>
- Lee, D., & Son, Y. (2021). Procesos de lavado de suelos asistidos por ultrasonidos utilizando disolventes orgánicos para la remediación de suelos contaminados con PCB. *Ultrasonics Sonochemistry*, 80, 105825. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105825>
- Lee, D., Lee, S., Kang, G., Park, M., Joo, Y., Yeom, J., & Chung, N. (2025). Evaluación del rendimiento de un reactor piloto de biolavado para la remediación de suelos contaminados con petróleo crudo en Kuwait. *Química Biológica Aplicada*. <https://doi.org/10.1186/s13765-024-00978-4>
- Li, F., Zhang, Y., Wang, S., Li, G., Yue, X., Zhong, D., Chen, C., & Shen, K. (2020). Perspectiva sobre la desorción térmica ex situ de suelos contaminados con petróleo mediante un enfoque de fracción basado en el número de carbonos. *Chemical Engineering Journal*, 385, 123946. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123946>
- Li, K., Zhou, F., Fu, S., Zhang, Y., Dai, C., Yuan, H., & Yu, S. (2023). Estudio del rendimiento de separación de una centrífuga decantadora utilizada para la deshidratación de lodos de carbón en agua. *Chemical Engineering Research and Design*, 196, 375-386. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.06.013>
- Li, L., Xu, X., Wang, W., Lau, R., & Wang, C. (2022). Hidrodinámica y transferencia de masa de reactores airlift de bucle interno de tubos concéntricos: Una revisión. *Bioresource Technology*, 357, 127451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127451>

- Li, Q., Wen, D., Qin, C., Qian, Y., Fu, R., & Lin, S. (2024). Tecnologías físicas, químicas, biológicas y sinérgicas para la remediación de suelos contaminados con plaguicidas. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 262, 1-34. <https://doi.org/10.1007/s44169-024-00058-0>
- Li, W., Yu, Y., Feng, X., Alheshibri, M., Bu, X., Guo, G., Ni, M., Li, Q., Liu, A., & Niu, X. (2023). Optimización de un proceso de recuperación de petróleo a partir de lodos aceitosos mediante una técnica combinada de flotación por espuma y tratamiento centrífugo. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136752. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136752>
- Li, Y., Li, X., Shi, J., Zhao, Q., & Jin, H. (2024). Modelado y análisis numérico de las características de distribución del tiempo de residencia en un reactor hidrotermal continuo de alta presión. *Chemical Engineering Science*, 299, 120310. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120310>
- Lian, X., Liao, S., Yang, Y., Zhang, X., & Wang, Y. (2020). Efecto del pH o de los iones metálicos en el comportamiento interfacial aceite/agua de un surfactante a base de ácido húmico. *Langmuir*, 36(32), 9574-9584. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01874>
- Liu, D., Xu, J., Zhao, H., Zhang, X., Zhou, H., Wu, D., Liu, Y., Yu, P., Xu, Z., Kang, W., & Fan, M. (2021). Nanoemulsiones estabilizadas por surfactantes aniónicos y no iónicos para la recuperación mejorada de petróleo en yacimientos de permeabilidad ultrabaja: evaluación del rendimiento y estudio del mecanismo. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 631, 128235. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128235>
- Liu, H., Chen, H., Huang, G., Yu, Y., Li, R., & Chen, S. (2023). Remediación de suelos aceitosos mediante microemulsión de soforolípidos ácidos. *Revista China de Ingeniería Química*. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.12.005>
- Liu, J., Zhao, L., Liu, Q., Li, J., Qiao, Z., Sun, P., & Yang, Y. (2021). Una revisión crítica sobre el lavado de suelos durante la remediación de suelos para metales pesados y contaminantes orgánicos. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 601-624. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03144-1>
- Lozano-Navarro, J., Palacio-Pérez, A., Suárez-Domínguez, E., Pérez-Sánchez, J., Díaz-Zavala, N., Melo-Banda, J., & Rodríguez-Valdés, A. (2022). Modificación de la viscosidad de

- crudo extrapesado utilizando extractos acuosos de geranio común (*Pelargonium hortorum*). *Revista de Ciencia e Ingeniería del Petróleo*, 214, 110583. <https://doi.org/10.1016/j.petro.2022.110583>
- Lv, H., Wang, J., Shu, Z., Qian, G., Duan, X., Yang, Z., Zhou, X., & Zhang, J. (2022). Distribución del tiempo de residencia y rendimiento de transferencia de calor/masa de un reactor en forma de mariposa a escala milimétrica. *Chinese Chemical Letters*, 34(3), 107931. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2022.07.053>
- Mahinroosta, R., & Senevirathna, L. (2020). Una revisión de las tecnologías de tratamiento emergentes para suelos contaminados con PFAS. *Journal of Environmental Management*, 255, 109896. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109896>
- Mainardi, P., & Bidoia, E. (2022). Conceptos fundamentales y aplicaciones recientes de diseños estadísticos factoriales. *Revista Brasileira de Biometria*, 40(1), 136-161. <https://doi.org/10.28951/bjb.v40i1.552>
- Martínez-Arcos, A., Reig, M., Cruz, J., Cortina, J., Moldes, A., & Vecino, X. (2024). Evaluación de pretratamientos físicos para la recuperación de biosurfactantes en agua de maceración de maíz antes del tratamiento avanzado de agua basado en membranas. *Journal of Water Process Engineering*, 61, 105199. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105199>
- Martínez-Rivera, A., & Cardona-Gallo, S. (2021). Biorremediación de petróleo en suelos contaminados con derrames de petróleo en ambientes tropicales. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 93(supl. 4), e20201102. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201102>
- Mathews, T., Azzu, P., Cortes, J., & Hascakir, B. (2022). Extracción eficaz de un recurso de petróleo pesado mediante un disolvente ecológico: limoneno. *Conferencia y Exposición Técnica Anual de la SPE*. <https://doi.org/10.2118/210138-ms>
- Mathews, T., Cortes, J., & Hascakir, B. (2022). Evaluación de disolventes ecológicos para la recuperación de aceites pesados. *Reunión Regional Oeste de la SPE*. <https://doi.org/10.2118/209433-ms>
- Mekonnen, K. (2024). Una evaluación preliminar de cómo las técnicas de separación clásicas afectan las características de la superficie del catalizador sólido durante la

- transesterificación. *Journal of Dispersion Science and Technology*.
<https://doi.org/10.1080/01932691.2024.2399129>
- Menkiti, N., Isanbor, C., & Ayejuyo, O. (2021). Modelado de adsorción en equilibrio de componentes seleccionados de petróleo crudo tras un derrame en el suelo del delta del Níger. *Chemistry and Ecology*, 37(5), 464-480.
<https://doi.org/10.1080/02757540.2021.1909002>
- Milosavljević, A., Pavlov-Kagadejev, M., & Stolić, P. (2024). La importancia del diseño de experimentos. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 24(1), 1-10.
<https://doi.org/10.5937/mmeb2401001m>
- Mishra, P., Kiran, N., Ferreira, L., Yadav, K., & Mulla, S. (2023). Nuevos conocimientos sobre la biorremediación de contaminantes del petróleo: una revisión sistemática. *Chemosphere*, 331, 138391. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138391>
- Mohanta, S., Pradhan, B., & Behera, I. (2023). Impacto y remediación de contaminantes de hidrocarburos de petróleo en tierras agrícolas: Una revisión. *Geomicrobiology Journal*, 41(4), 345-359. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2243925>
- Mokrani, S., Houali, K., Yadav, K., Arabi, A., Eltayeb, L., AwjanAlreshidi, M., Benguerba, Y., Cabral-Pinto, M., & Nabti, E. (2024). Técnicas de biorremediación para la contaminación orgánica del suelo: Mecanismos, microorganismos y tecnologías - Una revisión exhaustiva. *Ecological Engineering*, 205, 107338.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107338>
- Mong, G., Chong, C., Chong, W., Ng, J., Ong, H., Ashokkumar, V., Tran, M., Karmakar, S., Goh, B., & Yasin, M. (2022). Avances y desafíos en la tecnología de pirólisis sostenible: reactores, materias primas y productos. *Fuel*, 324(Pt A), 124777.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124777>
- Mousset, E., Trelu, C., Olvera-Vargas, H., Péchaud, Y., Fourcade, F., & Oturan, M. (2021). Tecnologías electroquímicas acopladas a tratamientos biológicos. *Current Opinion in Electrochemistry*, 26, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.100668>
- Muharam, Y., Muzakki, M., & Subkhan, A. (2020). Hidrodinámica del fluido de transesterificación en un reactor discontinuo agitado mediante dinámica de fluidos

computacional. *AIP Conference Proceedings*, 20003.
<https://doi.org/10.1063/5.0006533>

- Mukome, F., Buelow, M., Shang, J., Peng, J., Rodriguez, M., Mackay, D., Pignatello, J., Sihota, N., Hoelen, T., & Parikh, S. (2020). Enmienda con biocarbón como estrategia de remediación para suelos superficiales afectados por petróleo crudo. *Contaminación ambiental*, 265 Pt B, 115006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115006>
- Mwakilama, E., Gathungu, D., & Magagula, V. (2023). Uso del método de transformación integral repetida para describir el transporte de solutos en el suelo. *Heliyon*, 9(1), e12774. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12774>
- Ntumi, S. (2021). Reporting and Interpreting One-Way Analysis of Variance (ANOVA) Using a Data-Driven Example: A Practical Guide for Social Science Researchers. *Journal of Research in Educational Sciences*, 12(14), 38–47. <https://doi.org/10.14505/jres.v12.14.04>
- Offiong, N., Fatunla, O., Essien, J., Yang, C., & Dong, J. (2021). Lavado de suelos de hidrocarburos totales de petróleo e hidrocarburos aromáticos policíclicos de ultisol contaminado con petróleo crudo utilizando extractos acuosos de Waterleaf. *Environmental Technology*, 44, 35 - 44. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1961875>
- Onyiah, L. (2022). Análisis multivariado de varianza (MANOVA). En *La enciclopedia SAGE del diseño de investigación*. <https://doi.org/10.1201/b15920-13>
- Panumonwatee, G., Charoensaeng, A., & Arpornpong, N. (2021). Aplicación de ecuaciones de desviación hidrófila-lipófila a la formulación de un agente de lavado de surfactantes mixtos para la eliminación de aceite de salvado de arroz crudo de tierra de blanqueo usada. *Journal of Surfactants and Detergents*, 24(6), 947-957. <https://doi.org/10.1002/jsde.12535>
- Partovinia, A., Soorki, A., & Koosha, M. (2021). Adsorción y biodegradación sinérgicas de petróleo crudo pesado mediante una novedosa matriz híbrida que contiene *Bacillus licheniformis* inmovilizado: biorremediación en fase acuosa y en suelo. *Ecotoxicología y Seguridad Ambiental*, 222, 112505. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112505>

- Patel, A., Singhanian, R., Albarico, F., Pandey, A., Chen, C., & Dong, C. (2022). Biorremediación de residuos orgánicos y sus perspectivas cambiando. *Science of the Total Environment*, 824, 153889. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153889>
- Patlolla, S., Katsu, K., Sharafian, A., Wei, K., Herrera, O., & Mérida, W. (2023). Una revisión de las tecnologías de pirólisis de metano para la producción de hidrógeno. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113323>
- Piccolo, A., Drosos, M., Nuzzo, A., Cozzolino, V., & Scopa, A. (2024). Lavado mejorado de hidrocarburos aromáticos policíclicos de suelos contaminados mediante las propiedades tensioactivas potenciadas de la materia húmica O-alquilada de novo. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(12), 16995-17004. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32292-3>
- Quesada, C., Paz, C., Oblitas, E., Phillips, O., Saiz, G., & Lloyd, J. (2020). Las variaciones en las propiedades químicas y físicas del suelo explican las concentraciones de carbono en el suelo de la selva amazónica en toda la cuenca. *SOIL*. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>
- Rajaei, E., & Elektorowicz, M. (2025). Electrolavado de derrames en tuberías: Estrategias in situ para diferentes matrices de suelo. *Journal of Hazardous Materials*, 495, 139112. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139112>
- Ramirez, D., Shaw, L., & Collins, C. (2020). Lavado de lodos de petróleo con surfactantes y cosolventes: Recuperación de petróleo de diferentes tipos de lodos. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(5), 5867-5879. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10591-9>
- Rampado, R., & Peer, D. (2023). Diseño de experimentos en la optimización de sistemas de administración de fármacos basados en nanopartículas. *Journal of Controlled Release*, 358, 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2023.05.001>
- Reactores discontinuos. (2020). En *Seguridad térmica de los procesos químicos*. <https://doi.org/10.1002/9783527696918.ch7>
- Rehman, A., & Abbasi, K. M. (2023). Bioremediation: Review on oil spill management using oil eating microorganisms, and spill effects on marine and terrestrial environment.

- Journal of Sustainable Environmental*, 1(2), 20-35.
<https://doi.org/10.58921/jse.01.02.020>
- Ren, X., Ghazani, S., Zhu, H., Ao, W., Zhang, H., Moreside, E., Zhu, J., Yang, P., Zhong, N., & Bi, X. (2022). Desafíos y oportunidades en la pirólisis catalítica de biomasa asistida por microondas: una revisión. *Applied Energy*, 315, 118970.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118970>
- Renjie, C., Yu, X., Dong, B., & Dai, X. (2020). Enfoques de conversión de lodos en energía basados en vías que acoplan la pirólisis con la digestión anaeróbica (pretratamiento/postratamiento de hidrólisis térmica): Evaluación de la eficiencia energética y análisis de la cinética de la pirólisis. *Energy*, 190, 116240.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116240>
- Salimnezhad, A., Soltani-Jigheh, H., & Soorki, A. (2021). Efectos de la contaminación por petróleo y la biorremediación en las propiedades geotécnicas de un suelo arcilloso altamente plástico. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011>
- Santa Cruz Sandoval, C. M., & Balta Velarde, J. M. (2024). Comunicación de la responsabilidad social en redes sociales y su relación con la reputación corporativa de las empresas del sector hidrocarburos en la región Loreto, 2022. *Comunica360°*, (2), 133-166. <https://doi.org/10.26439/comunica360.2024.n2.7491>
- Schacht-Hernández, P., Miranda-Olvera, A., Jiménez-Cruz, F., Morelos-Santos, O., García-Gutiérrez, J., & Quintana-Solórzano, R. (2024). Processing and recuperación de crudo pesado mediante catalizador HPA-Ni y gas natural. *ACS Omega*, 9(33), 34089-34097.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04801>
- Schober, P., & Vetter, T. (2020). Análisis de varianza en la investigación médica. *Anesthesia & Analgesia*, 131(3), e104-e105. <https://doi.org/10.1213/ANE.00000000000004839>
- Sekar, M., Ponnusamy, V., Pugazhendhi, A., Nižetić, S., & Praveenkumar, T. (2021). Producción y utilización de aceite de pirólisis a partir de residuos plásticos sólidos: Una revisión del proceso de pirólisis y la influencia del diseño de reactores. *Journal of Environmental Management*, 302(Pt B), 114046.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114046>

- Shuttleworth, M. (2020). Diseño factorial. En *Catálisis de la A a la Z*.
<https://doi.org/10.4135/9781412961288.n148>
- Sierra Praeli, Y. (2020). Las deudas del petróleo: 474 derrames rompen la tranquilidad de la Amazonía peruana. *Mongabay Latinoamérica*.
- Silva, I., Pappalardo, J., Silva, N., Converti, A., Almeida, F., & Sarubbo, L. (2023). Tratamiento de suelo contaminado con aceite de motor con surfactante ecológico mediante un sistema móvil de remediación. *Processes*.
<https://doi.org/10.3390/pr11041081>
- Song, P., Xu, D., Yue, J., Yu, Y., Dong, S., & Feng, J. (2022). Avances recientes en la tecnología de remediación de suelos para sitios contaminados con metales pesados: Una revisión crítica. *Science of the Total Environment*, 838(Pt 3), 156417.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156417>
- Strale, F. (2024). Particionamiento para mejorar la potencia estadística y reducir el ruido: Comparación del análisis de varianza (ANOVA) unidireccional y de medidas repetidas. *Cureus*, 16(10), e75322. <https://doi.org/10.7759/cureus.75322>
- T, A. (2021). Análisis de varianza: conceptos fundamentales y aplicación con R. *International Journal of Mathematics and Computer Research*, 9(10), 2277-2284.
<https://doi.org/10.47191/ijmcr/v9i10.04>
- Taghavi, M., & Moghaddas, J. (2020). Características del flujo de las turbinas Rushton y de álabes inclinados en mezcla turbulenta y laminar. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2019-0215>
- Tang, D., French, H., Leijnse, A., Bartholomeus, R., & Van Der Zee, S. (2024). Infiltración de contaminantes reactivos bajo flujo preferencial dinámico. *Journal of Hydrology*, 634, 131111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131111>
- Tao, J., Huang, J., Geng, S., Gao, F., He, T., & Huang, Q. (2020). Investigación experimental de la hidrodinámica y la transferencia de masa en un reactor de bucle de aireación interna multietapa con suspensión. *Chemical Engineering Journal*, 381, 122769.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122769>
- Topilnytsky, P., Romanchuk, V., Yarmola, T., & Stebelska, H. (2020). Estudio de las propiedades reológicas del petróleo crudo extrapesado de los yacimientos de Ucrania.

- Tran, H., Lin, C., Hoang, H., Bui, X., Le, V., & Vu, C. (2021). Lavado de suelos para la remediación de suelos contaminados con dioxinas: Una revisión. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126767. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126767>
- Trellu, C., Péchaud, Y., Oturan, N., Mousset, E., Van Hullebusch, E., Huguenot, D., & Oturan, M. (2020). Remediación de suelos contaminados por compuestos orgánicos hidrofóbicos: ¿Cómo recuperar agentes extractores de soluciones de lavado de suelos? *Journal of Hazardous Materials*, 404(Pt A), 124137. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124137>
- Viccione, G., Stoppiello, M., Lauria, S., & Cascini, L. (2020). Modelado numérico sobre el destino y el transporte de contaminantes en la zona vadosa. *Environmental Sciences Proceedings*, 2(1), 34. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2020002034>
- Wang, G., Pan, X., Zhang, S., Zhong, Q., Zhou, W., Zhang, X., Wu, J., Vijver, M., & Peijnenburg, W. (2020). Remediación de suelos contaminados con metales pesados mediante lavado inducido por quelantes biodegradables: Eficiencias y mecanismos. *Environmental Research*, 186, 109554. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109554>
- Wu, J., Li, S., Li, Q., Yan, F., Zhou, Q., Su, S., Zhang, Y., Zhao, S., & Shi, Q. (2024). Caracterización de la composición química de petróleos pesados de alta viscosidad: propiedades macroscópicas y análisis semicuantitativo de la composición molecular mediante espectrometría de masas de alta resolución. *Petroleum Science*, 21(3), 1545-1558. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2024.02.019>
- Wu, Y., Liu, X., Dong, Q., Xiao, M., Li, B., Topalović, O., Tao, Q., Tang, X., Huang, R., Chen, G., Li, H., Chen, Y., Feng, Y., & Wang, C. (2022). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo: Análisis basado en patentes chinas. *Chemosphere*, 300, 134173. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134173>
- Wu, Y., Liu, Y., Kamyab, H., Rajasimman, M., Rajamohan, N., Ngo, G., & Xia, C. (2023). Técnicas de remediación fisicoquímica y biológica para la eliminación de sustancias químicas peligrosas disruptoras endocrinas. *Environmental Research*, 231(Pt 2), 116363. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116363>

- Wu, Y., Ye, H., & Dong, H. (2022). Optimización multiobjetivo para procesos de reacción química por lotes: El equilibrio entre economía y seguridad. *Chemical Engineering Science*, 264, 118231. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118231>
- Yang, F., Tang, C., & Antonietti, M. (2021). Sustancias húmicas naturales y artificiales para el manejo de minerales, iones, agua y microorganismos del suelo. *Chemical Society Reviews*, 50(10), 6221-6239. <https://doi.org/10.1039/D0CS01363C>
- Yang, T., Geng, S., Gao, F., He, T., Cheng, J., Huang, Q., & Chao, Y. (2020). Investigación de la hidrodinámica y la transformación de masa en un reactor de lodos de airlift de bucle interno que integra mezcla y separación. *Separation and Purification Technology*, 253, 118209. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118209>
- Yang, Y., Liang, X., & Li, X. (2023). Investigación de las interacciones interfaciales arcilla-petróleo en suelos contaminados con petróleo: Efecto de la composición del petróleo crudo. *Journal of Molecular Liquids*, 378, 121702. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121702>
- Yang, Z., Fan, H., Wang, J., & Wang, Q. (2024). Análisis de la microestructura de componentes de alta viscosidad en petróleo ultrapesado de Tahe basado en la combinación de ESI ($\pm$) FT-ICR/MS. *Fuel*, 366, 131594. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131594>
- Yue, R., Zhang, X., Zhong, Y., Chen, Z., Zhao, Y., Wang, D., Wang, Z., & Mao, X. (2021). Reducción-desorción térmica de cadmio de suelo contaminado mediante un proceso de copirólisis de biomasa. *Journal of Hazardous Materials*, 423(Pt A), 126937. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126937>
- Yusta-García, R., Orta-Martínez, M., Mayor, P., González-Crespo, C., & Rosell-Melé, A. (2017). Water contamination from oil extraction activities in Northern Peruvian Amazonian rivers. *Environmental Pollution*, 225, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.063>
- Zhang, M., Chen, W., Chuan, X., Guo, X., Shen, X., Zhang, H., Wu, F., Hu, J., Wu, Z., & Wang, X. (2023). Remediación de suelos altamente contaminados con HAP y con alto contenido mineral provenientes de una planta de coquización mediante lavado de suelos mejorado con surfactantes. *Science of the Total Environment*, 905, 168499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168499>

- Zhang, N., Yang, Y., Wu, J., Xu, C., Y., Zhang, Y., & Zhu, L. (2023). Remediación eficiente de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo mediante surfactantes sostenibles derivados de plantas. *Environmental Pollution*, 122566. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122566>
- Zhao, Q., Su, S., Wu, J., Chang, W., Zhang, S., Sun, X., Zhou, B., Lun, Z., Chung, K., & Shi, Q. (2022). Composición molecular de los ácidos nafténicos en un crudo pesado chino y su impacto en la viscosidad del petróleo. *Petroleum Science*, 19(6), 2826-2836. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.09.016>
- Zhao, Y., Sun, Y., Sun, H., Zuo, F., Kuang, S., Zhang, S., & Wang, F. (2024). Lavado químico con surfactantes para la remediación de suelos contaminados con petróleo: estado del conocimiento. *Toxics*, 12. <https://doi.org/10.3390/toxics12090648>
- Zheng, W., Cui, T., & Li, H. (2022). Tecnologías combinadas para la remediación de suelos contaminados por contaminantes orgánicos: Una revisión. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 2043-2062. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01407-y>
- Zheng, X., Li, Q., Peng, H., Zhang, J., Chen, W., Zhou, B., & Chen, M. (2022). Remediación de suelos contaminados con metales pesados mediante lavado de suelos: Una revisión. *Sustainability*, 14(20), 13058. <https://doi.org/10.3390/su142013058>
- Zoghi, P., & Mafigholami, R. (2023). Optimización del método de lavado de suelos para la eliminación de hidrocarburos de petróleo de suelos contaminados alrededor de tanques de almacenamiento de petróleo mediante la metodología de superficie de respuesta. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42777-9>
- Zou, Y., Hu, Y., Li, S., Huang, X., Cheng, X., & Pan, W. (2024). Remediación de suelos contaminados con petróleo crudo mediante una estrategia integrada de tratamiento biológico-químico-biológico. *Science of the Total Environment*, 921, 170756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170756>

ANEXOS

Anexo 1. Anexo Fotográfico

Figura 9

Muestra inicial seca



Nota. Elaboración propia.

Figura 10

Muestra en balanza analítica



Nota. Elaboración propia.

Figura 11

Agitación manual de la muestra



Nota. Elaboración propia.

Figura 12

Preparación de la mezcla suelo-crudo en laboratorio



Nota. Elaboración propia.

Figura 13

Medición de volumen de slurry suelo-líquido en probeta.



Nota. Elaboración propia.

Figura 14

Analizar el pH de la muestra



Nota. Elaboración propia.

Figura 15

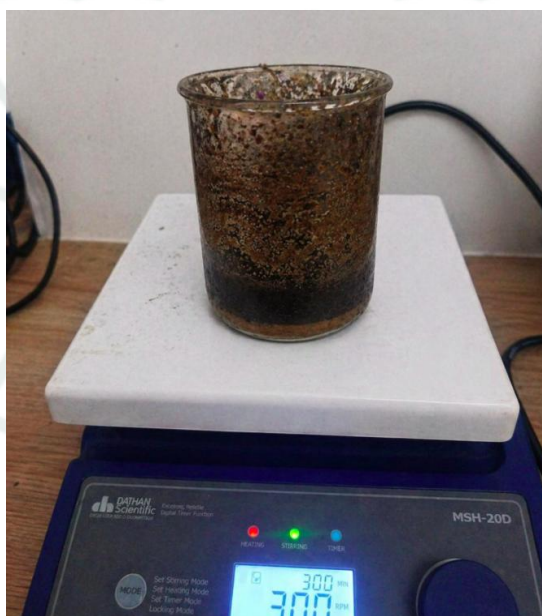
Dosificación estandarizada del crudo extrapesado sobre muestras de suelo.



Nota. Elaboración propia.

Figura 16

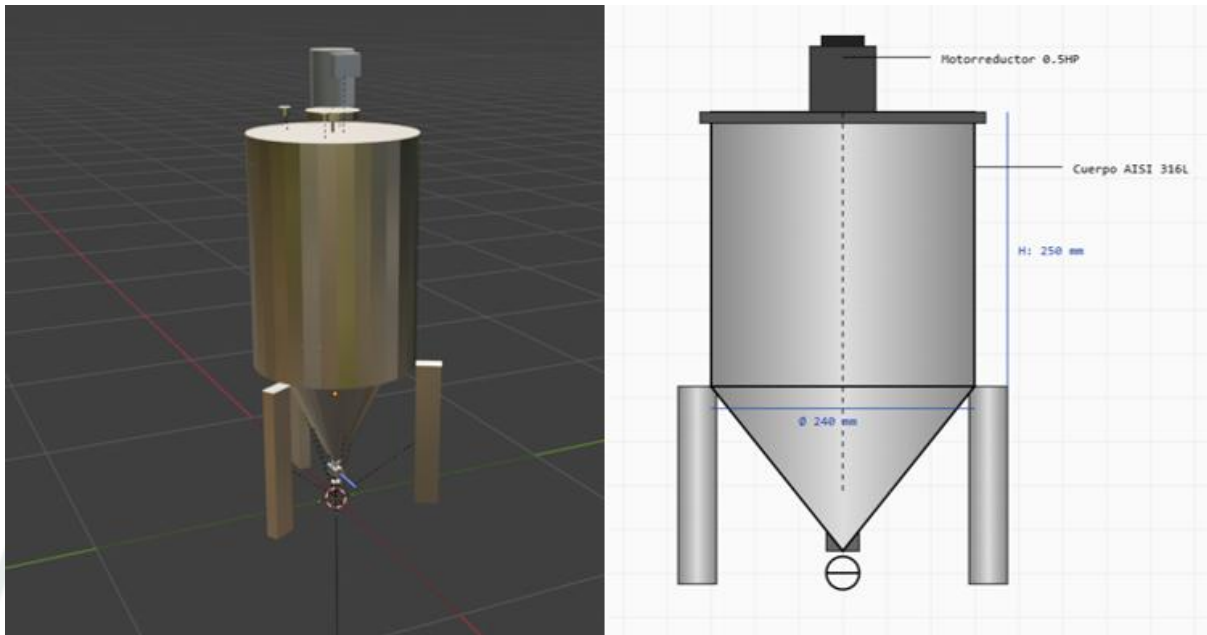
Montaje de Laboratorio para agitación



Nota. Elaboración propia.

Figura 17

Diseño del Reactor 3D y 2D CAD



Nota. Elaboración propia.

Figura 18

Reactor configurado en laboratorio



Nota. Elaboración propia.

