

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

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL DIESEL Y  
RESIDUAL (R-500) EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUELO**

**PRESENTADO POR:**

Br. ANALY DE LA TORRE VENERO

Br. NICOLL THIRZA RODRIGUEZ CONCHOY

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

**ASESOR:**

Dr. ANTONIO RAMIRO JESUS BUENO LAZO

**CUSCO – PERÚ**

**2026**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Dr. ANTONIO RAMIRO JESUS BUENO LAZO quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada:

EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL DIESEL Y RESIDUAL (R-500) EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUELO

Presentado por: ANALY DE LA TORRE VENERO DNI N° 73004638 ;  
presentado por: NICOLL THIRZA RODRIGUEZ CONCHOY DNI N°: 76722173  
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO PETROQUÍMICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 04 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 1 %.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 19 de ENERO de 2026

Dr. Antonio Ramiro Jesús Bueno Lazo

CIP. 46442

Post firma ANTONIO RAMIRO JESUS BUENO LAZO

Nro. de DNI 73878046

ORCID del Asesor 0000 - 0002 - 6415 - 3028

### Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:547437440

# ANALY - NICOLL THIRZA DE LA TORRE VENERO - R... EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL DIESEL Y RESIDUAL (R-500) EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUELO.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:547437440

Fecha de entrega

19 ene 2026, 4:47 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

19 ene 2026, 4:55 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL DIESEL Y RESIDUAL (R-500) EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUE....pdf

Tamaño del archivo

3.6 MB

154 páginas

28.706 palabras

158.952 caracteres

# 1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe




- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

## Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

---

## Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

---

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **PRESENTACIÓN**

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería de Procesos:

En cumplimiento con lo establecido en el Reglamento de Grados y Títulos vigente de nuestra Facultad, tenemos el honor de presentar la tesis intitulada: “EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL DIESEL Y RESIDUAL (R-500) EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUELO”, con la finalidad de optar al título Profesional de Ingeniero Petroquímico.

## DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a Dios, por brindarme fortaleza y esperanza a lo largo de este camino y sostenerme en los momentos difíciles. A mi querida madre, Noemí Venero, por su amor incondicional y apoyo constante, por ser mi refugio y la fuerza que me impulsó a no rendirme jamás. A mi amado padre, Flavio De La Torre, mi angelito, quien desde el cielo me guía y acompaña en cada paso de mi vida. Este logro también es tuyo y tu amor ha sido mi mayor inspiración. Dedico este trabajo a mi prima Angela, por su apoyo constante, su cariño sincero y por estar siempre presente en los momentos importantes de mi vida; por confiar en mí, alentarme a seguir adelante y acompañarme con palabras de ánimo cuando más lo necesitaba. Finalmente, a mis familiares, amigos y a los profesionales que me motivaron a seguir adelante, a crecer como persona y a formarme como una mejor profesional.

*Analy De La Torre Venero*

Dedico esta tesis a mi mami Diony Conchoy, la persona más importante de mi vida y mi ángel eterno. Su amor sigue siendo mi refugio, mi fuerza y mi mayor inspiración. Aunque ya no esté físicamente conmigo, vive en cada paso que doy, en cada meta que persigo y en cada logro que alcanzo. A mi papá, Enrique Rodriguez, por sus consejos, su apoyo incondicional y por enseñarme, día a día, a ser una mejor persona; a mi hermano, Luis Enrique, cuya compañía y respaldo han sido un impulso para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Asimismo, dedico este logro a quien, de manera silenciosa y constante, ha estado presente brindándome comprensión y apoyo, a mis mascotas, que con su compañía hicieron más llevadero este proceso, y finalmente a todas las personas que me quieren y me acompañaron durante esta etapa, por sus palabras de ánimo, confianza y reconforte.

*Nicoll Thirza Rodriguez Conchoy*

## AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por acompañarme y darme la fortaleza necesaria para mantenerme firme en cada etapa de este camino. A mi querida madre, por su apoyo incondicional, amor constante y confianza absoluta a lo largo de toda esta etapa. A mis familiares, por su acompañamiento, palabras de aliento y apoyo sincero durante todo este proceso, especialmente en el desarrollo de la tesis. A mis amigos, quienes me brindaron su ayuda y apoyo en cada etapa de la investigación, especialmente durante el proceso experimental. A mi compañera de tesis, Nicoll Rodríguez, por su paciencia, perseverancia y compromiso para sacar adelante esta investigación. Finalmente, expreso mi profundo agradecimiento a mi asesor, el Dr. Antonio Bueno, por su orientación, apoyo constante y los valiosos conocimientos transmitidos, fundamentales para mi formación profesional.

*Analy De La Torre Venero*

Agradezco a mi amada madre, Diony Conchoy, por enseñarme desde pequeña a no rendirme y a seguir adelante con fortaleza y perseverancia, valores que han sido esenciales para culminar esta etapa. A mi familia y amigos, por su apoyo constante, comprensión y palabras de aliento durante todo el proceso. De manera especial, agradezco a mi compañera de tesis y amiga, Analy de la Torre, por su compromiso, apoyo y compañía a lo largo del desarrollo de esta investigación. Asimismo, expreso mi agradecimiento a mi asesor de tesis, Dr. Antonio Bueno, por su orientación, conocimientos y disposición que hicieron posible el adecuado desarrollo del presente trabajo.

*Nicoll Thirza Rodriguez Conchoy*

## INDICE

<i>PORTADA</i> .....	<i>I</i>
<i>PRESENTACIÓN</i> .....	<i>II</i>
<i>DEDICATORIA</i> .....	<i>III</i>
<i>AGRADECIMIENTO</i> .....	<i>IV</i>
<i>INDICE</i> .....	<i>V</i>
<i>INDICE DE TABLAS</i> .....	<i>IX</i>
<i>INDICE DE FIGURAS</i> .....	<i>X</i>
<i>GLOSARIO</i> .....	<i>XIII</i>
<i>RESUMEN</i> .....	<i>XV</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>XVI</i>
<i>1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES</i> .....	<i>17</i>
INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	21
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.3.1. Problema general.....	22
1.3.2. Problema específico.....	22
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.4.1. Justificación técnica.....	23
1.4.2. Justificación económica – social.....	25
1.4.3. Justificación ambiental.....	26
1.5. OBJETIVOS.....	28



1.5.1.	Objetivo general.....	28
1.5.2.	Objetivos específicos .....	28
2.	<i>CAPÍTULO II: MARCO TEORICO</i> .....	29
2.1.	ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	29
2.1.1.	Antecedentes nacionales.....	29
2.1.2.	Antecedentes internacionales.....	30
2.2.	BASE TEÓRICA .....	32
2.2.1.	Infiltración .....	32
2.2.2.	Hidrocarburos .....	34
2.2.3.	Diésel B5 S-50 .....	35
2.2.4.	Residual (R-500).....	36
2.2.5.	Suelo.....	37
2.2.6.	Derrames.....	42
2.2.7.	Humedad.....	45
2.2.8.	Modelos matemáticos.....	45
2.3.	MARCO CONCEPTUAL.....	48
2.3.1.	Densidad aparente .....	48
2.3.2.	Densidad real .....	48
2.3.3.	Viscosidad .....	48
2.3.4.	Porosidad .....	48
2.3.5.	Suelo contaminado.....	48
2.3.6.	Temperatura del suelo .....	48
2.3.7.	Compactibilidad.....	48
2.4.	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	49
2.4.1.	Hipótesis general.....	49
2.4.2.	Hipótesis específicas .....	49
2.5.	VARIABLES .....	49
2.5.1.	Variables independientes.....	49

2.5.2.	Variables dependientes.....	49
3.	<i>CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....</i>	<i>50</i>
3.1.	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	50
3.1.1.	Tipo de investigación.....	50
3.1.2.	Diseño de investigación.....	50
3.1.3.	Nivel de la investigación .....	50
3.1.4.	Enfoque de la investigación.....	51
3.2.	MUESTRA .....	51
3.3.	MATERIALES .....	53
3.4.	EQUIPOS.....	53
3.5.	INSTRUMENTOS.....	53
3.6.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	54
3.7.	PROCEDIMIENTO .....	61
3.7.1.	Extracción y caracterización del suelo .....	61
3.7.2.	Obtención del diésel y residual (R-500).....	63
3.7.3.	Muestreo por lotes.....	64
3.7.4.	Determinación de densidad .....	66
3.7.5.	Determinación de porcentaje de humedad .....	67
3.7.6.	Acondicionamiento de la muestra.....	67
3.7.7.	Determinación del tiempo de infiltración.....	69
3.7.8.	Delimitación de variables.....	71
3.7.9.	Medición de resultados.....	71
4.	<i>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</i>	<i>73</i>
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS.....	73
4.1.1.	Viscosidad .....	73
4.2.	INFLUENCIA DE LA DENSIDAD EN LOS DIFERENTES TIPOS DE SUELO .....	74

4.2.1.	Diésel.....	74
4.2.2.	Residual (R-500).....	76
4.3.	INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO EN LA INFILTRACIÓN .....	78
4.3.1.	Diésel.....	78
4.3.2.	Residual (R-500).....	84
4.4.	AJUSTE DEL MODELO MATEMÁTICO .....	90
4.4.1.	Selección del modelo .....	90
4.4.2.	Diésel.....	92
4.4.3.	Residual (R-500).....	96
4.5.	PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	103
4.6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	106
<i>CONCLUSIONES</i> .....		<i>108</i>
<i>RECOMENDACIONES</i> .....		<i>110</i>
<i>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA</i> .....		<i>112</i>
<i>APÉNDICE</i> .....		<i>119</i>
<i>ANEXOS</i> .....		<i>129</i>

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Clasificación de tipo de suelo.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2 Cuadro Comparativo del Rango de Carbonos .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3 Propiedades fisicoquímicas del Diésel B5 S-50.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4 Propiedades fisicoquímicas del Residual (R-500).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 5 Descripción de los 12 tipos de suelo .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 6 Comportamiento del crudo en distintos tipos de suelos .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7 Componentes del diseño experimental de mezclas (Simplex Lattice) .....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 8 Cuadro de mezclas Simplex Lattice (<math>q=3</math>, <math>m=5</math>).....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 9 Ecuación del modelo Kostiakov para el diésel en el Arcilla (1) .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 10 Ecuación del modelo Kostiakov para el diésel en la Arena (12) .....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 11 Ecuación del modelo Kostiakov para el residual (R-500) en el Arcilla (1).....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 12 Ecuación del modelo Kostiakov para el residual (R-500) en la Arena (12) .....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 21 Análisis de varianza del Diésel .....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 22 Análisis de varianza del Residual (R-500) .....</i>	<i>105</i>

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Demanda total de diésel por departamento (2022-2024)</i> .....	18
<i>Figura 2 Dependencia temporal de la tasa de infiltración</i> .....	33
<i>Figura 3 Separación granulométrica por tamices</i> .....	39
<i>Figura 4 Triángulo de textura del suelo</i> .....	41
<i>Figura 5 Escenarios y rutas principales de exposición humana a contaminantes</i> .....	44
<i>Figura 6 Diseño experimental de mezclas, Simple Lattice (<math>m = 5</math>; <math>q = 3</math>)</i> .....	58
<i>Figura 7 Diseño Simple Lattice aplicado en el triángulo textural de suelo</i> .....	59
<i>Figura 8 RO-TAP con tamiz N°200</i> .....	61
<i>Figura 9 Tamiz N°200</i> .....	62
<i>Figura 10 Análisis Granulométrico del Suelo por Sedimentación</i> .....	62
<i>Figura 11 Muestras de Diesel y Residual (R-500)</i> .....	63
<i>Figura 12 Muestras de Diesel y Residual (R-500) para análisis de laboratorio</i> .....	63
<i>Figura 13 Estufa de marca IMACO, modelo HEB60R</i> .....	64
<i>Figura 14 Muestra de suelo sintético obtenido</i> .....	65
<i>Figura 15 Veintiún (21) muestras de suelo sintético obtenido</i> .....	65
<i>Figura 16 Envase de Polipropileno (PP) de 3 L</i> .....	66
<i>Figura 17 Mezcla de suelo sintético con agua</i> .....	67
<i>Figura 18 Preparación de muestra de suelo</i> .....	68
<i>Figura 19 Preparación de muestra de diversos suelos</i> .....	68
<i>Figura 20 Aplicación del hidrocarburo sobre la muestra de suelo</i> .....	70

<i>Figura 21 Monitoreo del tiempo de infiltración .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 22 Determinación de la viscosidad del diésel .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 23 Mapas ternarios de la velocidad de infiltración del diésel (cm/min) en función de la textura del suelo, para diferentes densidades aparentes y contenidos de humedad. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 24 Mapas ternarios de la velocidad de infiltración del residual R-500 (cm/h) en función de la textura del suelo, para diferentes densidades aparentes y contenidos de humedad.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 25 Infiltración del diésel en suelos con 10% y 20% de humedad (fase lenta) .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 26 Infiltración del diésel en suelos con 10% y 20% de humedad (fase intermedia) ...</i>	<i>81</i>
<i>Figura 27 Infiltración del diésel en suelos con 10% y 20% de humedad (fase alta) .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 28 Infiltración del residual (R-500) en suelos con 10% y 20% de humedad (fase lenta) .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 29 Infiltración del residual (R-500) en suelos con 10% y 20% de humedad (fase intermedia).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 30 Infiltración del residual (R-500) en suelos con 10% y 20% de humedad (fase alta) .....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 31 Ajuste del modelo Kostiakov para la Arcilla (1) .....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 32 Ajuste del modelo Kostiakov para la Arena (12).....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 33 Curvas de velocidad de infiltración en función del tiempo con Diésel .....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 34 Ajuste del modelo Kostiakov para el Arcilla (1).....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 35 Ajuste del modelo Kostiakov para el Arena (12).....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 36 Curvas de velocidad de infiltración en función del tiempo con residual (R-500) 100</i>	

<i>Figura 37 Grafico dinámico de la desviación estándar del diésel.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 38 Grafico dinámico de la desviación estándar del residual (R-500).....</i>	<i>102</i>

## **GLOSARIO**

ATSDR: Agency for Toxic Substances and Disease Registry

ASTM: American Society for Testing and Materials

cSt: Centistokes, unidad de viscosidad cinemática

EE.SS: Estación de servicio

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

GC-MS: Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas

IDW: Inverse Distance Weighting (Ponderación por Inverso de la Distancia)

INACAL: Instituto Nacional de Calidad

INDECOPI: Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual

ISO: International Organization for Standardization

LMP: Límites Máximos Permisibles

LNAPL: Light Non-Aqueous Phase Liquid (Líquido no acuoso de fase ligera)

MEM: Ministerio de Energía y Minas

MINAM: Ministerio del Ambiente

MSDS: Material Safety Data Sheet

NTP: Norma Técnica Peruana

OEFA: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

OSINERGMIN: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería



PE: Punto de Exposición

PP: Polipropileno

PPM: Partes por millón

R.C.D: Resolución del Consejo Directivo

RM: Resolución Ministerial

SCOP: Sistema de Control de Órdenes de Pedido

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

SIG: Sistema de Información Geográfica

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la infiltración del Diésel y del Residual (R-500) en función del tipo de suelo, determinando la influencia de propiedades físicas. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo experimental, utilizando un diseño de mezclas Simplex Lattice ( $q=3$ ,  $m=5$ ) que permitió generar 21 tipos de suelo sintéticos a partir de la combinación de arena, limo y arcilla. Se realizaron un total de 168 pruebas experimentales en columnas de suelo, variando la densidad ( $1.20$ ,  $1.30$ ,  $1.70$  y  $1.80 \text{ g/cm}^3$ ) y el porcentaje de humedad ( $10\%$  y  $20\%$ ). Los resultados evidenciaron comportamientos hidráulicos contrastantes entre ambos hidrocarburos. Para el Diésel, la infiltración fue rápida en suelos de textura gruesa, pero se vio restringida significativamente por la densidad; el análisis de varianza (ANOVA) confirmó que el aumento de la densidad aparente es un factor determinante ( $P<0.05$ ), reduciendo la velocidad de infiltración inicial ( $k$ ) supera el  $90\%$  en densidades aparentes mayores a  $1.70 \text{ g/cm}^3$ . Asimismo, en suelos arcillosos, el incremento de humedad al  $20\%$  provocó una reducción del  $62\%$  en la infiltración debido a la microporosidad. Por otro lado, el residual (R-500) mostró una infiltración nula o despreciable en la mayoría de casos, demostrándose que su elevada viscosidad ( $>600 \text{ cSt}$ ) actúa como factor limitante, anulando el efecto de la textura del suelo. Finalmente, se ajustaron los datos experimentales al modelo matemático de Kostikov ( $I=k \cdot t^n$ ), obteniéndose coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a  $0.90$ , lo que valida su aplicabilidad para predecir el avance del frente contaminante.

**Palabras clave:** Infiltración, Diésel, Residual (R-500), Modelo de Kostikov.

## ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the infiltration behavior of Diesel and Residual fuel oil (R-500) as a function of soil type, determining the influence of physical soil properties. The research was conducted under a quantitative experimental approach, using a Simplex Lattice mixture design ( $q = 3$ ,  $m = 5$ ), which allowed the generation of 21 synthetic soil types through the combination of sand, silt, and clay. A total of 168 experimental tests were performed in soil columns, varying bulk density (1.20, 1.30, 1.70, and 1.80 g/cm<sup>3</sup>) and moisture content (10% and 20%). The results revealed contrasting hydraulic behaviors between the two hydrocarbons. For Diesel, infiltration was rapid in coarse-textured soils but was significantly restricted by bulk density; analysis of variance (ANOVA) confirmed that increased bulk density is a determining factor ( $p < 0.05$ ), reducing the initial infiltration rate ( $k$ ) by more than 90% at bulk densities greater than 1.70 g/cm<sup>3</sup>. Additionally, in clayey soils, increasing moisture content to 20% caused a 62% reduction in infiltration due to enhanced microporosity. In contrast, Residual fuel oil (R-500) exhibited null or negligible infiltration in most cases, demonstrating that its high viscosity ( $>600$  cSt) acts as a limiting factor, overriding the influence of soil texture. Finally, the experimental data were fitted to the Kostiakov mathematical model ( $I = k \cdot t^n$ ), obtaining coefficients of determination ( $R^2$ ) greater than 0.90, which validates its applicability for predicting the advance of the contaminant front.

**Keywords:** Infiltration, Diesel, Residual (R-500), Kostiakov model.

## **1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

### **INTRODUCCIÓN**

La contaminación del suelo por hidrocarburos constituye uno de los problemas ambientales más relevantes a nivel mundial, especialmente en zonas donde se desarrollan actividades de almacenamiento, transporte y comercialización de combustibles. Los derrames accidentales de hidrocarburos, como el diésel y el residual (R-500), generan alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, afectando su estructura (Grifoni et al., 2020).

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito evaluar la infiltración del diésel y del residual (R-500) en distintos tipos de suelo, con el fin de ajustar un modelo matemático que permita estimar la velocidad de infiltración en función del tiempo. Dicho modelo busca predecir el movimiento de estos hidrocarburos en el suelo, aportando información fundamental para la gestión del riesgo ambiental, la formulación de medidas de mitigación y la planificación de estrategias de remediación ante posibles derrames.

El estudio contempla la clasificación del tipo de suelo en función de su textura, determinada mediante análisis granulométrico, así como la evaluación de las características fisicoquímicas de los hidrocarburos analizados y su interacción con el medio poroso. Mediante la experimentación controlada y la aplicación de un modelo matemático, se busca comprender la dinámica del proceso de infiltración y determinar los parámetros que influyen de manera significativa en su comportamiento.

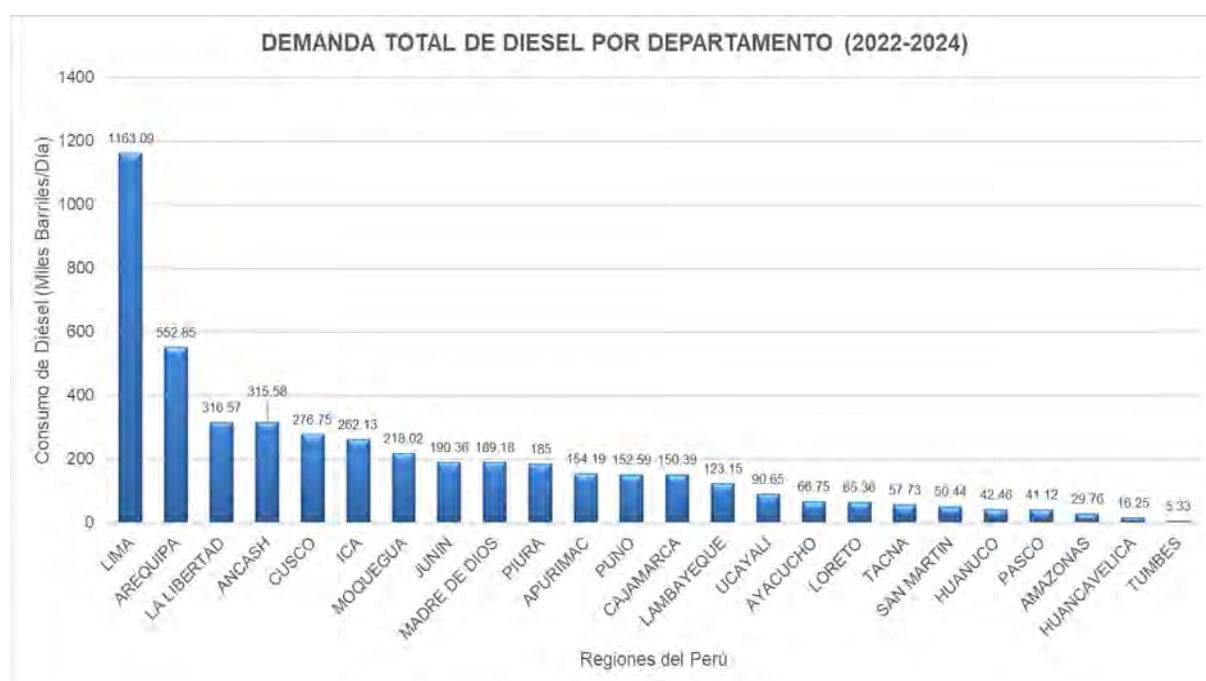
## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, el constante crecimiento de la población ha traído consigo un aumento considerable en la demanda de recursos energéticos, particularmente en los hidrocarburos como el petróleo, diésel y derivados. Este incremento en el consumo no solo responde a la necesidad de abastecer sectores como el transporte, industria y generación eléctrica, sino también ha provocado consecuencias ambientales a grandes escalas.

Según el documento SCOP (OSINERGMIN, 2025) el consumo de diésel en el Perú en el periodo 2022-2024, por regiones es como se ve en la Figura 1.

**Figura 1**

*Demanda total de diésel por departamento (2022-2024)*



*Nota.* Adaptado de (OSINERGMIN, 2025)

La Figura 1 presenta el consumo de diésel por regiones durante el periodo 2022-2024, ordenadas de mayor a menor. Lima ocupa el primer lugar con un consumo de 1163,09 miles de

barriles por día, mientras que Tumbes se encuentra en el último lugar, con un consumo de 5,33 miles de barriles por día.

Una de las principales problemáticas del uso excesivo de hidrocarburos es la contaminación del suelo, considerada como una de las amenazas ecológicas más serias a nivel global. Los derrames accidentales o el manejo inadecuado de estos compuestos pueden provocar la infiltración de sustancias tóxicas en los suelos, afectando su estructura, composición química y equilibrio ecológico.

Los hidrocarburos tienen propiedades químicas que les permite adherirse a las partículas del suelo y desplazarse a través de él, dificultando su eliminación y prolongando su presencia en el medio ambiente, afectando gravemente la biodiversidad local, dañando la flora, la fauna y los microorganismos esenciales para mantener la fertilidad del suelo.

Los hidrocarburos son la principal fuente de energía utilizada para satisfacer nuestras necesidades energéticas, pero durante su ciclo de vida pueden producir numerosos impactos ambientales. Las fugas o derrames de hidrocarburos, que pueden ocurrir desde su explotación hasta su uso, causan contaminación ambiental, cuyo primer receptor suele ser el suelo (Hernández Mendoza et al., 2021).

La contaminación del suelo por hidrocarburos puede originarse por derrames accidentales durante su transporte y disposición, fugas en tanques y tuberías de almacenamiento, o por la toma clandestina de combustible. La zona no saturada (aireada) del suelo, es decir, el área donde se asientan frecuentemente los cimientos de la infraestructura, es la primera en contaminarse por fugas o derrames de hidrocarburos (Hernández Mendoza et al., 2021).

En la investigación de Evgin y Das (1992), realizaron pruebas triaxiales en arena de cuarzo limpia y contaminada con petróleo. Encontraron que la saturación completa con aceite

de motor causó una reducción significativa en el ángulo de fricción de las arenas sueltas y densas, y un aumento drástico de la deformación volumétrica. También demostraron mediante un análisis de elementos finitos que el asentamiento de la zapata aumento debido a la contaminación por petróleo (Kermani & Ebadi, 2012).

Lamentablemente, la contaminación del suelo por diversos hidrocarburos se ha expandido rápidamente a nivel mundial, superando, en muchos casos, la capacidad de autodepuración de los suelos. Como resultado, el número de sitios contaminados con hidrocarburos ha aumentado tanto en países desarrollados como en países en desarrollo, siendo estos últimos los más afectados (Hernández Mendoza et al., 2021).

La infiltración de estos hidrocarburos en el suelo depende de diversos factores, entre ellas están el tipo de suelo, textura, porcentaje de humedad, temperatura del suelo, porosidad, contenido de materia orgánica y velocidad de infiltración.

A pesar de la relevancia de este fenómeno, en varios países latinoamericanos existen estudios que cuantifiquen la dinámica del diésel en distintos tipos de suelo bajo condiciones reales o controladas.

Ante esta situación, surge la necesidad de evaluar la infiltración del diésel y residual (R-500) en función del tipo de suelo, para comprender el comportamiento de estos contaminantes y generar información útil para la gestión ambiental.

## **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El crecimiento del sector energético a nivel nacional ha traído importantes beneficios económicos y sociales, impulsando una mayor demanda en el uso de combustibles líquidos. Sin embargo, este aumento también ha incrementado el riesgo de accidentes durante las actividades de transporte, producción y consumo de hidrocarburos, los cuales han generado daños significativos en el suelo y en los cuerpos de agua, provocando contaminación ambiental de gran magnitud.

Ante estos eventos, el Estado, a través de entidades como el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) y el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), ha implementado normativas para fortalecer la seguridad en las operaciones relacionadas con hidrocarburos. No obstante, los accidentes continúan ocurriendo de manera imprevista, causando daños fatales y afectaciones graves al medio ambiente.

Entre los incidentes más comunes se encuentra el derrame de hidrocarburos como el diésel y el residual (R-500), que alteran la composición química y física del suelo y del agua. La regeneración natural de estos ecosistemas afectados requiere de acciones inmediatas y especializadas para evitar impactos a largo plazo.

La gravedad del daño ambiental depende en gran medida del tipo de suelo afectado. Suelos como el arcilloso, arenoso y limoso presentan características distintas que influyen en la infiltración de los hidrocarburos. Mientras algunos permiten una rápida infiltración del contaminante, otros pueden retardarla, afectando así la extensión y profundidad del impacto.



### **1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### ***1.3.1. Problema general***

¿De qué manera varía la infiltración del diésel y residual (R-500) en función del tipo de suelo?

#### ***1.3.2. Problema específico***

- ¿De qué manera la densidad de los diferentes tipos de suelo influye en la infiltración del diésel y residual (R-500)?
- ¿En qué medida el porcentaje de humedad influye en la infiltración del diésel y residual en función del tipo de suelo?
- ¿Qué modelo matemático es el más adecuado para representar la relación entre las propiedades del suelo y la infiltración del diésel y residual?

### **1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

El presente trabajo de investigación tiene una gran importancia, sobre el comportamiento de los hidrocarburos en distintos tipos de suelo.

Comprender como el diésel y el residual (R-500) se infiltran y dispersan en los distintos tipos de suelo para ello es necesario:

- Establecer protocolos de monitoreo y contención en función del tipo de terreno.
- Contribuir al diseño de estrategias de remediación más eficientes y sostenibles.
- Aportar conocimientos útiles para la formulación de normativas ambientales y planes de gestión del suelo.

Esta evaluación genera conciencia sobre la necesidad de una gestión responsable de los combustibles fósiles y promueve la protección de los recursos naturales, como el suelo, que es pilar de la sostenibilidad ecológica, la salud humana y la seguridad alimentaria.

#### ***1.4.1. Justificación técnica***

La variedad de contaminantes que pueden liberarse al subsuelo y causar un impacto adverso incluye compuestos orgánicos e inorgánicos y elementos contaminantes. Cada contaminante liberado, ya sea como componente individual o como mezcla, posee características fisicoquímicas propias que rigen su comportamiento en el medio ambiente (Suthersan, 1999).

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos, dentro de ellas se encuentran el diésel y residual (R-500), los cuales, con el manejo del transporte o producción, pueden ocasionar un accidente, provocando un derrame. Esto genera una contaminación ambiental provocando daño en la flora y fauna, es por ello que esta investigación realizó una evaluación de la infiltración de los hidrocarburos, tales como el diésel y residual (R-500), en distintos tipos de suelo.

Las principales causas de contaminación de suelo con hidrocarburos son los derrames o las fugas en operaciones de transporte de carga y descarga; accidentes en instalaciones de extracción, transformación y refinación; almacenamiento de infraestructura; residuos en las instalaciones de extracción, transformación y refinación, entre otras (Chávez Miyauchi & Islas García, 2024).

Los lubricantes constituyen una fuente significativa de contaminación ambiental debido al inadecuado manejo de aceites usados y residuos derivados del petróleo. Estos contaminantes se infiltran en el suelo, alterando sus propiedades físico-químicas y representando un riesgo para los ecosistemas.

Los hidrocarburos cambian de manera temporal o permanente las propiedades fisicoquímicas de los suelos al estar en contacto con ellos, por las propiedades fisicoquímicas de los propios hidrocarburos, estos se pueden volatilizar, disolver, difundir o adsorber en el suelo, incluso llegar hasta el manto freático, lo cual incrementa su toxicidad (Chávez Miyauchi & Islas García, 2024).

La infiltración del diésel en el suelo depende de factores como la textura, densidad y contenido de humedad del suelo. Las últimas investigaciones han demostrado que el diésel se infiltra con mayor velocidad en suelos arenosos que en suelos arcillosos, debido a las diferencias en la porosidad y la conductividad hidráulica (Abu-Ashour & Shahalam, 2002).

Un estudio encontró que la tasa de infiltración del diésel disminuye con el aumento del contenido de agua inicial y la densidad en suelos franco-arcillosos, mientras que, en suelos arenosos, la infiltración es más rápida (Ma et al., 2016).

La contaminación por diésel, puede alterar las prioridades geotécnicas del suelo, como la cohesión y el ángulo de fricción interna, afectando su estabilidad y capacidad de carga (Hernández Mendoza et al., 2021).

Cada tipo de suelo presenta propiedades físicas y químicas que influyen directamente en la movilidad y retención de líquidos, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Clasificación de tipo de suelo*

Tipo de Suelo	Textura	ASTM D3282-93/97	Ejemplo de Ubicación Típica
Arenoso	Granos grandes	0,075 – 2 mm	Zonas costeras y desiertos
Arcilloso	Partículas finas	< 0,075 mm	Zonas húmedas y suelos pesados
Limoso	Partículas muy finas.	< 0,075 mm	Llanuras húmedas y terrazas aluviales

*Nota.* Adaptado de (Zapata, 2018).

- En suelos arenosos, la alta permeabilidad y la baja capacidad de retención favorecen la rápida infiltración de hidrocarburos como el diésel y residual (R-500), lo que incrementa significativamente el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.
- En suelos arcillosos, la baja permeabilidad y la alta capacidad de adsorción disminuye la infiltración del diésel y residual (R-500), reteniendo contaminantes en las capas superficiales.
- En suelos limosos, la retención y permeabilidad mantiene un equilibrio moderado; por lo que el diésel y residual (R-500) se infiltra lentamente.

El estudio de la infiltración del diésel y residual (R-500) según el tipo de suelo permite determinar en zonas de mayor vulnerabilidad y planificar con anticipación las acciones de mitigación, especialmente en zonas cercanas a fuentes de aguas (ríos o mares) o zonas agrícolas.

#### ***1.4.2. Justificación económica – social***

La infiltración de diésel en los suelos no solo representa un problema técnico y ambiental, sino también un desafío económico y social de gran magnitud. En contextos donde el transporte, almacenamiento o uso de combustibles fósiles es frecuente, como son en las zonas agrícolas, industriales y rurales, estos derrames afectan directamente la calidad del suelo y el agua, impactando las actividades productivas y la salud de las comunidades, tal y como se muestra a continuación.

##### **I. Impacto en la agricultura y producción alimentaria**

La presencia de diésel en suelos agrícolas altera las propiedades fisicoquímicas del suelo, reduciendo su fertilidad. Esto conlleva una disminución en el

rendimiento de cultivos, afectando directamente a la economía local, especialmente en comunidades que dependen de la agricultura para subsistir (FAO, 2018).

## II. Costos de remediación y tratamiento

La limpieza de suelos contaminados por hidrocarburos puede alcanzar costos muy elevados dependiendo de la extensión y profundidad de la contaminación, el tipo de suelo y el método de remediación necesario (biorremediación, extracción térmica, lavado de suelos, etc.). Comprender como infiltra el diésel en diferentes tipos de suelo permite anticiparse y reducir estos gastos mediante estrategias de prevención focalizadas.

## III. Riesgo para la salud pública

En zonas urbanas, la infiltración de diésel puede contaminar fuentes de agua subterránea utilizadas para consumo humano, generando enfermedades y afectando la seguridad sanitaria.

Desde un punto de vista económico, los costos asociados a la descontaminación de suelos por hidrocarburos son altos y varían según la extensión, profundidad del derrame, tipo de suelo afectado y la tecnología aplicada. En suelos arcillosos, la remediación es más difícil, los costos pueden duplicarse en comparación con suelos arenosos debido a la limitada permeabilidad y necesidad técnica más sofisticada (Han et al., 2021).

### ***1.4.3. Justificación ambiental***

El suelo es un recurso natural no renovable a escala humana, esencial para el equilibrio ecológico y la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres. Sin embargo, este recurso está cada

vez más amenazado por las diversas formas de contaminación, entre ellas están la contaminación por derrame de hidrocarburos.

Los eventos ocasionados por la contaminación por hidrocarburos alteran severamente la composición fisicoquímica y biológica del suelo, afectando su fertilidad, capacidad de filtración (Montanarella et al., 2015).

El deterioro de la tierra, el suelo y los recursos hídricos provocado por el ser humano reduce el potencial de producción, el acceso a alimentos nutritivos y, de forma más amplia, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que sustentan los medios de vida sanos y resilientes (Montanarella et al., 2015).

En el contexto peruano, donde existen actividades extractivas, de transporte y almacenamiento de hidrocarburos en diversas regiones, incluyendo la amazonia, la costa, norte y zonas alto andinas, esta investigación cobra gran relevancia. La evaluación de la infiltración del diésel y residual (R-500), puede ser una herramienta clave para fortalecer la gestión ambiental y territorial.

Según la Ley General Del Ambiente - Ley N° 28611 (2005) establece la responsabilidad de prevenir y controlar la contaminación del suelo y promueve el uso de estudios técnicos como base para la toma de decisiones.

Según la Ley N° 29134 que regula la gestión de los Pasivos Ambientales del Subsector Hidrocarburos (pozos mal abandonados, suelos contaminados, etc.) para mitigar su impacto en la salud y el ambiente, estableciendo mecanismos de identificación, determinación de responsables y ejecución de planes de abandono para su remediación por parte de empresas o el Estado, con el fin de recuperar áreas afectadas por actividades petroleras y gasíferas (MINAM, 2007).

Asimismo, organismos como el OEFA (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental) y el MINAM (Ministerio del Ambiente) requieren información precisa y localizada para fiscalizar adecuadamente las actividades con potencial contaminante. Esta investigación puede aportar datos técnicos útiles para:

- Elaborar zonificaciones de riesgo según tipo de suelo.
- Proponer normas técnicas específicas para el manejo de diésel y residual en suelos con alta vulnerabilidad a la infiltración.
- Mejorar los protocolos de remediación en zonas por derrames, como lo ocurrido en Loreto.

## **1.5. OBJETIVOS**

### ***1.5.1. Objetivo general***

Evaluar la infiltración del diésel y residual (R-500) en función del tipo de suelo.

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

- Evaluar cómo la densidad de los diferentes tipos de suelo influye en la infiltración del diésel y residual (R-500).
- Determinar la influencia del contenido de humedad en la infiltración del diésel y residual en función del tipo de suelo.
- Seleccionar y ajustar un modelo matemático que represente adecuadamente la relación entre las propiedades del suelo y la infiltración del diésel y residual.

## **2. CAPÍTULO II: MARCO TEORICO**

### **2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

#### ***2.1.1. Antecedentes nacionales***

En el trabajo de investigación de Gonzales Bellido (2018), titulado “Estudio De La Contaminación De Suelos Por Residuos De Hidrocarburos Y Propuesta De Manejo Ambiental De Los Talleres De Mecánica Automotriz Del Distrito De San Jerónimo-Cusco”, el objetivo principal fue evaluar el nivel de contaminación de los suelos impactados por residuos de hidrocarburos en los talleres mecánicos de la vía expresa de San Jerónimo y proponer una guía de buenas prácticas ambientales. La metodología consistió en un análisis de las propiedades físico-químicas de muestras de suelo en tres zonas específicas, complementado con la técnica de cromatografía de gas acoplado a espectrometría de masa (GC-MS) para identificar los compuestos presentes, además de la aplicación de encuestas a los responsables de los talleres. Los resultados principales demostraron alteraciones críticas en el suelo, como una porosidad deficiente (36.52% a 46.72%), un incremento anómalo de la materia orgánica (hasta 17.39%) debido a la carga petrogénica y la presencia de compuestos como n-pentadecano y 2-metilnaftaleno; asimismo, se detectó que la mayoría de establecimientos carece de una gestión adecuada de residuos. A partir de estos hallazgos, se concluye que la actividad mecánica en la zona genera una degradación severa de las propiedades naturales del suelo, lo que hace imperativa la implementación de una guía de manejo que incluya la adecuación de infraestructura, segregación técnica y disposición final de los residuos para mitigar el impacto ambiental.

En la investigación de Narváez Aranda (2016), en su artículo “Modelamiento y simulación espacial de la conductividad hidráulica por contaminación de hidrocarburos en suelos de Trujillo mediante método directo”, se realizó un estudio cuyo objetivo fue modelar y



simular la distribución espacial de la conductividad hidráulica en suelos afectados por hidrocarburos en el distrito de Trujillo. La metodología empleada consistió en un enfoque cuantitativo donde se recolectaron muestras en zonas críticas para evaluar la conductividad hidráulica saturada a través de un permeámetro de carga constante, procesando posteriormente la información en un sistema de información geográfica (SIG) mediante métodos de interpolación como kriging e IDW para generar mapas de variabilidad espacial. Los resultados principales revelaron una reducción significativa de la conductividad hidráulica en los sectores con mayores concentraciones de contaminantes, fenómeno vinculado a la obstrucción de macroporos por el hidrocarburo, y se determinó que el impacto variaba según el tipo de suelo y su grado de saturación. A partir de estos hallazgos, se concluye que el modelamiento espacial es una herramienta eficaz para identificar con precisión las áreas de mayor degradación, sirviendo como soporte técnico fundamental para la gestión de riesgos hídricos, la planificación urbana y el diseño de estrategias de remediación ambiental en zonas contaminadas.

### ***2.1.2. Antecedentes internacionales***

En el trabajo de investigación de Cerqueira et al. (2019), titulado “Percolação de diesel e água em solo Areno siltoso não saturado: uma abordagem experimental”, se realizó un estudio cuyo objetivo fue realizar un análisis comparativo experimental de los flujos bidimensionales de agua y diésel en un suelo areno-siltoso compactado, evaluando además la precisión de modelos matemáticos unidimensionales para describir dicho comportamiento. La metodología empleada consistió en ensayos de flujo bidimensional utilizando un canal de flujo instrumentalizado con tensiómetros y análisis visual por imágenes, donde el suelo fue compactado a una humedad del 5% y una densidad de  $1.62 \text{ g/cm}^3$ . Los resultados principales indicaron que la migración de los fluidos ocurrió de forma uniforme y simétrica, con un tiempo de llegada de la frente de diésel 2.3 veces mayor que el del agua, comportamiento explicado por la movilidad del líquido y la tensión superficial; asimismo, se determinó que el modelo de

Philip (1969), al corregir el esparcimiento lateral, presentó la mejor adherencia a los datos experimentales con un error cercano al 10%. A partir de estos hallazgos, se concluye que el uso de modelos matemáticos ajustados y la caracterización de las propiedades de los fluidos permiten predecir con alta confiabilidad el avance de contaminantes en la zona no saturada del suelo, proporcionando parámetros esenciales para la prevención y remediación de entornos impactados por hidrocarburos.

En la investigación de Ma et al. (2016), en su artículo titulado “Diesel oil infiltration in soils with selected antecedent water content and bulk density”, se realizó un estudio cuyo objetivo fue evaluar experimentalmente la influencia del contenido de agua antecedente y la densidad aparente del suelo en los procesos de infiltración de diésel (LNAPL) en texturas de arena fina y franco arcilloso limoso. La metodología consistió en el uso de columnas de vidrio con suelo empacado a distintas densidades y humedades, empleando un sistema de botella de Mariotte para mantener una carga hidráulica constante; además, se aplicaron modelos físicos (Green-Ampt, Philip y Parlange) y empíricos (Kostiakov y Kostiakov-Lewis) para ajustar los datos de infiltración registrados. Los resultados principales evidenciaron que el diésel infiltra con mayor velocidad en suelos arenosos, mientras que en suelos franco arcillosos la infiltración disminuye significativamente al aumentar la compactación y la humedad previa debido a la reducción del gradiente de presión inicial; no obstante, en arenas finas, el agua facilitó el flujo del hidrocarburo al actuar como lubricante en los poros. A partir de estos hallazgos, se concluye que tanto la estructura física del suelo como su estado hídrico inicial son factores determinantes en la movilidad del diésel, siendo el modelo de Kostiakov-Lewis el que mejor representa matemáticamente este fenómeno para la predicción de avances de contaminantes en el subsuelo.

En el trabajo de investigación de Bergueiro et al., (1989), titulado “Conducta de algunos crudos y derivados del petróleo derramados en arena de playa de Baleares”, se realizó un

estudio cuyo objetivo fue determinar la capacidad de retención de diferentes tipos de arenas de playa de las Islas Baleares y analizar la infiltrabilidad de diversas mezclas de hidrocarburos, como crudos Maya, Zakum e Irán Pesado, Gas Oil y Gasolina. La metodología se basó en un diseño experimental utilizando columnas de vidrio rellenas con tres variantes de arena (normal, gruesa de 0.5 a 1 mm y media de 0.25 a 0.5 mm), donde se midieron parámetros de volumen retenido, capacidad de retención específica y tiempo de infiltración hasta alcanzar la base de la columna. Los resultados principales revelaron que la capacidad de retención varía según la granulometría, siendo la arena media la que presentó mayor retención frente a la arena gruesa; asimismo, se identificó que la presencia previa de agua de mar en el material poroso reduce drásticamente la capacidad de la arena para retener los hidrocarburos. A partir de lo expuesto, se concluye que las características texturales de la arena y el grado de saturación hídrica son factores críticos que condicionan la profundidad de la migración del contaminante, información esencial para optimizar los procesos de recuperación y limpieza en ecosistemas costeros afectados por derrames.

## **2.2. BASE TEÓRICA**

### ***2.2.1. Infiltración***

La infiltración se define como la capacidad inherente de cada tipo de suelo para permitir el movimiento descendente del agua o fluido a través de los espacios porosos existentes entre sus partículas (Hillel, 1998).

La infiltración de productos petrolíferos en medios porosos es un proceso complejo que se ve afectado por las características tanto de los suelos como de los productos petrolíferos (Ma et al., 2016).

La velocidad de infiltración es la rapidez con la que el fluido entra en el suelo y varía según las propiedades del mismo. En suelos porosos y bien estructurados, la infiltración tiende

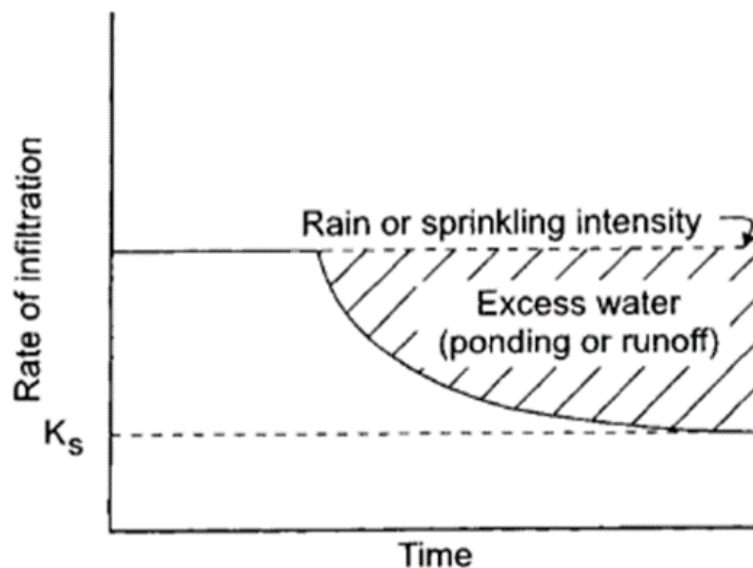
a ser más rápida, mientras que en suelos compactados o con alta proporción de arcilla, el proceso se ralentiza. Esta velocidad es relevante cuando se evalúa la capacidad del suelo para filtrar contaminantes.

Los principios básicos que rigen los procesos de infiltración han sido revisados por Philip en 1969, Swartzendruber y Hillel en 1973, Slack en 1983, Hanks en 1991, Kutilek y Nielsen en 1994 y Stephens en 1995, entre otros.

Hillel (1998), introdujo el término "infiltrabilidad" para definir el flujo de infiltración que ocurre cuando el fluido a presión atmosférica está disponible libremente en la superficie del suelo. Esta terminología busca evitar la confusión entre extensión e intensidad implícita en el término "capacidad" de infiltración, permitiendo el uso de "tasa de infiltración" para describir el flujo superficial.

## Figura 2

*Dependencia temporal de la tasa de infiltración*



*Nota.* Extraído de (Hillel, 1998)

### 2.2.2. Hidrocarburos

Un hidrocarburo es un compuesto orgánico cuya estructura molecular está formada exclusivamente por átomos de carbono (C) e hidrógeno (H) unidos mediante enlaces covalentes (Speight, 2002). Estos compuestos varían considerablemente según el número y la disposición de los átomos de carbono e hidrógeno en su estructura molecular (McMurry, 2008).

Los hidrocarburos, que constituyen la base de sustancias como el petróleo crudo y el gas natural, son compuestos esenciales que sirven tanto como fuentes de energía como materias primas en la industria petroquímica (Chávez Miyauchi & Islas García, 2024).

De acuerdo a la Agencia de sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR), los derivados del petróleo se clasifican en fracciones por su Número de Carbono Equivalente (ATSDR, 2002).

**Tabla 2**

*Cuadro Comparativo del Rango de Carbonos*

Compuestos de Petróleo	Rango de Carbonos (Cn)	Descripción Breve
Gasolina	C4 – C12	Producto ligero y altamente volátil. La fracción aromática contiene compuestos como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, que son componentes clave de la gasolina.
Kerosene	C9 – C16	Conocido también como aceite combustible #1. Similar en composición a los combustibles para aviones (jet fuels) y consiste principalmente en alifáticos.
Diésel	C10 – C25	Más pesado que el kerosene. Se clasifica como un aceite combustible ligero y su composición abarca el rango final de los destilados medios y el comienzo de los pesados.
Aceites lubricantes	C16 – C40	Son fracciones de alto punto de ebullición del petróleo crudo. Los aceites minerales y las ceras, que son lubricantes, se asocian a menudo con la fracción alifática.
Residual	>C40	Son las fracciones más pesadas y viscosas de los petróleos crudos, con puntos de ebullición muy altos y que no se evaporan fácilmente.

*Nota.* Adaptado de (ATSDR, 2002)

### **2.2.3. Diésel B5 S-50**

El combustible diésel, también conocido como gasóleo o gasoil, se obtiene a partir de la destilación y la purificación del petróleo crudo. Para ello, se utiliza una torre de craqueo donde se introduce el petróleo y se calienta. Cuando alcanza el grado de ebullición, los vapores se condensan y los residuos se separan para hacer grasas, aceites pesados o fibras textiles. Posteriormente, el vapor vuelve a calentarse y de esta segunda destilación se obtiene el fueloil, a partir del cual se deriva el gasóleo. Cada proceso de destilación proporciona un hidrocarburo más ligero que el anterior (Repsol, 2025).

El diésel es un tipo de combustible que se utiliza principalmente en motores diésel debido a su alto contenido energético y su eficiencia en la combustión. Se clasifica de acuerdo a su calidad y contenido de azufre, que es un componente contaminante que afecta el medio ambiente (MBGS, 2025).

El diésel utilizado en la investigación corresponde al Gasóleo A, un combustible refinado con aditivos de alta calidad empleado comúnmente en vehículos debido a sus prestaciones; además, se clasifica como diésel ultra, ya que contiene menos de 50 ppm de azufre, lo que contribuye a la reducción de emisiones contaminantes; finalmente, presenta una composición B5, es decir, una mezcla de 5 % de biodiésel y 95 % de diésel convencional, característica relevante para su comportamiento físico-químico en los procesos de infiltración estudiados (Repsol, 2025).

**Tabla 3***Propiedades fisicoquímicas del Diésel B5 S-50*

Apariencia	Líquido claro y brillante
Color	Tonalidad natural ámbar, puede variar por el uso de colorantes
Punto de inflamación (°C)	52 mínimo
Inflamabilidad	Líquidos y vapores inflamables
Límites de inflamabilidad (%Vol. en aire)	Inferior 1.3 – Superior 6
Gravedad específica a 15.6 °C	0.84 – 0.86 aprox.
Viscosidad cinemática a 50°C, cSt	1.7 a 4.1

*Nota.* Extraído de (Petroperú, 2019a)

**2.2.4. Residual (R-500)**

El Residual (R-500), también conocido como Petróleo Industrial N.º 500, es un combustible residual pesado derivado de la refinación del petróleo crudo.

Según Petroperú (2019b), el Residual (R-500) es un combustible residual para uso industrial, obtenido de procesos de refinación del petróleo crudo, que cumple con las normas técnicas peruanas y con el estándar internacional ASTM D-396. Se caracteriza por su alta viscosidad y requiere precalentamiento durante su manipulación y uso.

**Tabla 4***Propiedades fisicoquímicas del Residual (R-500)*

Apariencia	Líquido muy viscoso
Color	Marrón oscuro a negro
Punto de inflamación (°C)	65 mínimo
Inflamabilidad	Líquidos y vapores inflamables
Límites de inflamabilidad (%Vol. en aire)	Inferior 1.3 – Superior 6
Gravedad específica a 15.6 °C	0.96 – 0.99 aprox.
Viscosidad cinemática a 50°C, cSt	Mín. 641, máx. 1060

*Nota.* Extraído de (Petroperú, 2019b)

El Residual (R-500) se emplea principalmente como combustible en calderas industriales, hornos de alta temperatura, sistemas de generación de vapor y equipos de combustión en procesos industriales.

#### **2.2.5. Suelo**

El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre, compuesta por una mezcla de minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. Se forma a lo largo del tiempo mediante la descomposición de rocas y la actividad biológica, desempeñando un papel crucial en el soporte de la vida y los ecosistemas terrestres (Caracteristicasdel.com, 2023).

El suelo, un sistema complejo y dinámico, se compone de diversos elementos esenciales para el sustento de la vida vegetal.

- Los minerales, originados en la lenta descomposición de la roca madre o transportados por la acción eólica e hídrica desde áreas erosionadas, constituyen una parte fundamental de su estructura.
- La materia orgánica, producto de la descomposición de restos vegetales y animales. Asimismo, los microorganismos, que incluyen tanto degradadores mecánicos (insectos y lombrices) como degradadores químicos (hongos y bacterias), son vitales para la liberación de nutrientes a partir de la materia orgánica y la pulverización de las rocas. La actividad de lombrices e insectos genera poros que facilitan la aireación, el almacenamiento hídrico y el crecimiento radicular.
- El agua y el aire ocupan los poros o espacios intersticiales entre las partículas del suelo, cuya distribución y tamaño influyen significativamente en sus propiedades. Una predominancia de poros pequeños resulta en suelos



compactos, pesados y húmedos, limitando el desarrollo radicular. Por el contrario, una abundancia de poros grandes genera suelos sueltos con rápida desecación. Es importante destacar que la absorción de agua por las plantas se dificulta en poros de menor tamaño.

Tanto los organismos del suelo como las plantas requieren agua para su supervivencia. Las plantas utilizan el agua para mantener su estructura, transportar nutrientes y llevar a cabo procesos metabólicos esenciales como la respiración y la nutrición, incluyendo la fotosíntesis, donde el agua absorbida por las raíces juega un papel crucial. Si bien cada componente del suelo es importante individualmente, el equilibrio adecuado entre ellos es fundamental (Lanly, 1996).

Según su textura, se distinguen tres tipos de suelos (Universidad Nacional de la Plata, 2017).

- La arena, comúnmente encontrada en los lechos de diversos ríos, se caracteriza por partículas de gran tamaño.
- El limo está compuesto por partículas de tamaño intermedio entre la arena y la arcilla.
- La arcilla, por otro lado, se distingue por sus partículas extremadamente finas. Cuando se satura de agua, forma barro. Los suelos arcillosos se consideran pesados debido a su pobre drenaje y lenta desecación.

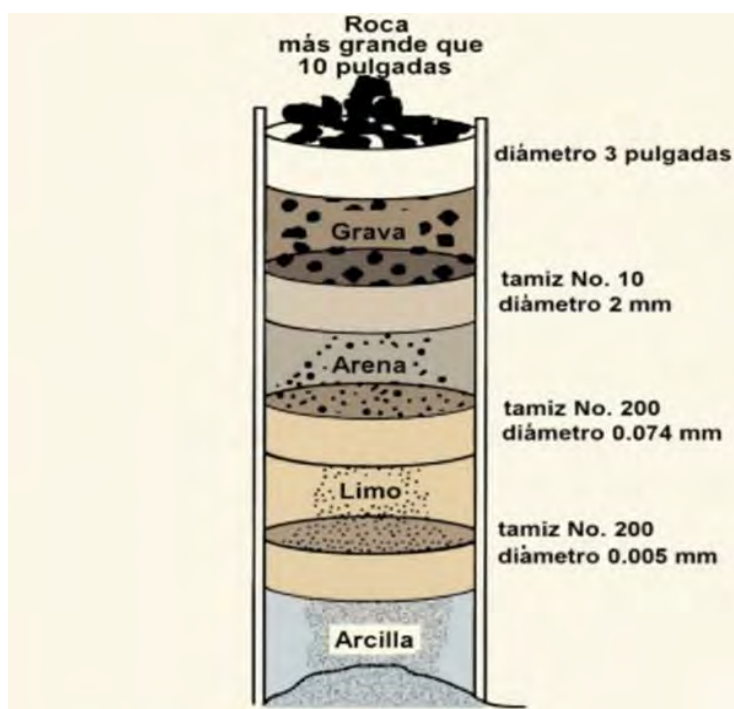
Un suelo franco se define como aquellos que tienen un equilibrio perfecto entre arena, limo y arcilla. No son ni demasiado pesados ni demasiado ligeros, lo que permite una buena retención de humedad y un drenaje adecuado, evitando la saturación de agua u otros fluidos (RawData, 2024).

Un sistema de clasificación de suelos proporciona un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada; consiste en categorizar y agrupar a los suelos junto con otros que posean características semejantes en cuanto a propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas similares (Zapata, 2018).

Tal como se muestra en la Tabla 1 (véase Apartado 1.4.1), referente a la clasificación de los tipos de suelo, es fundamental considerar el tamaño de las partículas (granulometría) según el ASTM D3282-93/97. Para ello, se emplean tamices que permiten su separación en diferentes fracciones, obteniéndose gravas, arenas, limos y arcillas. La Figura 3 representa el esquema de separación mediante tamices.

### Figura 3

*Separación granulométrica por tamices*



*Nota.* Adaptado de (El Inge, 2025)

La figura muestra la clasificación granulométrica del suelo según el tamaño de partículas, ordenadas de mayor a menor diámetro: roca, grava, arena, limo y arcilla. Cada separación se asocia a un tamiz específico, evidenciando cómo la reducción del tamaño de partícula influye en las propiedades físicas del suelo, como la porosidad y el comportamiento frente a la infiltración.

### *Texturas del suelo*

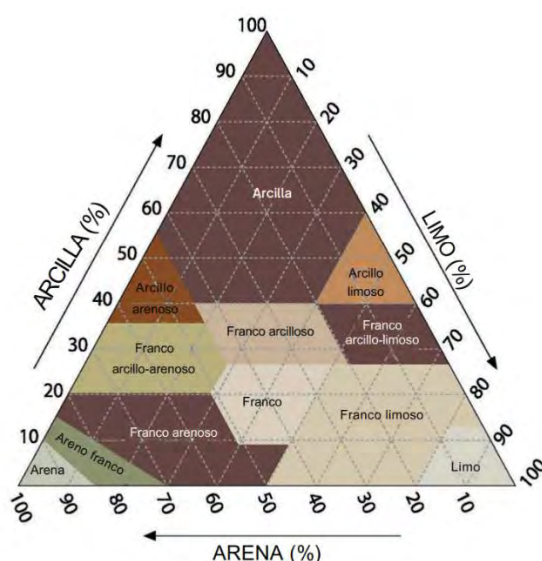
La textura del suelo se define por la proporción relativa de partículas minerales de diferentes tamaños, tales como la arena, el limo y la arcilla, presentes en una muestra. Esta característica es fundamental, ya que influye de manera directa en múltiples propiedades físicas del suelo y en su idoneidad para distintos usos (Weil & Brady, 2017).

Los términos como franco arenoso, arcillo limoso o franco arcilloso se emplean para describir las combinaciones de estas partículas, reflejando el comportamiento del suelo frente a factores como la retención de agua, aireación, facilidad de laboreo y estabilidad estructural. La textura tiene implicancias prácticas evidentes: por ejemplo, el contraste entre la sensación de una playa arenosa (suelo suelto y drenante) y una playa arcillosa (suelo pegajoso y compacto) se debe principalmente a las diferencias texturales.

El triángulo de textura del suelo se utiliza para determinar la clase textural. Hay 12 clases texturales de suelo. Este triángulo se usa para que términos como "arcilla" o "franco" siempre tengan el mismo significado. Cada textura corresponde a porcentajes específicos de arena, limo o arcilla (Soil Science Society of America, 2014).

**Figura 4**

*Triángulo de textura del suelo*



*Nota.* Extraído de (Soil Science Society of America, 2014)

Cada vértice del triángulo representa el 100% de una de las fracciones (arena, limo o arcilla), y las combinaciones posibles se distribuyen dentro del triángulo, permitiendo determinar la clase textural específica de un suelo mediante la intersección de líneas que indican los porcentajes correspondientes.

La textura del suelo influye en propiedades esenciales como la retención y movimiento del agua, la aireación, la capacidad de intercambio catiónico, la actividad biológica y la facilidad de laboreo (Weil & Brady, 2017). Por ejemplo, los suelos con alto contenido de arcilla suelen retener más agua, pero presentan menor permeabilidad y aireación que los suelos arenosos, que drenan rápidamente, pero retienen poca humedad. En cambio, los suelos francos presentan un equilibrio entre las tres fracciones, siendo generalmente los más aptos para el cultivo por sus propiedades físicas balanceadas.

A continuación, en la Tabla 5 se muestra una breve descripción de los 12 tipos de suelo.

**Tabla 5***Descripción de los 12 tipos de suelo*

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Descripción Breve</b>
Arena	Partículas grandes y sueltas, drena rápido, poca retención de agua.
Areno Franco	Más fino que la arena, algo de retención de agua
Franco arenoso	Textura suelta, más fértil y con mejor retención de agua.
Franco	Equilibrio entre arena, limo y arcilla, buen drenaje y retención.
Franco limoso	Rico en limo, suave al tacto, buena retención, pero drenaje limitado.
Limo	Muy fino y suave, retiene agua fácilmente, propenso a compactarse.
Franco arcillo arenoso	Contiene arena y arcilla; algo pesado, retiene agua.
Franco arcilloso	Arcilloso con buena estructura, retiene agua, pero más manejable que arcilla pura.
Franco arcillo limoso	Rica en limo y arcilla, muy pegajosa y húmeda.
Arcillo arenoso	Alta arcilla y arena, suelo pesado, mal drenaje.
Arcillo limoso	Arcilla con limo, pegajosa, compacta, retiene mucha agua.
Arcilla	Muy compacta, pegajosa, alta capacidad de retención.

*Nota.* Adaptado de (MYCAL, 2022)

#### **2.2.6. Derrames**

El comportamiento de un derrame de petróleo o sus derivados depende de múltiples factores, los cuales determinan su dispersión, persistencia y efectos. Estos incluyen la densidad, viscosidad, volatilidad y composición química, así como también de las condiciones ambientales como temperatura, viento, radiación solar y/o precipitación, también es un factor

importante las características del suelo. También influyen en gran medida el volumen del derrame (Riazi, 2021).

Las proporciones de arena, limo y arcilla definen propiedades físicas esenciales como la porosidad, permeabilidad, retención de agua y capacidad de adsorción, que influyen directamente en la migración y retención del crudo. En casos de derrames, estas características condicionan la trayectoria de la fase líquida no acuosa (LNAPL) (Fetter, 1999).

En este contexto, la Tabla 6 compara el comportamiento del crudo en distintos tipos de suelos.

**Tabla 6**

*Comportamiento del crudo en distintos tipos de suelos*

<b>Propiedades / Tipos</b>	<b>Suelos Arenosos</b>	<b>Suelos Arcillosos</b>	<b>Suelos Limosos</b>
Textura	Gruesa	Fina	Suave y fina
Permeabilidad	Alta	Baja	Intermedia
Ruta del Crudo	Rápida y profunda.	Lenta, dispersión lateral.	Moderada.
Retención / Adsorción	Baja	Muy alta y fuerte	Moderada a alta

*Nota.* Adaptado de (Fetter, 1999)

La contaminación a causa de derrames de hidrocarburos representa una de las problemáticas ambientales más críticas a nivel global. Estos eventos liberan compuestos orgánicos persistentes y tóxicos que se infiltran en el subsuelo. Una vez liberados, estos contaminantes pueden movilizarse a través de diversos mecanismos.

**Figura 5**

*Escenarios y rutas principales de exposición humana a contaminantes*



*Nota.* Extraído de (MINAM, 2015)

La Figura 5 ilustra de manera esquemática los principales escenarios y rutas de exposición humana a contaminantes provenientes de sitios contaminados, como vertederos o sitios industriales. Este diagrama resulta fundamental para comprender el proceso completo, desde la liberación inicial del contaminante en el medio (mecanismo de liberación), su movilización a través de distintos medios ambientales como el agua subterránea o el aire (medio de transporte de contaminantes), hasta llegar al punto de exposición (PE) y la vía específica mediante la cual el ser humano puede entrar en contacto con el agente contaminante (MINAM, 2015).

### 2.2.7. *Humedad*

Según Cherlinka (2023), la humedad de suelo se considera como la cantidad total de agua que hay en los poros del suelo o en su superficie. Puede expresarse como un porcentaje, agua por peso o volumen, o pulgadas de agua por pie de suelo.

La humedad del suelo puede ser expresada en forma gravimétrica, volumétrica o como grado de saturación (Hillel, 2004).

La humedad del suelo puede ser definida en términos de masa la cual es referida como contenido gravimétrico de humedad o humedad másica la que se define como la masa de agua en relación a la masa del material solido seco de la muestra de suelo bajo análisis (Bueno Dueñas, 2023).

Según (Bowles, 1981), para determinar la cantidad de agua presente en una cantidad dada de suelo en términos de su peso en seco se aplica la siguiente formula:

$$w = \frac{W_{agua}}{W_{suelo\ seco}} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

$w$ : Porcentaje de humedad presente en el suelo,

$W_{agua}$ : Peso del agua en gramos (g)

$W_{suelo\ seco}$ : Peso del suelo seco en gramos (g).

### 2.2.8. *Modelos matemáticos*

Según (Hillel, 1998), a lo largo de los años, se han propuesto numerosas formulaciones para describir la infiltrabilidad en función del tiempo o de la cantidad total de fluido infiltrado en el suelo, abarcando desde enfoques puramente empíricos hasta aquellos con una base teórica.



En las siguientes ecuaciones, se utiliza el símbolo  $i$  para representar la infiltrabilidad, definida como el flujo volumétrico de agua por unidad de área superficial y por unidad de tiempo (cm/h);  $I$  como el volumen acumulado de agua infiltrada por unidad de área superficial (cm); y  $t$  como el tiempo (h). De este modo, se cumple que:  $i = \frac{dI}{dt}$  y  $I = \int_0^t i \, dt$  (Hillel, 1998).

#### 2.2.8.1. Ecuación de Green y Ampt (1911)

$$i = i_c + \frac{b}{I} \quad (2)$$

Donde  $i_c$  es la infiltrabilidad asintótica (cm/h) y  $b$  es una constante característica (cm<sup>2</sup>/h). En  $t=0$ , el valor de  $I$  es cero, por lo que la ecuación predice una infiltrabilidad inicialmente infinita, que disminuye rápidamente al inicio y luego de forma gradual hasta alcanzar el valor constante  $i_c$  (Hillel, 1998).

#### 2.2.8.2. Ecuación de Kostiaikov (1932)

$$I = k t^n \quad (3)$$

Donde  $k$  es una constante empírica (cm·h<sup>n</sup>) y  $n$  es un parámetro adimensional. Esta formulación predice una infiltrabilidad inicial infinita y una disminución progresiva de  $I$  hasta tender a cero conforme aumenta el tiempo. (Hillel, 1998).

#### 2.2.8.3. Ecuación de Horton (1940)

$$i = i_c + (i_0 - i_c) e^{-kt} \quad (4)$$

Donde  $i_0$  es la infiltrabilidad inicial (cm/h),  $i_c$  es la infiltración final (cm/h) y  $k$  es la constante de decaimiento (h<sup>-1</sup>). Esta ecuación describe una reducción exponencial de la infiltrabilidad desde un valor inicial finito hasta un valor constante (Hillel, 1998).

#### 2.2.8.4. Ecuación de Philip (1957)

$$i = i_c + \frac{S}{2t^{1/2}} \quad (5)$$

Donde  $i_c$  es la infiltrabilidad asintótica (cm/h) y  $s$  es la sorptividad del suelo (cm/h<sup>1/2</sup>). Esta ecuación representa una infiltrabilidad infinita en el tiempo inicial y puede integrarse para obtener expresiones explícitas del volumen infiltrado acumulado (Hillel, 1998).

#### 2.2.8.5. *Ecuación de Holtan (1961)*

$$i = i_c + a(M - I)^n \quad (6)$$

Donde  $i_c$  es la infiltrabilidad final (cm/h),  $a$  es una constante (cm<sup>1-n</sup>/h),  $M$  representa la capacidad máxima de almacenamiento de fluido del suelo (cm) y  $n$  es un parámetro adimensional. Esta ecuación es válida únicamente para  $0 \leq I \leq M$ ; para valores mayores se establecen que:

$$i = i_c \text{ para } I > M \quad (7)$$

Ya que no hay razón para suponer que la infiltración debería cesar una vez que  $I=M$ . Por lo tanto, en lugar de una única ecuación válida para todo  $I>0$ , la expresión de Holtan debe entenderse como la especificación matemática de dos formas representada por las Ecuaciones 6 y 7. La Ecuación 6 es integrable, pero solo proporciona  $t$  como una función explícita de  $I$ , y no viceversa (Hillel, 1998).

## **2.3. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.3.1. *Densidad aparente***

Relación entre la masa y el volumen total de un sólido, incluyendo sus poros y espacios vacíos.

### **2.3.2. *Densidad real***

Relación entre la masa y el volumen real de un sólido, excluyendo poros o huecos.

### **2.3.3. *Viscosidad***

Resistencia de un líquido a fluir, indica su espesor o fluidez.

### **2.3.4. *Porosidad***

Proporción de volumen vacío (poros) en un material respecto al volumen total.

### **2.3.5. *Suelo contaminado***

Suelo cuyas características químicas, han sido alteradas negativamente por la presencia de sustancias contaminantes depositadas por la actividad humana.

### **2.3.6. *Temperatura del suelo***

Medida del calor en las capas del suelo, influenciada por factores como radiación solar, humedad y profundidad.

### **2.3.7. *Compactibilidad***

Capacidad de un material para reducir su volumen al ser comprimido.

## **2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### ***2.4.1. Hipótesis general***

La infiltración del diésel y del residual (R-500) varía significativamente según el tipo de suelo.

### ***2.4.2. Hipótesis específicas***

- La densidad de los diferentes tipos de suelo influye en la infiltración del diésel y residual (R-500).
- El porcentaje de humedad influye significativamente en la infiltración del diésel y residual (R-500) en función del tipo de suelo.

## **2.5. VARIABLES**

### ***2.5.1. Variables independientes***

- Tipo de suelo.
- Porcentaje de humedad (10% y 20%).
- Tipo de hidrocarburo (Diésel y Residual R-500).
- Densidad del suelo.

### ***2.5.2. Variables dependientes***

- Infiltración del diésel y residual.

### **3. CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS**

Esta investigación se realizó en la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, la etapa experimental se llevó a cabo en los laboratorios de: Control de la Contaminación (IQ-214-UNSAAC), Hidrocarburos (IQ-112-UNSAAC) y Materiales de Ingeniería (SL01LA136-UNSAAC) de la Escuela Profesional de Ingeniería Química.

#### **3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

##### ***3.1.1. Tipo de investigación***

La investigación es de tipo básica, debido a que está orientada a la generación de conocimiento teórico sobre la dinámica de infiltración de hidrocarburos en suelos. Se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, con diseño experimental y alcance explicativo. Asimismo, considerando el uso del triángulo textural del suelo, se adopta un diseño experimental de mezclas.

##### ***3.1.2. Diseño de investigación***

El diseño de investigación adoptó un enfoque cuantitativo, debido al uso del triángulo textural del suelo, se emplea un diseño experimental de mezclas, donde los componentes arena, arcilla y limo se combinan en proporciones que deben sumar el 100 %. Para ello se utiliza el diseño Simplex Lattice de orden  $m = 5$  con  $q = 3$  componentes, lo que genera 21 combinaciones experimentales, permitiendo modelar la influencia de las proporciones relativas de los materiales sobre la variable de respuesta.

##### ***3.1.3. Nivel de la investigación***

Según Hernández Sampieri (2015), los alcances se agrupan en cuatro tipos: exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo.

La presente investigación es de alcance explicativo, ya que busca determinar la influencia y relación causa–efecto entre las propiedades del suelo y la infiltración del diésel y del residual (R-500).

#### ***3.1.4. Enfoque de la investigación***

La investigación es de enfoque cuantitativo, debido a la recolección de datos numéricos de las pruebas experimentales realizadas para desarrollar el análisis.

### **3.2. MUESTRA**

En la presente investigación no se consideró la materia orgánica del suelo como variable experimental, debido a su elevada variabilidad espacial y temporal, asociada principalmente a factores biológicos y climáticos, lo que dificulta la estandarización de las pruebas. Asimismo, durante la preparación de las muestras (secado y tamizado) gran parte de la fracción orgánica activa se elimina, reduciendo su influencia en condiciones de laboratorio. Diversos estudios señalan que la infiltración inicial de hidrocarburos está determinada fundamentalmente por propiedades físicas del suelo como la textura, porosidad y densidad, mientras que la materia orgánica cumple un rol secundario en procesos posteriores de adsorción y biodegradación (Hillel, 1998). En consecuencia, este estudio se centró en variables físicas cuantificables y controlables, lo que garantiza mayor precisión y consistencia en la interpretación de los resultados.

La muestra experimental estuvo constituida por tres tipos de suelos: arena, limo y arcilla. La selección de las muestras se realizó mediante un muestreo no probabilístico, de tipo intencional o por criterio, debido a que los suelos fueron escogidos deliberadamente en función de su textura, con el propósito de evaluar el comportamiento de infiltración de diésel y residual (R-500).

Las muestras de arena y limo fueron recolectadas en la zona de Huambutio, centro poblado del distrito de Lucre, provincia de Quispicanchi, región Cusco; mientras que la muestra de arcilla fue obtenida en la localidad de Lamay, distrito de la provincia de Calca, región Cusco. Estas zonas fueron seleccionadas por presentar de manera predominante los tipos de suelo requeridos para el desarrollo del estudio experimental.

Posteriormente, las muestras fueron acondicionadas en laboratorio bajo criterios técnicos estandarizados para garantizar su representatividad y confiabilidad. La recolección y preparación se efectuó conforme a la norma ASTM D421 y la ISO 11464:2006 (Soil quality – Pretreatment of samples for physico-chemical analysis), que establecen procedimientos para la homogeneización, eliminación de impurezas y secado controlado. La clasificación textural se realizó siguiendo la norma ASTM D422 (*Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, 2007), complementada por la NTP 339.127:2015 (INACAL) para análisis granulométrico.

La determinación del contenido de humedad de los suelos se llevó a cabo según lo dispuesto en la norma ASTM D2216 (*Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, 2019), mientras que la densidad aparente y el grado de compactación se evaluaron conforme a ASTM D698 (*Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 Ft-Lbf/Ft<sup>3</sup> (600 KN-m/M<sup>3</sup>))*, 2021) y la NTP 339.146, garantizando precisión en los parámetros de humedad y densidad empleados en los ensayos de infiltración.

Finalmente, la tasa de infiltración de hidrocarburos en los distintos tipos de suelo fue medido tomando como referencia la norma ASTM D3385 (2000), adaptada a las condiciones experimentales de laboratorio. De este modo, se aseguró la reproducibilidad de los resultados y su comparabilidad con metodologías internacionalmente reconocidas.

### **3.3. MATERIALES**

Los materiales que se utilizaron en la presenta investigación son:

- Probetas de 10 mL, 25 mL, 50 mL y 100 mL
- Vernier
- Embudo
- Vasos precipitados
- Soporte universal
- Mortero
- Varilla metálica
- Envases de polipropileno de 3 L
- Tamiz N° 8, 16 y 200

### **3.4. EQUIPOS**

Los equipos que se utilizaron en la presenta investigación son:

- Estufa IMACO, modelo HEB60R
- Agitador de tamices RO-TAP

### **3.5. INSTRUMENTOS**

- Balanza digital
- Cronómetro
- Viscosímetro Antor Paar



### 3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL

Cuando la respuesta de un sistema depende de la proporción relativa de sus componentes y no de su cantidad absoluta, el enfoque experimental adecuado corresponde a un diseño de mezclas. En este tipo de diseños, los factores experimentales representan fracciones de una mezcla cuya suma permanece constante e igual a la unidad, condición conocida como restricción de cierre (Cornell, 2011).

En la presente investigación, el comportamiento de infiltración del diésel y del residual (R-500) está directamente condicionado por la composición textural del suelo, definida por las fracciones de arena, limo y arcilla. Estas fracciones constituyen el 100 % del suelo, por lo que se cumple la restricción fundamental del diseño de mezclas:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1 \quad (8)$$

Donde:  $x_1$  es la fracción de arena,  $x_2$  es la fracción de limo y  $x_3$  es la fracción de arcilla

Entre los distintos diseños de mezclas existentes, se seleccionó el diseño Simplex Lattice, el cual permite distribuir los puntos experimentales de forma regular dentro de un simplex geométrico. Para sistemas ternarios, el simplex corresponde a un triángulo equilátero, ampliamente utilizado para la representación de mezclas de tres componentes y, en particular, para la caracterización textural de suelos (Cornell, 2011).

Este diseño fue seleccionado debido a que:

- Proporciona una cobertura uniforme del espacio experimental.
- Permite evaluar efectos individuales y combinados de los componentes.
- Optimiza el número de ensayos requeridos.
- Facilita la representación gráfica mediante diagramas ternarios.

El diseño experimental se estructuró considerando tres componentes principales ( $q = 3$ ), correspondientes a las fracciones texturales del suelo:

**Tabla 7**

*Componentes del diseño experimental de mezclas (Simplex Lattice)*

Componente	Símbolo	Descripción
Arcilla	$X_1$	Fracción fina del suelo
Arena	$X_2$	Fracción gruesa del suelo
Limo	$X_3$	Fracción de tamaño intermedio

*Nota.* Cada componente fue expresado como una fracción adimensional, de manera que la suma de las proporciones de los tres componentes fuera igual a la unidad, conforme a los principios del diseño de mezclas (Cornell, 2011).

Se adoptó un diseño de grado  $m = 5$ , lo que implica que cada componente fue dividido en incrementos uniformes definidos por:

$$\Delta x = \frac{1}{m} \quad (9)$$

Sustituyendo el valor de  $m$ :

$$\Delta x = \frac{1}{5} = 0.2$$

En consecuencia, los valores posibles para cada componente fueron:

$$0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$$

La elección de este grado permitió lograr una adecuada resolución del espacio experimental sin incrementar de forma excesiva el número de combinaciones. El número total de combinaciones experimentales en un diseño Simplex Lattice se determina mediante la siguiente expresión combinatoria:

$$N = \left( \frac{(q + m - 1)!}{m! (q - 1)!} \right) \quad (10)$$

Donde:  $q$  es el número de componentes del diseño,  $m$  es el grado del diseño

Esta expresión se deriva de la teoría combinatoria aplicada a la partición de una unidad en fracciones discretas (Cornell, 2011).

Sustituyendo los valores correspondientes a la presente investigación:

$$N = \left( \frac{(3 + 5 - 1)!}{5! (3 - 1)!} \right) = \left( \frac{42}{2} \right) = 21$$

Por lo tanto, el diseño experimental estuvo conformado por 21 combinaciones de mezcla, representativas de distintos tipos de suelo sintético. Las 21 combinaciones generadas mediante el diseño Simplex Lattice se distribuyeron geométricamente dentro del triángulo ternario de la siguiente manera (Cornell, 2011):

- Vértices del simplex

Corresponden a las mezclas puras, donde un solo componente representa el 100% de la mezcla:

$$(1,0,0), (0,1,0), (0,0,1)$$

- Bordes del simplex

Representan mezclas binarias, donde dos componentes varían en incrementos de 0.2 mientras el tercero se mantiene en cero, permitiendo evaluar la interacción entre pares de componentes.

- Interior del simplex

Incluyen mezclas ternarias donde los tres componentes están presentes simultáneamente, lo que permite evaluar el efecto combinado de arena, limo y arcilla sobre la variable respuesta.

Cada combinación experimental fue preparada mediante la mezcla controlada de arena, limo y arcilla previamente acondicionados. Las proporciones de cada componente se

establecieron de acuerdo con el diseño Simplex Lattice, obteniéndose suelos sintéticos representativos de diferentes clases texturales (véase Tabla 8).

**Tabla 8**

*Cuadro de mezclas Simplex Lattice ( $q=3$ ,  $m=5$ )*

Mezcla	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	k	k
	Arcilla	Arena	Limo	Diesel	Residual
				(cm/min)	(R-500) (cm/h)
1	1.00	0.00	0.00	-	-
2	0.80	0.20	0.00	-	-
3	0.60	0.40	0.00	-	-
4	0.80	0.00	0.20	-	-
5	0.60	0.20	0.20	-	-
6	0.40	0.60	0.00	-	-
7	0.60	0.00	0.40	-	-
8	0.40	0.20	0.40	-	-
9	0.20	0.60	0.20	-	-
10	0.40	0.40	0.20	-	-
11	0.40	0.00	0.60	-	-
12	0.00	1.00	0.00	-	-
13	0.00	0.80	0.20	-	-
14	0.20	0.80	0.00	-	-
15	0.00	0.60	0.40	-	-
16	0.20	0.40	0.40	-	-
17	0.00	0.40	0.60	-	-
18	0.20	0.00	0.80	-	-
19	0.20	0.20	0.60	-	-
20	0.00	0.20	0.80	-	-
21	0.00	0.00	1.00	-	-

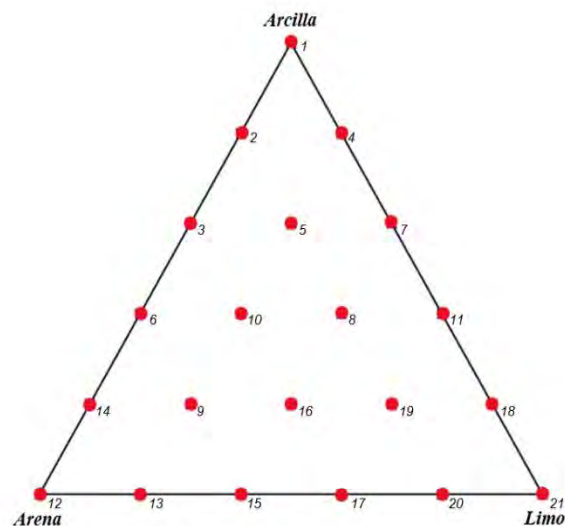
La variable respuesta del diseño experimental correspondió al comportamiento de infiltración del hidrocarburo en el suelo, determinado experimentalmente para cada una de las combinaciones texturales generadas.

La infiltración fue medida en función del tiempo, obteniéndose datos experimentales que permitieron caracterizar el comportamiento del hidrocarburo en cada tipo de suelo. Estos datos fueron utilizados posteriormente en la etapa de análisis para la modelación y comparación del proceso de infiltración.

Las muestras obtenidas fueron verificadas mediante el uso del triángulo textural del suelo, con el fin de corroborar la correspondencia entre las proporciones establecidas y la clasificación textural resultante como se aprecia en la Figura 6.

**Figura 6**

*Diseño experimental de mezclas, Simple Lattice ( $m = 5; q = 3$ )*

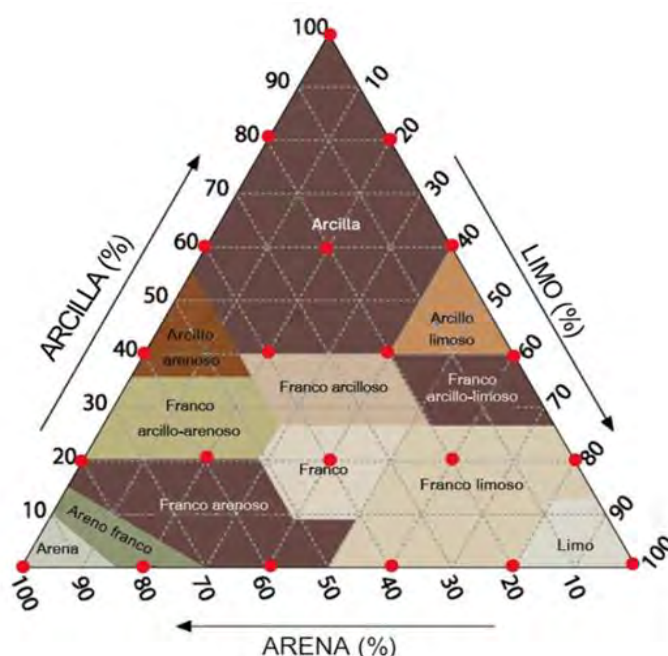


En la Figura 6, los puntos están distribuidos uniformemente dentro del triángulo de mezclas, lo que permite explorar cómo varía la infiltración en función de las diferentes proporciones de los tres componentes del suelo.

Estas combinaciones pueden graficarse dentro del diagrama textural del suelo, permitiendo evaluar la infiltración en 12 tipos de suelo.

## Figura 7

*Diseño Simple Lattice aplicado en el triángulo textural de suelo*



*Nota.* Adaptado de (Soil Science Society of America, 2014).

La Figura 7 representa los 21 puntos experimentales que se utilizaron en el estudio. Según Abu-Ashour & Shahalam (2002), la tasa de infiltración disminuye de manera importante a partir de una concentración de 5% de Diésel en el suelo, y concentraciones superiores no inducen reducciones adicionales. Por ello, en esta investigación se optó por emplear la concentración de Hidrocarburo al 5%.

En el caso de la humedad del suelo, se seleccionaron dos niveles, 10 % y 20 %, los cuales fueron definidos en función de las condiciones climáticas predominantes en diferentes regiones del país. El nivel de 10 % de humedad es representativo de suelos ubicados en la región sur del Perú, caracterizada por climas más secos y menor contenido de humedad edáfica; mientras que el nivel de 20 % de humedad corresponde a condiciones típicas de suelos de la

región selva, donde predominan climas húmedos y elevados contenidos de humedad en el suelo.

Se trabajó con dos niveles de densidad aparente, definidos como densidad baja y densidad alta, con el fin de representar condiciones contrastantes de compactación del suelo. La densidad baja, comprendida entre 1.2 y 1.3 g/cm<sup>3</sup>, es representativa de suelos poco compactados y con mayor porosidad; mientras que la densidad alta, entre 1.7 y 1.8 g/cm<sup>3</sup>, corresponde a suelos más compactados, caracterizados por un menor volumen de poros.

A partir de la combinación de las variables consideradas, 21 tipos de suelo, dos niveles de humedad, dos tipos de hidrocarburo (Diésel y residual R-500) y dos niveles de densidad aparente, se ejecutaron un total de 168 pruebas experimentales, calculadas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Número total de experiencia} = \\ (\text{Tipos de Suelo}) \times (\text{Humedad}) \times (\text{Hidrocarburo}) \times (\text{Densidad}) \end{aligned} \quad (11)$$

Sustituyendo los valores correspondientes a la presente investigación:

$$\text{Número total de experiencia} = 21 \times 2 \times 2 \times 2 = 168 \text{ pruebas experimentales}$$

Con la finalidad de incrementar la confiabilidad de los resultados y permitir un análisis estadístico adecuado, cada tratamiento experimental fue realizado con tres réplicas. En consecuencia, el número total de pruebas experimentales ejecutadas fue: Número total de experimentos = 168 experimentales x 3 réplicas = 504 pruebas experimentales.

### 3.7. PROCEDIMIENTO

Con el fin de desarrollar los objetivos propuestos, la metodología para esta investigación experimental se desarrolla en 7 etapas.

#### 3.7.1. *Extracción y caracterización del suelo*

Los diversos tipos de suelo fueron extraídos y trasladados al laboratorio para su caracterización. Previamente, las muestras de suelo fueron sometidas al equipo RO-TAP, modelo RX-29-16 (véase Figura 8), utilizando los tamices N.º 8, 16 y 200 (véase Figura 9). Luego, las muestras previamente tamizadas se colocaron en frascos de vidrio y se mezclaron con agua. Posteriormente, se agitaron durante un tiempo significativo (3 minutos) y se dejaron en reposo durante 24 horas. Durante este periodo, se evidenció la separación de las partículas de suelo según su tamaño: la arena, al ser la más pesada, se depositó en la base; sobre ella se ubicó el limo, y en la parte superior, la arcilla, al ser la más liviana (véase Figura 10). Finalmente, se procedió a medir y calcular el porcentaje de cada fracción (arena, limo y arcilla), lo que permitió determinar el tipo de suelo mediante el uso del triángulo textural, facilitando su clasificación precisa.

**Figura 8**

*RO-TAP con tamiz N°200*





*Nota.* Este equipo se utilizó para la separación mecánica y estandarizada de las partículas del suelo, empleando tamices N° 8, N° 16 y N° 200. Su propósito fue aislar la fracción de tierra fina de cada muestra, eliminando los materiales gruesos (véase Anexo 3).

**Figura 9**

*Tamiz N°200*



**Figura 10**

*Análisis Granulométrico del Suelo por Sedimentación*



### 3.7.2. Diésel y residual (R-500)

El diésel se obtuvo de una estación de servicios (EE. SS), mientras que el residual (R-500) se obtuvo de consumidores directos que hacen uso de este hidrocarburo (véase Figura 11).

**Figura 11**

*Muestras de Diesel y Residual (R-500)*



Para su caracterización del diésel y residual (R-500), las muestras se vertieron en vasos precipitados (véase Figura 12), para luego medir su viscosidad con el equipo de laboratorio.

**Figura 12**

*Muestras de Diesel y Residual (R-500) para análisis de laboratorio*



*Nota.* Muestras líquidas de hidrocarburos preparadas para el análisis de propiedades físico-químicas. La muestra de color verde corresponde a Diésel y la de color negro al

Residual (R-500). Las muestras se colocaron en vasos de precipitados limpios para los ensayos de laboratorio.

### **3.7.3. Muestreo por lotes**

Luego de haber recolectado los distintos tipos de suelo (arcilla, arena y limo), estos fueron secados en la estufa de la marca IMACO, modelo HEB60R (véase Figura 13), ubicada en el laboratorio de Materiales de Ingeniería. Las muestras se sometieron por un proceso de secado a 150 °C durante aproximadamente entre 30 a 45 minutos. Posteriormente, se realizó la mezcla de los suelos (arena, limo y arcilla) según las proporciones establecidas en el diseño experimental (véase Figura 14). Finalmente, los suelos fueron almacenados en contenedores para su posterior uso. Estos suelos (arena, limo y arcilla) constituyeron la base para la preparación de los veintiún (21) tipos de suelos planteados en la metodología (véase Figura 15).

**Figura 13**

*Estufa de marca IMACO, modelo HEB60R*



*Nota.* Las muestras de suelo se colocaron en una bandeja metálica para su posterior secado.

## Figura 14

*Muestra de suelo sintético obtenido*



*Nota.* La preparación del suelo se realizó mediante mezclas de arcilla, arena y limo en proporciones establecidas en el triángulo textural, obteniendo veintiún (21) tipos de suelo que luego fueron vertidas en recipientes de polipropileno (PP) para su análisis de infiltración.

## Figura 15

*Veintiún (21) muestras de suelo sintético obtenido*



*Nota.* Muestras de suelo preparadas para el desarrollo de las pruebas experimentales. Cada muestra fue colocada en un recipiente plástico de polipropileno (PP) transparente con tapa hermética, debidamente rotulado con el tipo de material y su respectiva formulación o tratamiento.

#### 3.7.4. *Determinación de densidad*

Para determinar la densidad aparente del suelo, se extrajo la cantidad necesaria de muestra desde los contenedores de polipropileno (PP) donde se encontraba almacenado. El suelo se humedeció con la cantidad de agua correspondiente para alcanzar la humedad requerida (10% o 20%). Posteriormente, se colocó en un envase cilíndrico de polipropileno (PP) con peso y volumen previamente determinados (véase Figura 16).

**Figura 16**

*Envase de Polipropileno (PP) de 3 L*



Luego, se pesó el envase con el suelo húmedo, obteniéndose la masa del suelo húmedo al restar el peso del envase vacío. Con esta masa se aplicó la Ecuación 12, donde  $\rho$  representa la densidad aparente del suelo húmedo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $m$  la masa del suelo húmedo (g) y  $V$  el volumen del envase ( $\text{cm}^3$ ), determinándose así la densidad aparente del suelo húmedo, tal como lo establece la norma (ASTM D7263-21, 2021).

$$\rho = \frac{m_{\text{suelo}}}{V_{\text{envase}}} \quad (12)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$m_{\text{suelo}}$ : Masa del suelo (g)

$V_{\text{envase}}$ : Volumen del envase ( $\text{cm}^3$ )

### 3.7.5. *Determinación de porcentaje de humedad*

Para obtener una muestra con un contenido de humedad específico (10% o 20%), se pesó inicialmente una cantidad conocida de suelo completamente seco. Posteriormente, se calculó la masa de agua correspondiente al porcentaje de humedad deseado mediante la Ecuación 13, la cual se deriva de la Ecuación 1 descrita en las bases teóricas.

$$m_{agua} = \frac{(w * m_{suelo\ seco})}{100} \quad (13)$$

donde la  $m_{agua}$  y  $m_{suelo\ seco}$  están expresados en gramos (g)

Finalmente, se añadió la cantidad exacta de agua al suelo seco, mezclando cuidadosamente hasta lograr una distribución homogénea de la humedad (véase Figura 17).

**Figura 17**

*Mezcla de suelo sintético con agua*



*Nota.* La cantidad de agua se preparó según el valor establecido para alcanzar el contenido de humedad deseado. La mezcla del suelo se homogenizó manualmente en un recipiente hasta obtener una consistencia uniforme.

### 3.7.6. *Acondicionamiento de la muestra*

Para la realización de las pruebas experimentales, se extrajo del contenedor la cantidad necesaria de suelo, la cual fue colocada en envases cilíndricos de Polipropileno (PP) de 3 Litros,

adaptando el procedimiento descrito en la norma ASTM D3385 *Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field* (véase Figura 18). Este procedimiento se replicó en las 168 experiencias, incluyendo sus respectivas réplicas (véase la Figura 19).

### **Figura 18**

*Preparación de muestra de suelo*



*Nota.* Proceso de acondicionamiento del suelo en el envase de polipropileno (PP), donde se realiza la compactación y nivelación del material previamente humedecido.

### **Figura 19**

*Preparación de muestra de diversos suelos*



*Nota.* Proceso de acondicionamiento del suelo en el envase de polipropileno (PP), aplicado a los distintos tipos de suelo.

### 3.7.7. *Determinación del tiempo de infiltración*

Una vez acondicionados los suelos y determinados los parámetros necesarios, se procedió a verter el hidrocarburo correspondiente, ya sea diésel o residual (R-500), en cada envase. En cada caso, se añadió una proporción del 5 % en peso respecto al suelo. La masa de hidrocarburo (g) se calculó mediante la Ecuación 14.

$$m_{\text{hidrocarburo}} = 5\% * m_{\text{suelo húmedo}} \quad (14)$$

El hidrocarburo fue vertido de manera uniforme sobre la superficie del suelo, asegurando una distribución adecuada (véase Figura 20). Inmediatamente después de la adición del hidrocarburo, se activó el cronómetro para registrar el tiempo de infiltración (véase Figura 21), el cual fue medido hasta que el frente de infiltración dejó de avanzar de manera apreciable. Posteriormente, se registraron el tiempo y la distancia de infiltración alcanzada, lo que permitió estimar la velocidad de infiltración para cada tipo de suelo, bajo las condiciones experimentales de humedad y densidad establecidas.

Para el desarrollo de los ensayos se establecieron profundidades máximas de infiltración diferenciadas para cada hidrocarburo, considerando sus propiedades físicas y su comportamiento en el suelo. En el caso del diésel, se adoptó una profundidad máxima de 50 cm, debido a su menor viscosidad y mayor movilidad, lo que le permite alcanzar mayores profundidades de infiltración en tiempos relativamente cortos. En contraste, para el hidrocarburo residual (R-500) se consideró una profundidad máxima de 30 cm, ya que su mayor viscosidad limita su desplazamiento vertical, observándose que en profundidades superiores no generaban avances significativos del frente de infiltración bajo las condiciones experimentales evaluadas.

La selección de estas profundidades máximas permitió caracterizar adecuadamente el comportamiento de infiltración de cada hidrocarburo, optimizando el diseño experimental y





obtenidos (masa de suelo húmedo, masa de hidrocarburo y tiempo de infiltración) fueron registrados en tablas experimentales para su posterior análisis estadístico.

### **3.7.8. Delimitación de variables**

El procedimiento se repitió para cada tipo de hidrocarburo (diésel y residual R-500), manteniendo constantes las condiciones de humedad y el volumen del recipiente. Los datos obtenidos (masa de suelo húmedo, masa de hidrocarburo y tiempo de infiltración) fueron registrados en tablas experimentales para su posterior análisis estadístico.

### **3.7.9. Medición de resultados**

Los datos experimentales obtenidos durante los ensayos de infiltración fueron registrados y procesados utilizando los softwares Microsoft Excel y Statgraphics 19, los cuales permitieron el ordenamiento, análisis y ajuste del modelo matemático a partir de la información recopilada. La obtención de los datos se realizó en el Laboratorio de Control de la Contaminación de la Escuela Profesional de Ingeniería Química (IQ-214), donde se llevaron a cabo todos los ensayos experimentales bajo condiciones controladas.

Para la contrastación de las hipótesis se empleó un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ), criterio estadístico comúnmente utilizado en investigaciones científicas, que permite un equilibrio entre el riesgo de cometer error tipo I y la sensibilidad para detectar efectos significativos. Si el valor  $p \leq 0.05$  se rechazará la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se aceptará la hipótesis alternativa ( $H_1$ ); en caso contrario, no se rechazará  $H_0$ .

### ***Hipótesis General (HG):***

La infiltración del Diésel y del Residual (R-500) varía de manera diferenciada en función de las propiedades físicas del suelo; donde la movilidad del Diésel es altamente sensible a la densidad y textura, mientras que la del Residual está limitada primordialmente por su propia viscosidad.

### ***Hipótesis específicas (Nulas y Alternativas):***

#### **Sobre el tipo de suelo**

Hipótesis Nula (H0): La infiltración de hidrocarburos es igual en los distintos tipos de suelo.

Hipótesis Alternativa (H1): La infiltración de hidrocarburos es diferente en los distintos tipos de suelo.

#### **Sobre la Densidad**

Hipótesis Nula (H0): La velocidad de infiltración es igual en las distintas densidades del suelo.

Hipótesis Alternativa (H1): La velocidad de infiltración es diferente en las distintas densidades del suelo.

## 4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS

El comportamiento de los contaminantes orgánicos en el subsuelo no depende únicamente de las características del medio poroso, sino fundamentalmente de las propiedades fisicoquímicas del fluido vertido. Según Mercer & Cohen (1990), la viscosidad es la fricción interna dentro de un fluido que le impide fluir. Tras un derrame, un producto de baja viscosidad penetrará más rápidamente en el suelo que uno de mayor viscosidad.

#### 4.1.1. Viscosidad

##### 4.1.1.1. Diésel

Para determinar la viscosidad del diésel se utilizó el viscosímetro ANTON PAAR, modelo SVM 3000, ubicado en el laboratorio de hidrocarburos. El resultado obtenido fue un valor dentro del rango adecuado, conforme al Anexo 4.

### Figura 22

*Determinación de la viscosidad del diésel*



*Nota.* Se muestra la viscosidad cinemática del diésel B5 S50. El análisis se realizó a una temperatura controlada de 40 °C, obteniéndose un valor de 2.9078 cSt.

#### **4.1.1.2.        *Residual (R-500)***

Para la caracterización del residual (R-500) se utilizó la ficha técnica de seguridad del hidrocarburo (Anexo 2), debido a que su viscosidad es superior al rango admitido por el viscosímetro ANTON PAAR, modelo SVM 3000, de acuerdo al instructivo del equipo (Anexo 4).

### **4.2. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD EN LOS DIFERENTES TIPOS DE SUELO**

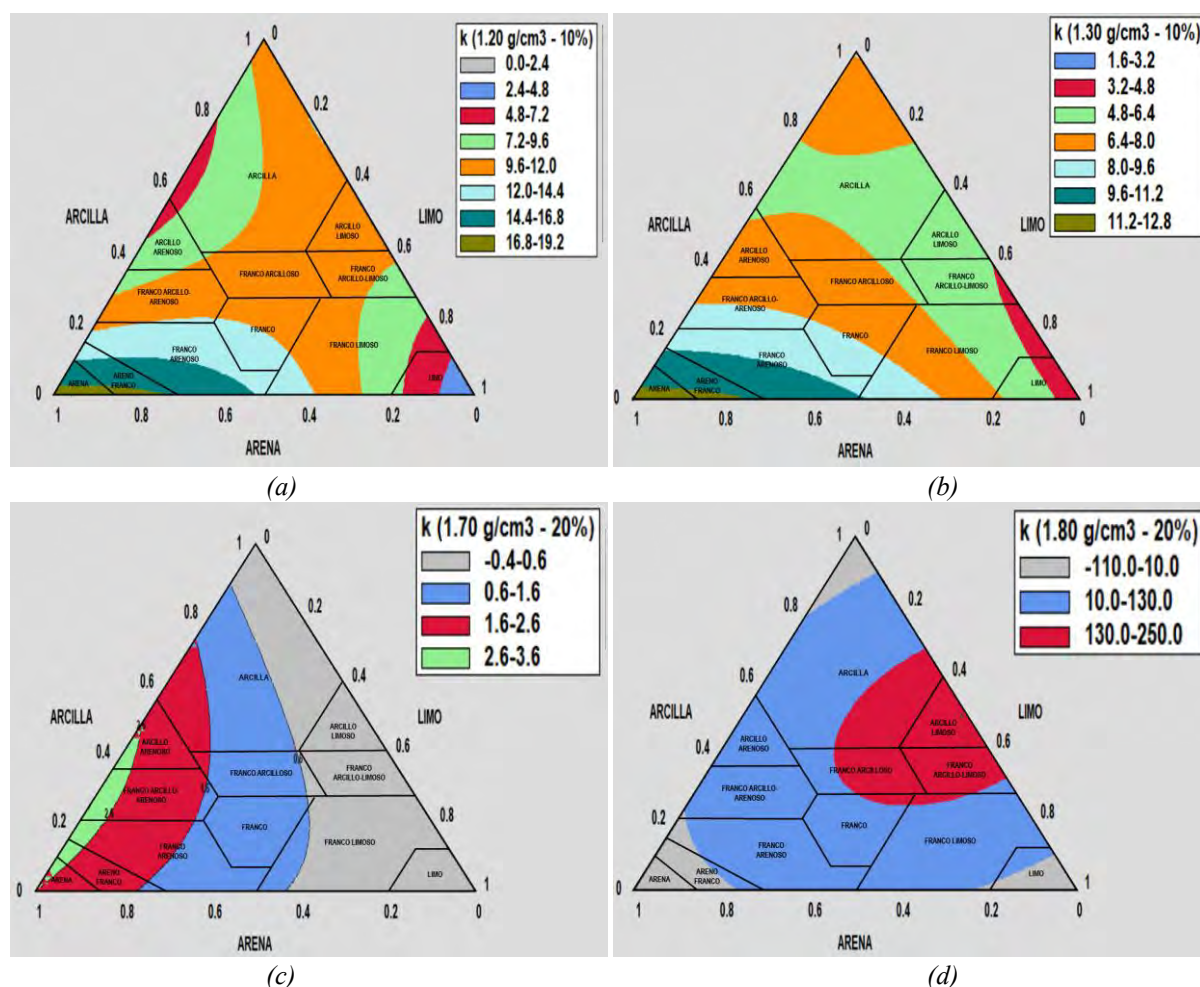
En este apartado se analizan los resultados de la velocidad de infiltración de hidrocarburos en suelos de distinta clase textural, considerando variaciones en la densidad aparente y el contenido de humedad. Para ello, se empleó el software Statgraphics 19 (versión de prueba gratuita), mediante el cual se generaron mapas de contorno que posteriormente fueron representados en diagramas ternarios. Los triángulos ternarios obtenidos fueron superpuestos con el triángulo textural del suelo, lo que permitió una visualización integrada y una mejor interpretación de la influencia del tipo de suelo en el comportamiento de la infiltración de los hidrocarburos.

#### **4.2.1. *Diésel***

La Figura 23 presenta cuatro diagramas ternarios (heat maps) que representan la variación de la velocidad de infiltración del diésel (cm/min) en función de la textura del suelo (arena, limo y arcilla), bajo diferentes condiciones de densidad aparente y humedad. Los diagramas superiores (a) y (b) corresponden a suelos con densidades de 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> a una humedad del 10 %, mientras que los inferiores (c) y (d), representan densidades mayores (1.70 y 1.80 g/cm<sup>3</sup>) con una humedad del 20 %. La escala de colores indica los rangos de velocidad de infiltración, permitiendo visualizar las tendencias según el tipo de suelo y las condiciones físicas evaluadas.

**Figura 23**

*Mapas ternarios de la velocidad de infiltración del diésel (cm/min) en función de la textura del suelo, para diferentes densidades aparentes y contenidos de humedad.*



En los gráficos (a) y (b) de la Figura 23, suelos de menor densidad (1.20 y 1.30 g/cm³) siendo y baja humedad (10 %), se observan mayores velocidades de infiltración del diésel, principalmente en texturas dominadas por arena y suelos franco-arenosos. Esto se asocia a una mayor macroporosidad y conectividad de poros, que facilitan el flujo del hidrocarburo. A medida que aumenta la fracción de limo y, especialmente, de arcilla (suelos franco-arcillosos y arcillosos), la velocidad de infiltración disminuye, evidenciando el efecto restrictivo de los poros más finos. Comparativamente, al pasar de 1.20 a 1.30 g/cm³, se aprecia una ligera

reducción general de las velocidades, lo que indica que incluso incrementos moderados de densidad reducen la capacidad de infiltración.

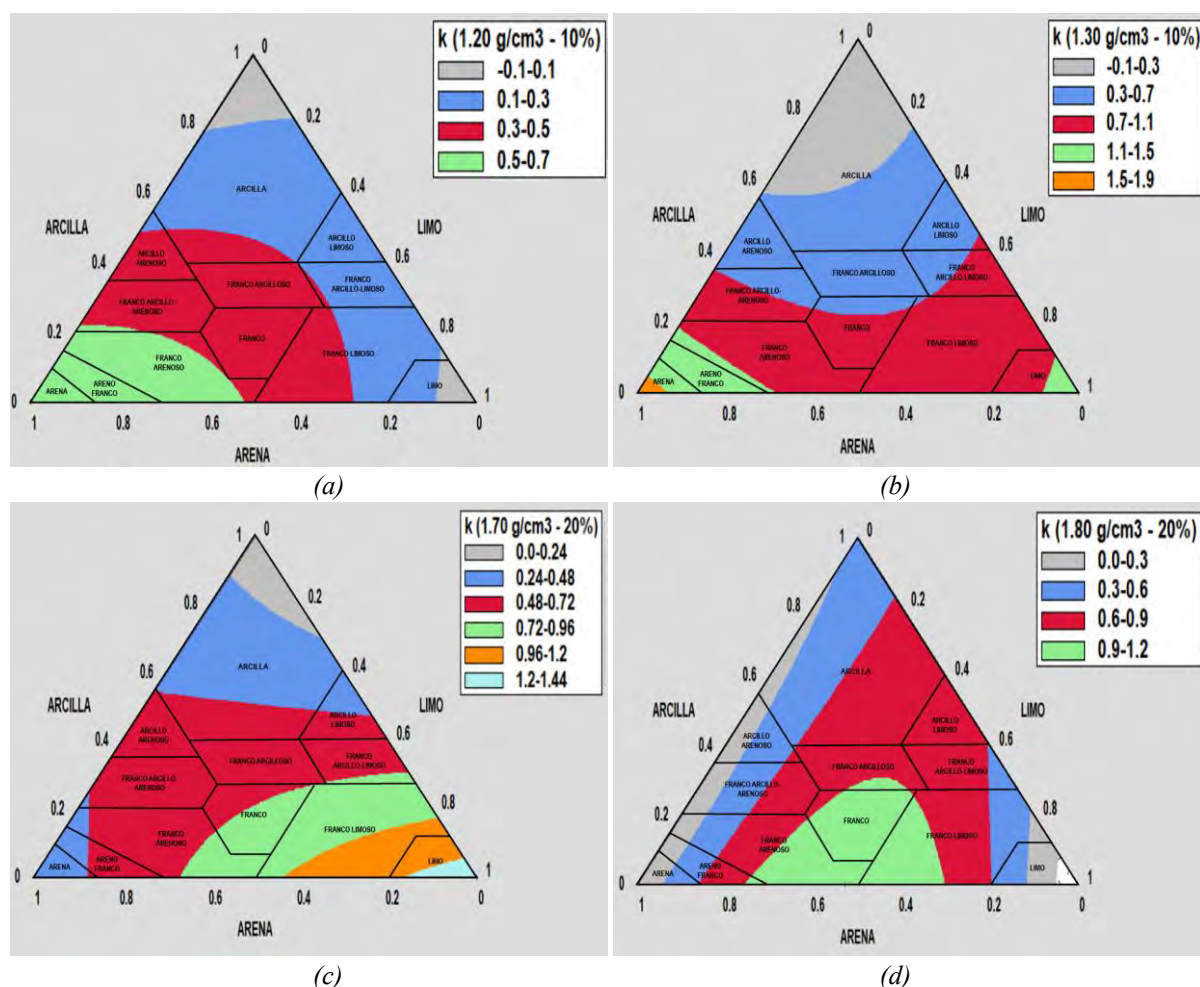
En los diagramas (c) y (d), correspondientes a mayores densidades (1.70 y 1.80 g/cm<sup>3</sup>) y mayor humedad (20 %), la velocidad de infiltración disminuye de forma marcada en casi todas las texturas. Los valores más bajos se concentran en suelos arcillosos y franco-arcillosos, donde la combinación de alta compactación y mayor contenido de agua reduce significativamente la infiltración efectiva. Incluso en suelos arenosos, la infiltración es menor que en los casos de baja densidad y humedad, evidenciando que el aumento simultáneo de densidad y humedad limita el movimiento del diésel. En conjunto, la Figura 23 demuestra claramente que la velocidad de infiltración del diésel depende tanto del tipo de suelo como de las condiciones físicas, disminuyendo con el incremento de la densidad aparente y del contenido de humedad.

#### **4.2.2. Residual (R-500)**

La Figura 24 presenta cuatro diagramas ternarios (heat maps) que muestran la distribución de la velocidad de infiltración del hidrocarburo residual (R-500), expresada en (cm/h), en función de la textura del suelo (arena, limo y arcilla) bajo diferentes condiciones de densidad aparente y contenido de humedad. Los diagramas superiores (a) y (b) corresponden a densidades de 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> con una humedad del 10 %, mientras que los inferiores (c) y (d) representan densidades mayores de 1.70 y 1.80 g/cm<sup>3</sup> a una humedad del 20 %. La escala de colores evidencia rangos muy bajos de velocidad de infiltración, indicando un comportamiento significativamente más lento del residual (R-500) en comparación al diésel.

**Figura 24**

*Mapas ternarios de la velocidad de infiltración del residual R-500 (cm/h) en función de la textura del suelo, para diferentes densidades aparentes y contenidos de humedad.*



En los gráficos (a) y (b) de la Figura 24, en los suelos de menor densidad (1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup>) y baja humedad (10 %), la infiltración del residual (R-500) sigue siendo limitada, incluso en suelos con mayor proporción de arena y texturas franco-arenosas, donde se registran los valores relativamente más altos. Sin embargo, estos valores permanecen bajos en términos absolutos, lo que refleja la alta viscosidad y menor movilidad del residual (R-500). A medida que aumenta el contenido de limo y arcilla, especialmente en suelos franco-arcillosos y arcillosos, la velocidad de infiltración disminuye aún más, concentrándose los valores más bajos en estas zonas del diagrama ternario.



En los escenarios (c) y (d), de mayor densidad aparente (1.70 y 1.80 g/cm<sup>3</sup>) y mayor humedad del suelo (20 %), la infiltración del residual (R-500) es marcadamente lenta en prácticamente todas las texturas. La combinación de compactación del suelo y mayor saturación de poros reduce drásticamente la permeabilidad efectiva, restringiendo el avance del hidrocarburo incluso en suelos arenosos. En los suelos finos, el movimiento del residual (R-500) resulta altamente limitado, evidenciando que el incremento de la densidad y la humedad intensifica el efecto retardante sobre la infiltración. En conjunto, estos resultados confirman que la velocidad de infiltración del hidrocarburo residual (R-500) es muy baja y está fuertemente controlada por la textura del suelo, la densidad aparente y el contenido de humedad.

### **4.3. INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO EN LA INFILTRACIÓN**

En este apartado se presenta el análisis del comportamiento de la infiltración del diésel y residual (R-500) en las mezclas de suelo evaluadas. Dado el extenso volumen de datos generados por el diseño experimental 168 prueba (Apéndice 2, 3, 4 y 5), y con el objetivo de caracterizar claramente la influencia del tipo de suelo y la humedad, se seleccionaron puntos representativos para facilitar la interpretación de los resultados.

#### **4.3.1. Diésel**

Para evaluar cómo las características físicas del suelo influyen en la distribución vertical del diésel, se analizó la infiltración acumulada (cm) del diésel en los diferentes tipos de suelos sintéticos que representan distintas texturas. Los resultados, mostrados en las siguientes figuras, evidencian que la textura del suelo (desde arcillosa hasta limosa y arenosa) controla de manera decisiva la movilidad del hidrocarburo, reflejándose en variaciones significativas en la profundidad infiltrada.

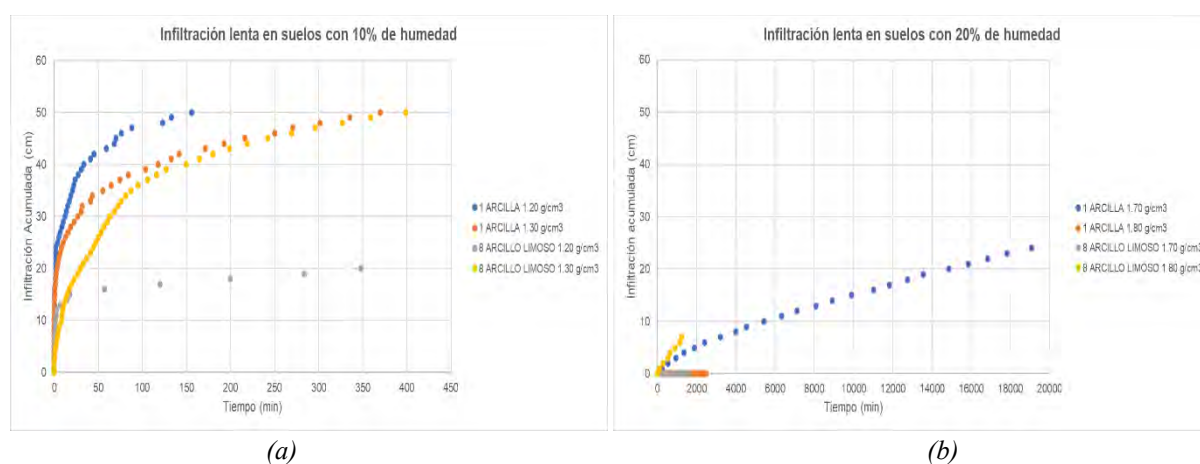
Los resultados experimentales evidenciaron tres comportamientos hidráulicos diferenciados, los cuales se han categorizado de la siguiente manera para su análisis detallado:

#### 4.3.1.1. *Infiltración lenta*

En este tipo de infiltración se identificaron casos críticos, asociados principalmente a suelos con alto contenido de arcilla. Este comportamiento se observó en los puntos 1 y 8, correspondientes a los suelos clasificados como arcilla y arcillo limoso, respectivamente. En estos suelos, la elevada microporosidad y las fuertes fuerzas de retención limitaron severamente el avance del diésel, registrándose distancias de infiltración mínimas o incluso nulas durante el tiempo de observación.

**Figura 25**

*Infiltración del diésel en suelos con 10% y 20% de humedad (fase lenta)*



La Figura 25 (a) muestra que, al 10% de humedad, la infiltración del diésel en suelos arcillosos y arcillo limosos sigue el comportamiento típico de medios no saturados, con una fase inicial rápida seguida de una disminución progresiva del flujo. En la arcilla (1), la densidad de  $1.20 \text{ g/cm}^3$  permite alcanzar 50 cm en 156 minutos, mientras que a  $1.30 \text{ g/cm}^3$  el mismo recorrido requiere 370 minutos, lo que confirma que el incremento de densidad reduce la conductividad hidráulica. En el suelo arcillo limoso (8), la densidad de  $1.20 \text{ g/cm}^3$  limita la

infiltración a 20 cm; sin embargo, a  $1.30 \text{ g/cm}^3$  la profundidad se incrementa hasta 50 cm, indicando una reorganización interna que mejora la conectividad porosa.

Por otro lado, la Figura 25 (b), correspondiente al 20% de humedad, evidencia una disminución sustancial en la infiltración debido al mayor grado de saturación inicial del suelo. En la arcilla (1), la densidad de  $1.70 \text{ g/cm}^3$  permite únicamente 24 cm de infiltración en un periodo prolongado, mientras que a  $1.80 \text{ g/cm}^3$  la infiltración es nula. Este resultado sugiere que, bajo condiciones de alta humedad y densidad, la estructura arcillosa pierde completamente la continuidad porosa necesaria para el avance del diésel. En el caso del suelo arcillo limoso (8), el comportamiento es inverso al registrado con 10% de humedad. A una densidad de  $1.70 \text{ g/cm}^3$  no se observa infiltración, mientras que a  $1.80 \text{ g/cm}^3$  se alcanza una profundidad de 7 cm. Esto indica que, en suelos con mayor proporción de limo, pequeñas variaciones en la densidad pueden reconectar poros aislados y generar trayectorias mínimas de flujo, aun bajo condiciones de humedad elevada.

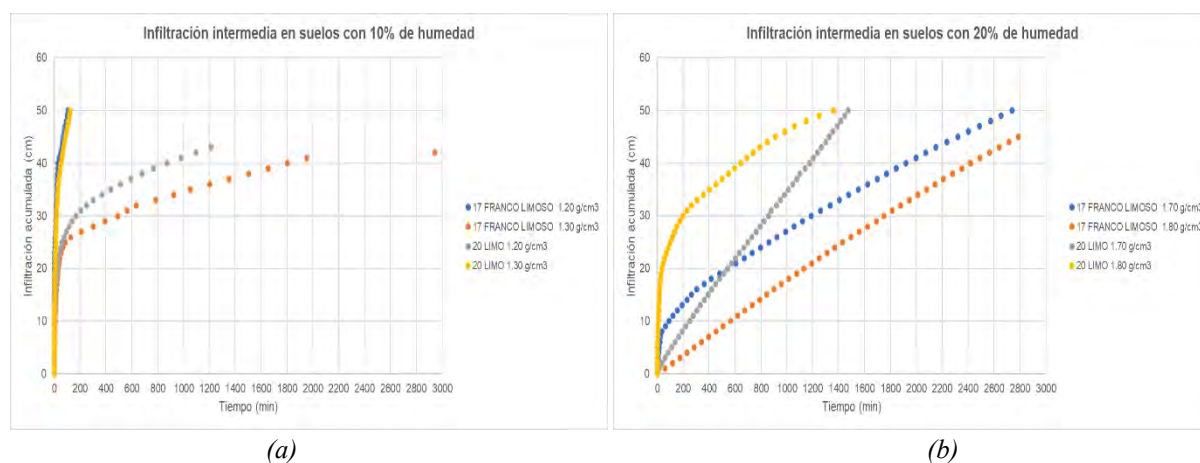
En conjunto, la Figura 25 demuestra que la infiltración lenta del diésel está fuertemente condicionada por la interacción entre tipo de suelo, densidad aparente y contenido de humedad inicial. A 10% de humedad la infiltración es mayor y más sensible a la compactación, mientras que a 20% de humedad el sistema poroso se encuentra más saturado, lo que limita el desplazamiento del diésel. Estos resultados evidencian que pequeñas variaciones estructurales pueden modificar significativamente la respuesta hidráulica de los suelos finos y arcillosos. Este comportamiento concuerda con lo señalado por Hillel (1998), quien indica que los suelos arcillosos presentan una elevada proporción de microporos, los cuales restringen el flujo de fluidos no acuosos debido a fuerzas capilares elevadas y una alta resistencia al movimiento.

#### 4.3.1.2. *Infiltración intermedia*

En esta categoría de infiltración intermedia se identificaron casos asociados a suelos con mayor contenido de limo, específicamente los puntos 17 y 20, correspondientes a texturas franco limosa y limo.

**Figura 26**

*Infiltración del diésel en suelos con 10% y 20% de humedad (fase intermedia)*



La Figura 26 (a) muestra la infiltración del diésel al 10% de humedad en suelos franco limosos y limosos bajo densidades de 1.20 y 1.30 g/cm³. En el suelo franco limoso (17), la densidad de 1.20 g/cm³ alcanza los 50 cm en 106 minutos, lo que evidencia una red de macroporos funcionales. Sin embargo, a 1.30 g/cm³ la infiltración disminuye a 42 cm en 2943 minutos, indicando una reducción sustancial de la conductividad hidráulica. En contraste, el tipo de suelo limo (20) muestra un comportamiento inverso. A 1.20 g/cm³ solo alcanza 43 cm en 1212 minutos, mientras que a 1.30 g/cm³ llega a 50 cm en 124 minutos, lo que sugiere que un leve aumento de densidad puede reorganizar la estructura interna y favorecer trayectorias más continuas para el flujo.

La Figura 26 (b), correspondiente al 20% de humedad, evidencia un incremento notable del tiempo de infiltración debido al mayor grado de saturación inicial. En el suelo franco limoso (17), con 1.70 g/cm³ la infiltración alcanza 50 cm en 2739 minutos, mientras que a 1.80 g/cm³

llega a 45 cm en 2785 minutos, manteniendo una red porosa funcional pese a la alta humedad y densidad. En el tipo de suelo limo (20), la infiltración alcanza 50 cm en 1472 minutos a 1.70 g/cm<sup>3</sup> y en 1360 minutos a 1.80 g/cm<sup>3</sup>, observándose una infiltración inicial acelerada seguida de estabilización, lo que indica que los suelos dominados por limo conservan condiciones favorables para la movilidad del diésel incluso ante variaciones de densidad.

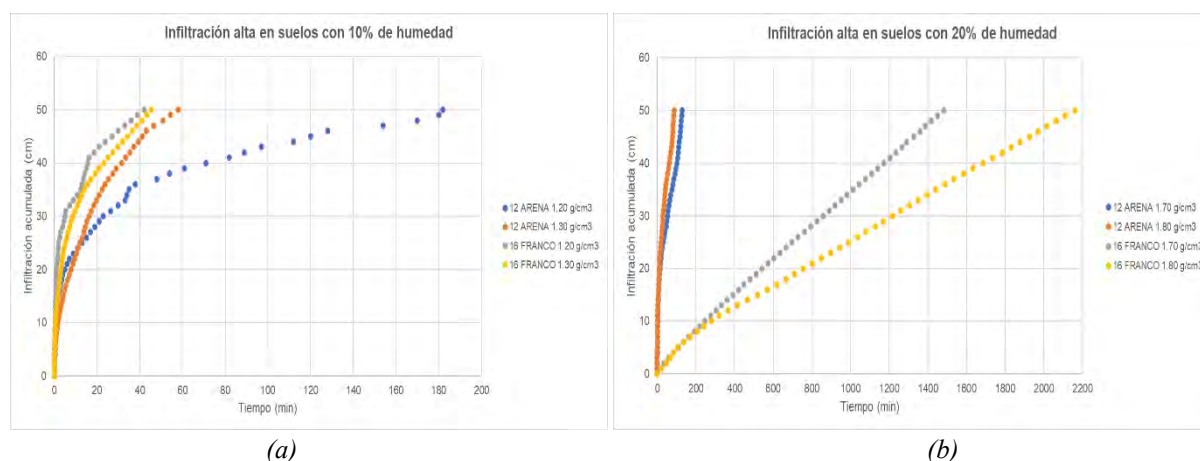
En conjunto, la Figura 26 muestra que la infiltración intermedia del diésel está condicionada principalmente por la humedad inicial y modulada por la densidad en función de la textura. A 10% de humedad, las diferencias entre densidades son marcadas y un aumento moderado de compactación puede mejorar la conectividad porosa en suelos limosos. A 20% de humedad, los tiempos aumentan y las diferencias entre densidades se atenúan, ya que la saturación inicial limita el flujo. En general, la humedad ejerce el control dominante sobre la infiltración, mientras que la densidad influye según la organización porosa interna de cada suelo. Este comportamiento ha sido reportado por Hillel (1998), quien señala que la humedad previa del suelo modifica la conectividad de los poros y el régimen de flujo de fluidos no acuosos.

#### **4.3.1.3. *Infiltración alta***

En este tipo de infiltración se identificaron casos asociados a suelos con elevado contenido de arena, específicamente los puntos 12 y 16, correspondientes a los suelos clasificados como arena y franco. Estos suelos presentan una estructura porosa abierta con abundantes macroporos, lo que favorece un flujo rápido y continuo del diésel. Como resultado, alcanzan mayores profundidades en tiempos reducidos, representando el extremo de mayor permeabilidad dentro del conjunto de texturas evaluadas.

**Figura 27**

*Infiltración del diésel en suelos con 10% y 20% de humedad (fase alta)*



La Figura 27 (a) muestra la infiltración del diésel al 10% de humedad bajo densidades de 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> en suelos arenosos y francos. En la arena (12), los 50 cm se alcanzan en 182 minutos a 1,20 g/cm<sup>3</sup> y en solo 58 minutos a 1.30 g/cm<sup>3</sup>, indicando que un ligero aumento de densidad puede mejorar la continuidad de los macroporos sin afectar su alta permeabilidad. En el suelo franco (16), los 50 cm se alcanzan en 42 y 45 minutos para 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, mostrando una infiltración muy eficiente y poco sensible a variaciones en la densidad, debido a su estructura equilibrada entre arena, limo y arcilla.

La Figura 27 (b), correspondiente al 20% de humedad, evidencia un incremento en los tiempos de infiltración por el mayor grado de saturación inicial; sin embargo, ambos suelos mantienen una infiltración elevada. En la arena, los 50 cm se alcanzan en 130 minutos a 1.70 g/cm<sup>3</sup> y en 87 minutos a 1.80 g/cm<sup>3</sup>, reflejando una red de macroporos altamente funcional incluso bajo condiciones más restrictivas. En el suelo franco, la infiltración es más gradual demorando 1482 minutos a 1.70 g/cm<sup>3</sup> y 2161 minutos a 1.80 g/cm<sup>3</sup>, manteniendo un flujo continuo, aunque más lento que en la arena.

En conjunto, la Figura 27 muestra que los suelos arenosos y francos presentan las mayores tasas de infiltración del diésel tanto al 10% como al 20% de humedad. Si bien la

humedad inicial incrementa los tiempos, la arena conserva una eficiencia sobresaliente, lo que coincide con lo señalado por Ma et al., (2016) respecto al predominio del flujo gravitacional en materiales arenosos. El suelo franco también permite una infiltración completa, aunque con mayor sensibilidad al aumento de humedad y densidad. En general, estos suelos constituyen los medios más favorables para la movilidad del diésel dentro del conjunto evaluado.

#### **4.3.2. *Residual (R-500)***

Para analizar la influencia de las propiedades físicas y texturales del suelo en la distribución vertical del residual (R-500), se evaluó la infiltración acumulada (cm) en los diferentes tipos de suelo, considerando diferentes condiciones de densidad y contenido de humedad. Los resultados evidencian una fuerte dependencia de la movilidad del contaminante con respecto a la composición granulométrica del suelo, confirmando que la textura constituye un factor clave en la infiltración vertical del residual (R-500).

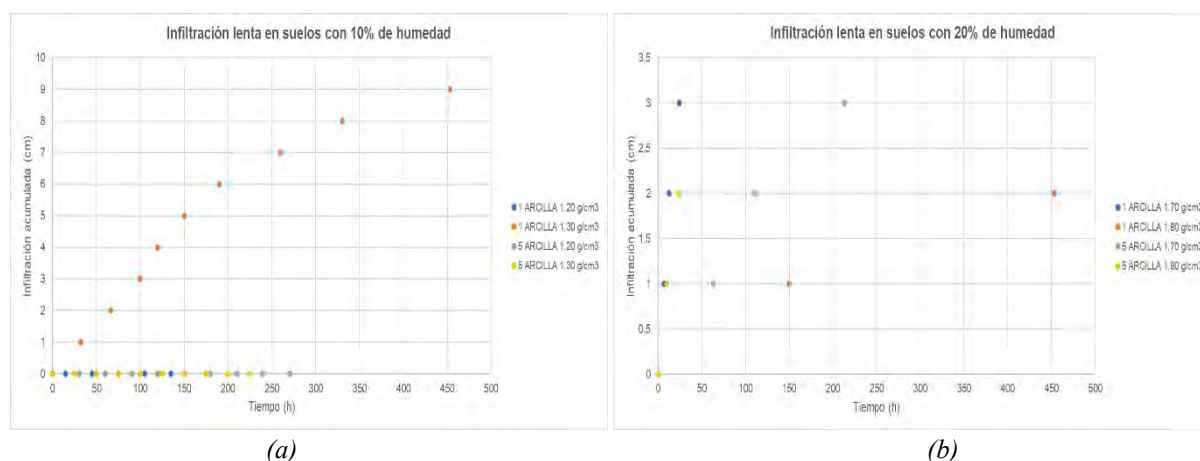
Los resultados experimentales evidenciaron tres comportamientos hidráulicos diferenciados, los cuales se han categorizado de la siguiente manera para su análisis detallado:

##### **4.3.2.1. *Infiltración lenta***

En este tipo de infiltración se identificaron casos críticos, asociados principalmente a suelos con alto contenido de arcilla. Este comportamiento se observó en los puntos 1 y 5, correspondientes a los suelos clasificados como arcilla en ambos casos. En estos suelos, la elevada microporosidad y las fuertes fuerzas de retención limitaron severamente el avance del residual (R-500), registrándose distancias de infiltración mínimas o incluso nulas durante el tiempo de observación.

**Figura 28**

*Infiltración del residual (R-500) en suelos con 10% y 20% de humedad (fase lenta)*



En la Figura 28 (a), se observa que en la arcilla (1), la densidad de  $1.20 \text{ g/cm}^3$  presentó infiltración completamente nula, lo que indica una pérdida total de conectividad porosa. En cambio, con una densidad de  $1.30 \text{ g/cm}^3$  se observó una infiltración lenta y progresiva que alcanzó 9 cm después de 459 horas, lo que sugiere que incrementos leves en la densidad podrían generar micro fisuras o trayectorias preferenciales que permiten el ingreso del residual pese a su alta viscosidad. Por otro lado, la arcilla (5) mostró un comportamiento aún más restrictivo, registrando infiltración prácticamente nula en ambas densidades, reflejando una estructura dominada por microporos que promueven la retención del fluido.

La Figura 28 (b) complementa este análisis al evaluar el comportamiento hidráulico de los mismos suelos bajo un contenido de humedad del 20 %. En este escenario, la infiltración del residual (R-500) resultó todavía más limitada debido a la mayor saturación inicial del medio. En la arcilla (1), la infiltración apenas alcanzó entre 2 y 3 cm aun después de varias horas o días, evidenciándose una fuerte reducción de la continuidad porosa con el aumento de densidad. De manera similar, en la arcilla (5) presentó avances mínimos, aunque a  $1.70 \text{ g/cm}^3$  se registró un ligero aumento hasta 3 cm, en  $1.80 \text{ g/cm}^3$  el avance inicial fue más rápido, pero posteriormente se detuvo, lo que sugiere la obstrucción temprana de trayectorias preferenciales.



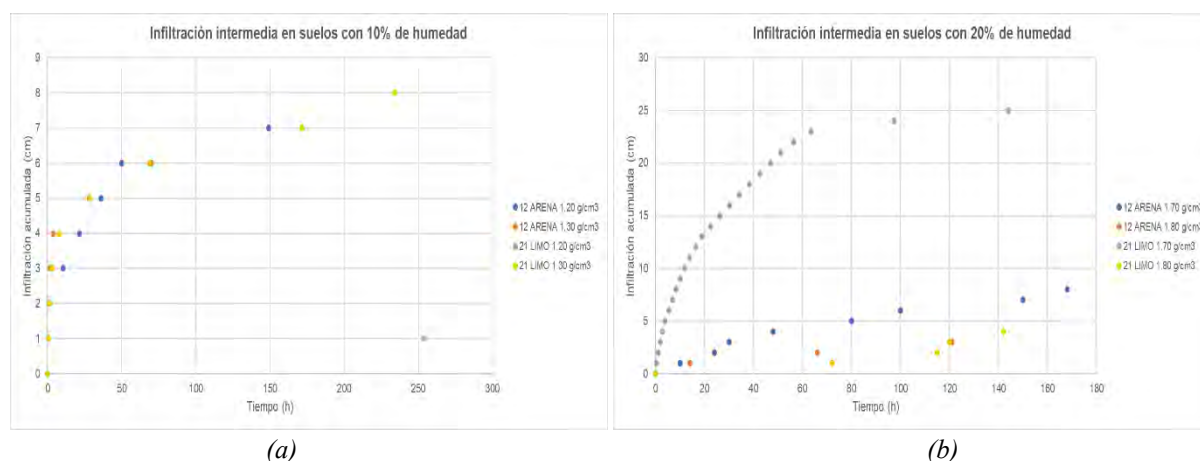
En conjunto, la Figura 28 evidencia que la infiltración del residual (R-500) en suelos arcillosos es extremadamente limitada y fuertemente dependiente de la estructura porosa, la densidad y el contenido de humedad inicial. Con 10 % de humedad se observan algunas infiltraciones moderadas, aunque en varios casos permanecen nulas; sin embargo, con 20 % de humedad la infiltración se reduce drásticamente, alcanzando solo entre 2 y 3 cm aun después de periodos prolongados. Estos resultados confirman el comportamiento altamente impermeable de las arcillas frente a fluidos de alta viscosidad y la marcada influencia de la saturación inicial en la reducción de la disponibilidad de poros para el desplazamiento del contaminante. De acuerdo con Hillel (1998), en suelos finos parcialmente secos, los microporos dominan el régimen de flujo, reduciendo drásticamente la movilidad de líquidos orgánicos pesados.

#### **4.3.2.2. *Infiltración intermedia***

En este tipo de infiltración se identificaron comportamientos asociados a una infiltración relativa. Este comportamiento se observó en los puntos 12 y 21, correspondientes a los suelos clasificados como arena y limo, respectivamente. En el punto 12, la arena favoreció un avance más eficiente del residual (R-500) debido a su elevada macroporosidad y baja retención; mientras que en el punto 21, el limo presentó un flujo moderado condicionado por su mayor microporosidad y su capacidad de retención capilar.

**Figura 29**

*Infiltración del residual (R-500) en suelos con 10% y 20% de humedad (fase intermedia)*



La Figura 29 (a) evidencia este comportamiento bajo densidades de 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad del 10 %. En arena (12), la infiltración fue similar entre densidades, alcanzando 8 cm en 149 horas para 1.20 g/cm<sup>3</sup> y 7 cm en 172 horas para 1.30 g/cm<sup>3</sup>. Este comportamiento confirma la elevada permeabilidad de la arena, cuya estructura granular permite el avance del residual (R-500) incluso con su alta viscosidad. En contraste, el limo (21) mostró un flujo considerablemente más lento con 1 cm en 254 horas para 1.20 g/cm<sup>3</sup>; sin embargo, al aumentar la densidad a 1.30 g/cm<sup>3</sup> la infiltración se incrementó notablemente, alcanzando 8 cm en 234 horas. Esto indica que en el limo el aumento de densidad puede favorecer la conectividad de poros aislados y generar trayectorias preferenciales, mejorando el desplazamiento del residual (R-500).

La Figura 29 (b) profundiza este análisis al evaluar ambos suelos bajo un contenido de humedad del 20 % y densidades de 1.70 y 1.80 g/cm<sup>3</sup>. En estas condiciones se observó un cambio significativo respecto al comportamiento registrado con 10 % de humedad, destacando un incremento general en la infiltración. En la arena (12), con 1.70 g/cm<sup>3</sup> la infiltración alcanzó 8 cm en 168 horas, mientras que con 1.80 g/cm<sup>3</sup> se redujo a 3 cm en 121 horas, evidenciando la sensibilidad de la arena a la densidad que limita la continuidad de los macroporos. Por otro

lado, el limo (21) mostró infiltraciones de mayor magnitud. Infiltrando 25 cm para  $1.70 \text{ g/cm}^3$  y 4 cm para  $1.80 \text{ g/cm}^3$ , reflejando que el limo mantiene una estructura porosa continua aún bajo mayor densidad, lo que favorece el avance del residual (R-500).

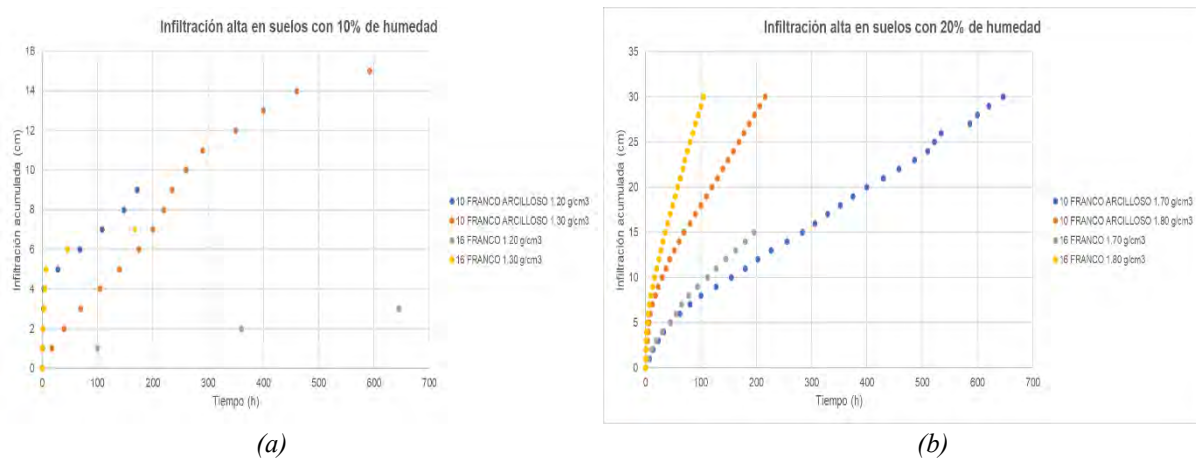
En conjunto, la Figura 29 evidencia que la infiltración intermedia del residual (R-500) en suelos arenosos y limosos está fuertemente condicionada por la humedad inicial y la densidad aparente. Con 10 % de humedad, la infiltración es reducida, especialmente en el limo, debido a la alta viscosidad del fluido y a la limitada conectividad porosa. En cambio, con 20 % de humedad la infiltración aumenta notablemente, destacando el comportamiento del limo, que alcanza profundidades significativamente mayores al mantener una red porosa continua. En contraste, la arena reduce su capacidad de infiltración a mayores densidades y humedades, mostrando una alta sensibilidad a la densidad. Estos resultados confirman que el efecto combinado de humedad y densidad actúa de manera diferenciada según la textura del suelo, favoreciendo el desplazamiento del residual (R-500) en suelos limosos y restringiéndolo en suelos arenosos.

#### **4.3.2.3. *Infiltración alta***

En este tipo de infiltración se identificaron casos con un comportamiento relativamente favorable, asociados principalmente a suelos con textura intermedia, como el franco arcilloso y el franco, puntos 10 y 16. A diferencia de los suelos arcillosos, estos suelos presentan una combinación de fracciones que incluye arena, limo y arcilla, permitiendo una estructura porosa más equilibrada.

**Figura 30**

*Infiltración del residual (R-500) en suelos con 10% y 20% de humedad (fase alta)*



La Figura 30 (a) muestra este comportamiento bajo densidades aparentes de 1.20 y 1.30 g/cm³ y un contenido de humedad del 10 %. En el suelo franco arcilloso (10), la infiltración alcanza 9 cm en 172 horas para 1.20 g/cm³, reflejando que la fracción arenosa y limosa permite el avance gradual del residual pese a la retención ejercida por la arcilla. Con 1.30 g/cm³ la infiltración llega a 15 cm, aunque en un tiempo prolongado (592 horas), indicando que el aumento de densidad reduce la conectividad porosa y ralentiza el flujo sin impedirlo completamente. Por su parte, en el franco (16) presenta una respuesta más variable. A 1.20 g/cm³ alcanza 3 cm en 645 horas, debido a una red porosa dominada por microporos; mientras que a 1.30 g/cm³ la infiltración se incrementa a 7 cm en 168 horas, lo que sugiere que una compactación moderada mejora la continuidad de los macroporos y permite un flujo más eficiente.

La Figura 30 (b) describe el comportamiento de estos suelos con un contenido de humedad del 20 % y densidades de 1.70 y 1.80 g/cm³. En estas condiciones, la mayor disponibilidad de agua reduce la succión capilar y favorece la movilidad del residual (R-500). En el suelo franco arcilloso (10), la infiltración alcanza 30 cm en 646 horas para 1.70 g/cm³, mientras que con 1.80 g/cm³ se llega a los 30 cm en solo 216 horas, evidenciando que una

mayor densidad puede generar una estructura porosa más uniforme y continua. En el franco (16), la infiltración es aún más favorable. Con  $1.70 \text{ g/cm}^3$  se alcanzan 15 cm en 196 horas, y con  $1.80 \text{ g/cm}^3$  se llega a 30 cm en apenas 105 horas, reflejando una elevada permeabilidad y una red porosa bien conectada.

En conjunto, la Figura 30 muestra que la infiltración del residual (R-500) en suelos franco arcillosos y francos mejora considerablemente cuando la humedad inicial aumenta de 10 % a 20 %. A 10 %, la infiltración es moderada y más lenta, especialmente en el franco arcilloso, mientras que a 20 % se observa un avance más profundo y rápido incluso bajo mayores densidades. El suelo franco mantiene siempre un comportamiento más favorable debido a su mayor continuidad porosa y menor sensibilidad a la densidad, mientras que el franco arcilloso mejora notablemente bajo mayores niveles de humedad. En conjunto, estos resultados confirman que la humedad inicial actúa como un factor determinante que puede compensar parcialmente las restricciones impuestas por la textura y la densidad.

Según Fetter, (2001), en suelos de textura media, el incremento de la humedad inicial reduce la resistencia capilar, favoreciendo un avance más profundo de hidrocarburos residuales, incluso en medios parcialmente compactados.

#### **4.4. AJUSTE DEL MODELO MATEMÁTICO**

##### ***4.4.1. Selección del modelo***

Con el fin de cuantificar el comportamiento de la infiltración observado en los ensayos, se empleó el modelo matemático de Kostiakov de la ecuación (4), debido a su capacidad para describir procesos de ingreso no lineal en suelos de distintas texturas y densidades. Este modelo permite analizar la relación entre el tiempo y la profundidad infiltrada; así como, las diferencias entre infiltración baja, intermedia y alta.

Dado que la infiltración disminuye progresivamente con el tiempo por el llenado de poros y la pérdida de gradiente hidráulico, el modelo de Kostiakov resulta adecuado para representar este comportamiento. En esta investigación se aplicó su forma linealizada mediante transformaciones logarítmicas, obteniéndose los parámetros  $k$  (infiltración inicial) y  $n$  (decaimiento). La calidad del ajuste fue excelente en todos los casos, con coeficientes de determinación  $R^2 = 0.999$ , lo que confirma la correspondencia entre los datos experimentales y el modelo para los suelos evaluados con diésel y residual (R-500).

El modelo de Kostiakov se ajustó directamente en su forma no lineal a los datos experimentales de infiltración acumulada en función del tiempo. La alta calidad del ajuste, con valores de  $R^2 = 0.999$ , indica que el modelo representa adecuadamente el comportamiento de la infiltración en los suelos evaluados con diésel y residual (R-500), sin que sea necesario recurrir a transformaciones logarítmicas adicionales. Hillel (1998) ajustes no lineales directos son preferibles cuando describen adecuadamente el proceso físico.

Para cuantificar la infiltración en los suelos experimentales se ajustó el modelo empírico de Kostiakov:

$$I(t) = k t^n \quad (15)$$

Donde:

$I(t)$  es la profundidad infiltrada (cm)

$k$  es la infiltración inicial (cm/min – cm/h)

$t$  el tiempo (min - h)

$n$  es el decaimiento, adimensional

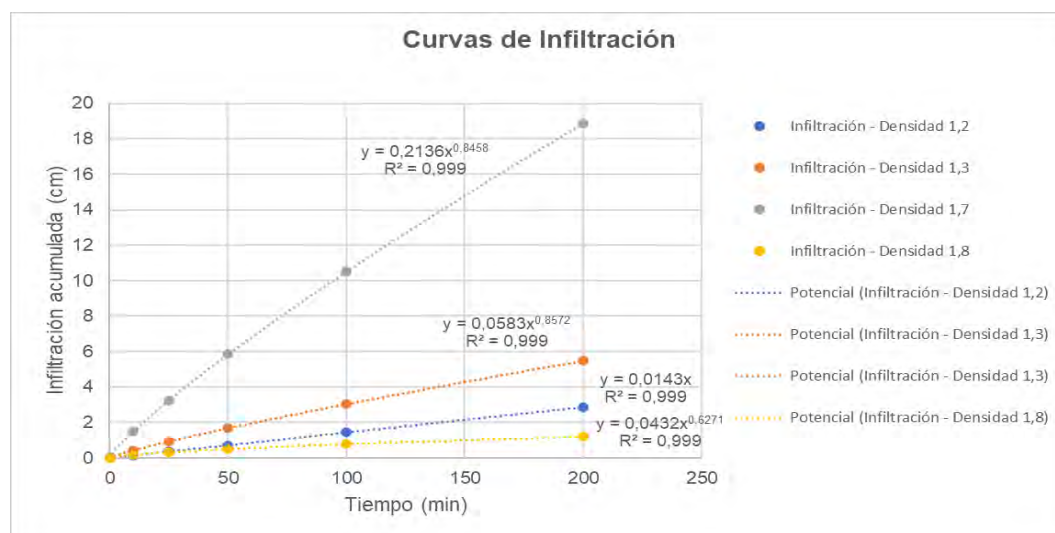
#### 4.4.2. Diésel

Se trabajó con suelos que tuvieron infiltración baja, intermedia y alta, evaluados bajo cuatro niveles de densidad: 1.20; 1.30; 1.70 y 1.80 g/cm<sup>3</sup>. Para las densidades más bajas (1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup>). Los ensayos se realizaron con un contenido de humedad del 10%, mientras que las densidades más altas (1.70 y 1.80 g/cm<sup>3</sup>) fueron preparadas con un contenido de humedad de 20% requerido para alcanzar dichos niveles de densidad, el comportamiento de infiltración se puede ver en el apéndice 11, 12 y 13.

Una vez ya analizado el comportamiento de infiltración correspondiente al suelo Arcilla (1). Se realizó el ajuste del modelo matemático en función del comportamiento observado en la distancia de infiltración, aplicando el modelo empírico de Kostiakov. La Figura 31 muestra las curvas ajustadas para cada una de las densidades evaluadas en el suelo Arcilla (1).

**Figura 31**

*Ajuste del modelo Kostiakov para la Arcilla (1)*



La Figura 31 muestra que el modelo de Kostiakov representa adecuadamente la infiltración en el suelo Arcilla (1). En 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> las curvas presentan pendientes pronunciadas, reflejando mayores valores de  $k$  y una infiltración inicial rápida. Con el aumento

de densidad, la infiltración disminuye de manera significativa: en 1.70 g/cm<sup>3</sup> la pendiente es mínima y en 1.80 g/cm<sup>3</sup> no se genera curva debido a la infiltración nula.

Una vez obtenido el ajuste del modelo para cada densidad, se determinaron las ecuaciones correspondientes del modelo de Kostiakov, cuyos parámetros se resumen en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Ecuación del modelo Kostiakov para el diésel en el Arcilla (1)*

Muestra	Ecuación del Modelo ( $I=k \cdot t^n$ )	k (Infiltración Inicial)	n (Decaimiento)	R <sup>2</sup>
Infiltración - Densidad 1,20	$I=13,864 \cdot t^{0,3099}$	13,864	0,3099	0,999
Infiltración - Densidad 1,30	$I=15,818 \cdot t^{0,194}$	15,818	0,194	0,999
Infiltración - Densidad 1,70	$I=0,0241 \cdot t^{0,7009}$	0,0241	0,7009	0,999
Infiltración - Densidad 1,80	Infiltración Nula			

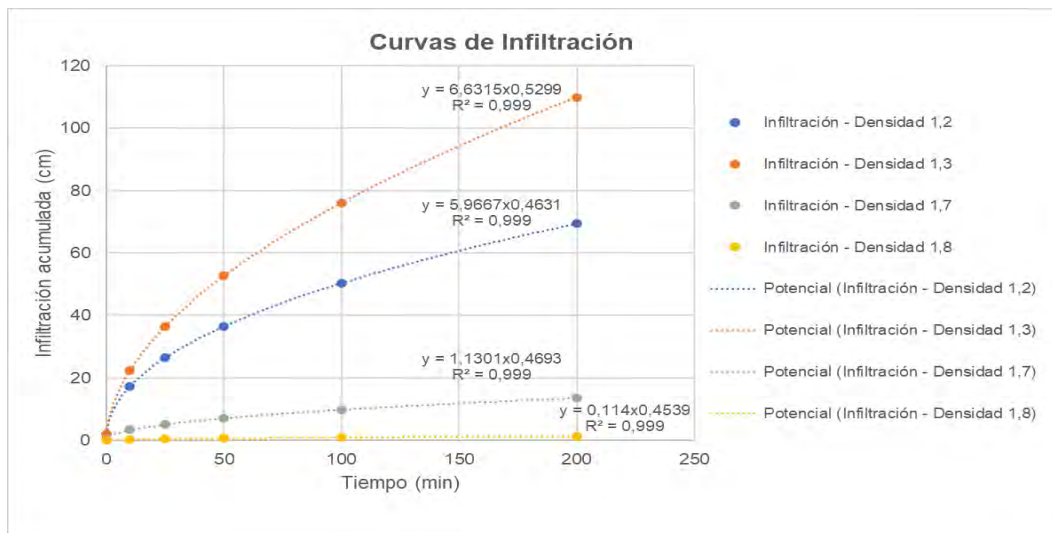
La Tabla 9 evidencia la relación directa entre la densidad del suelo arcilloso y los parámetros de infiltración. En 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> los valores de k (13.864 y 15.818) indican una infiltración inicial relativamente elevada para un suelo arcilloso, atribuida a la presencia de poros aún no colapsados. En 1.70 g/cm<sup>3</sup> k disminuye drásticamente a 0.0241, reflejando la pérdida casi total de porosidad efectiva y la limitación severa al ingreso del diésel. El valor de n (0.7009) muestra un decaimiento más rápido de la tasa de infiltración. En la densidad aparente de 1.80 g/cm<sup>3</sup> no se registran valores de k ni n, debido a la infiltración completamente nula, lo que confirma que en condiciones de alta compactación los suelos arcillosos presentan una capacidad prácticamente inexistente para permitir el movimiento del fluido a través de su matriz porosa (Hillel, 1998).



Para Arena (12) se realizó el ajuste del modelo matemático en función del comportamiento observado en la distancia de infiltración, aplicando el modelo empírico de Kostiakov. La Figura 46 muestra las curvas ajustadas para cada una de las densidades evaluadas en el suelo Arena (12).

**Figura 32**

*Ajuste del modelo Kostiakov para la Arena (12)*



La Figura 32 muestra que en 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> la infiltración del diésel es alta, con pendientes iniciales pronunciadas propias de suelos con elevada porosidad. En 1.70 g/cm<sup>3</sup> la pendiente disminuye, indicando una reducción marcada de la infiltración por el aumento de densidad. En 1.80 g/cm<sup>3</sup> la curva es casi horizontal, reflejando una infiltración mínima asociada a una estructura altamente densa y con macroporos prácticamente inexistentes.

A partir de estos ajustes se determinaron las ecuaciones correspondientes para cada densidad, las cuales se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10***Ecuación del modelo Kostiakov para el diésel en la Arena (12)*

Muestra	Ecuación del Modelo ( $I=k \cdot t^n$ )	k (Infiltración Inicial)	n (Decaimiento)	R <sup>2</sup>
Infiltración - Densidad 1.20	$I=5.9667 \cdot t^{0.4631}$	5.9667	0.4631	0.999
Infiltración - Densidad 1.30	$I=6.6315 \cdot t^{0.5299}$	6.6315	0.5299	0.999
Infiltración - Densidad 1.70	$I=1.1301 \cdot t^{0.4693}$	1.1301	0.4693	0.999
Infiltración - Densidad 1.80	$I=0.114 \cdot t^{0.4539}$	0.1136	0.4539	0.999

La Tabla 10 muestra que en el suelo Arena (12) las densidades 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> presentan los valores más altos de  $k$ , indicando una infiltración inicial elevada propia de un suelo con amplia porosidad y buena conectividad entre macroporos. Los valores de  $n$  reflejan un decaimiento moderado, con una disminución progresiva pero estable del flujo.

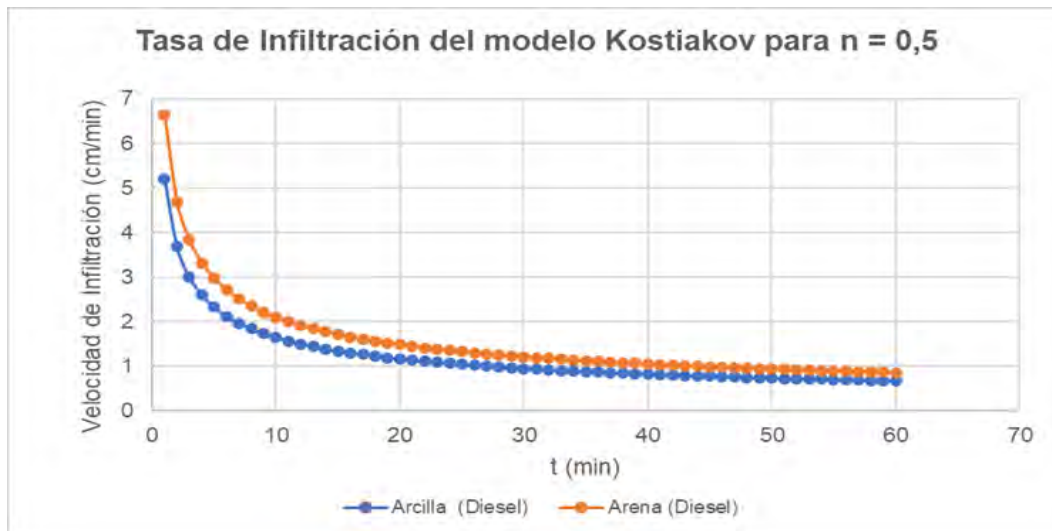
Para la densidad aparente de 1.70 g/cm<sup>3</sup>, el valor de  $k$  disminuye de manera marcada, lo que evidencia una reducción de la porosidad efectiva del suelo y una mayor restricción al paso del diésel, asociada al incremento del grado de compactación. En este caso, el parámetro  $n$  muestra un decaimiento suave, indicando una menor variación temporal del proceso de infiltración (Hillel, 1998).

En 1.80 g/cm<sup>3</sup>  $k$  alcanza su valor mínimo, indicando una infiltración inicial prácticamente nula debido al colapso de los macroporos. El decaimiento ( $n$ ) es lento, lo que se traduce en un avance casi imperceptible de la infiltración a lo largo del tiempo, traducándose en un avance casi imperceptible de la infiltración a lo largo del tiempo, comportamiento característico de suelos altamente compactados (Ray R. Weil & Nyle C. Brady, 2017).

A continuación, se presenta la representación gráfica de la velocidad de infiltración en función del tiempo, calculada mediante la ecuación empírica de Kostiakov.

**Figura 33**

*Curvas de velocidad de infiltración en función del tiempo con Diésel*



En la Figura 33, se observa como la tasa de admisión del fluido disminuye monótonamente hasta alcanzar un valor asintótico constante.

Las curvas muestran una pendiente pronunciada durante los primeros minutos de ensayo. Este fenómeno responde a la alta succión matricial inicial del suelo, la cual decrece rápidamente a medida que el perfil del suelo se satura y los poros se llenan de fluido, tal como explican (Chow et al., 1994).

#### **4.4.3. Residual (R-500)**

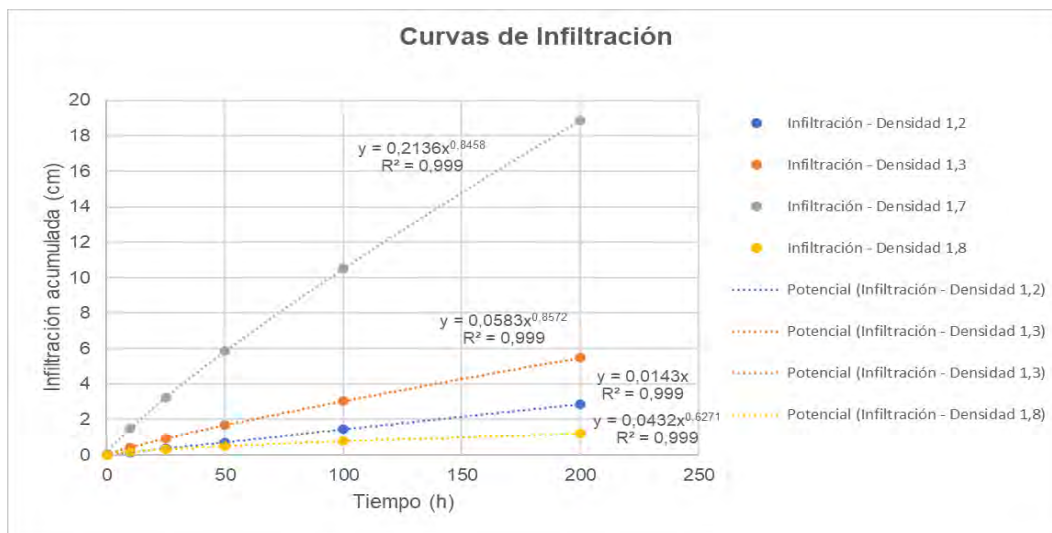
El análisis se realizó considerando tres categorías de infiltración según la textura del suelo: infiltración baja (Arcilla 1 y Arcilla 5), infiltración intermedia (Arena 12 y Limo 21) e infiltración alta (Franco Arcilloso 10 y Franco 16). Para cada caso se evaluaron cuatro niveles de densidad aparente (1.20; 1.30; 1.70 y 1.80 g/cm<sup>3</sup>), aplicando 10% de humedad en las

densidades bajas (1.20 y 1.30) y 20 % en las densidades altas (1.70 y 1.80) el comportamiento de infiltración se puede ver en el apéndice 14, 15 y 16.

Para Arcilla (1), se aplicó el modelo empírico de Kostiakov para ajustar los datos experimentales de cada densidad del suelo.

**Figura 34**

*Ajuste del modelo Kostiakov para el Arcilla (1)*



La Figura 34 muestra que en 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> la infiltración del residual (R-500) es muy baja y progresa lentamente, con pendientes suaves que reflejan la limitada porosidad y la alta viscosidad del fluido. En 1.70 g/cm<sup>3</sup> la infiltración aumenta de forma marcada y mantiene un comportamiento casi lineal, evidenciando que a esta densidad se conserva mayor conectividad porosa y el fluido avanza con velocidad constante. En 1.80 g/cm<sup>3</sup> se observa la infiltración más reducida del conjunto, con una curva casi plana y mínima variación temporal, indicando una fuerte restricción al flujo.

Los valores de los parámetros del modelo de Kostiakov ( $k$ ,  $n$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11***Ecuación del modelo Kostiakov para el residual (R-500) en el Arcilla (1)*

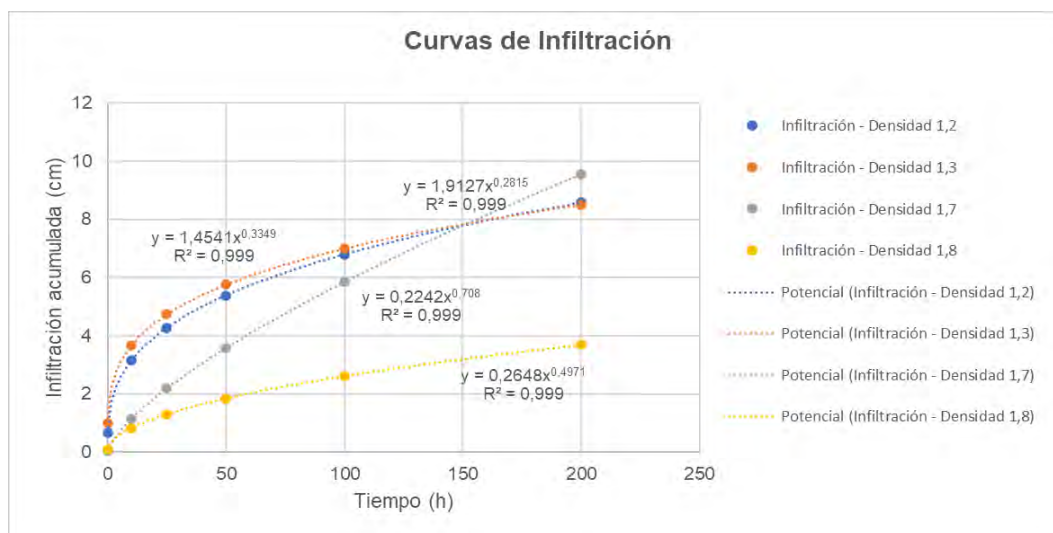
Muestra	Ecuación del Modelo ( $I=k \cdot t^n$ )	k (Infiltración Inicial)	n (Decaimiento)	R <sup>2</sup>
Infiltración - Densidad 1,20	$I=0,00143 \cdot t$	0,00143	1	0,999
Infiltración - Densidad 1,30	$I=0,0583 \cdot t^{0,8572}$	0,0583	0,8572	0,999
Infiltración - Densidad 1,70	$I=0,2136 \cdot t^{0,8458}$	0,2136	0,8458	0,999
Infiltración - Densidad 1,80	$I=0,0432 \cdot t^{0,6271}$	0,0432	0,6271	0,999

La Tabla 11 muestra que en el suelo Arcilla (1) las densidades 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> presentan los valores más altos de  $k$ , lo que indica una infiltración inicial elevada asociada a una estructura granular parcialmente abierta y buena conectividad de poros. Los valores de  $n$  cercanos a 1, reflejan un decaimiento gradual del proceso. Este comportamiento se asocia a una estructura granular parcialmente abierta y a una adecuada conectividad de poros, condiciones que permiten el ingreso inicial del fluido aun en suelos de textura fina (Hillel, 1998). En 1.70 g/cm<sup>3</sup>  $k$  disminuye de forma notable, evidenciando la reducción de la infiltración inicial por el aumento de densidad y la menor porosidad efectiva, mientras que  $n$  muestra un decaimiento más marcado. En 1.80 g/cm<sup>3</sup>  $k$  alcanza su valor mínimo, confirmando una infiltración muy limitada debido a la pérdida de macroporos. y  $n$  indica un proceso lento y de progresión estable.

Para Arena (12) se realizó el ajuste del modelo matemático mediante la aplicación del modelo de Kostiakov.

**Figura 35**

*Ajuste del modelo Kostiakov para el Arena (12)*



La Figura 35 se observa que los suelos con menor densidad aparente (1.2 y 1.3 g/cm³) presentan mayores valores de infiltración acumulada, mientras que los suelos con mayor densidad (1.7 y 1.8 g/cm³) muestran una reducción significativa de la infiltración. Esto evidencia que el incremento de la densidad aparente, asociado a una mayor compactación del suelo.

Una vez realizado el ajuste del modelo de Kostiakov, se determinaron los valores de los parámetros, los cuales se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Ecuación del modelo Kostiakov para el residual (R-500) en la Arena (12)*

Muestra	Ecuación del Modelo ( $I=k \cdot t^n$ )	k (Infiltración Inicial)	n (Decaimiento)	$R^2$
Infiltración - Densidad 1,20	$I=1,4541 \cdot t^{0,3349}$	1,4541	0,3349	0,999
Infiltración - Densidad 1,30	$I=1,9127 \cdot t^{0,2815}$	1,9127	0,2815	0,999
Infiltración - Densidad 1,70	$I=0,2242 \cdot t^{0,708}$	0,2242	0,708	0,999
Infiltración - Densidad 1,80	$I=0,2648 \cdot t^{0,4971}$	0,2648	0,4971	0,999

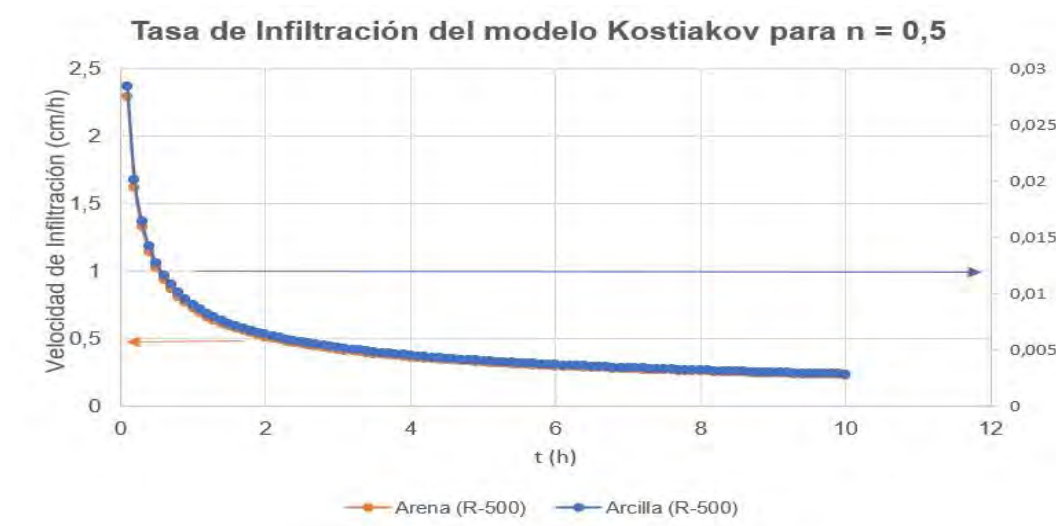
La Tabla 12 muestra que, en el suelo Arena (12), las densidades aparentes de 1.20 y 1.30 g/cm<sup>3</sup> presentan los valores más altos del parámetro  $k$ , lo que indica una infiltración inicial más rápida, atribuida a la elevada presencia de macroporos y a una estructura altamente permeable característica de los suelos arenosos poco compactados (Ray R. Weil & Nyle C. Brady, 2017).

En 1.70 g/cm<sup>3</sup>  $k$  disminuye, evidenciando una menor infiltración inicial debido a la reducción de porosidad, mientras que  $n$  indica un decaimiento más marcado. En 1.80 g/cm<sup>3</sup>,  $k$  alcanza su valor bajo, mostrando una infiltración inicial mínima, y  $n$  también se reduce, lo que confirma un proceso lento y con poca variación en el tiempo.

Con el objetivo de garantizar el comportamiento de los suelos evaluados, se procedió a modelar la velocidad de infiltración en función del tiempo con el residual (R-500). Para ello, se empleó la ecuación empírica de Kostiakov, utilizando los parámetros  $k$  y  $n$  determinados durante la fase experimental.

### Figura 36

*Curvas de velocidad de infiltración en función del tiempo con residual (R-500)*



En la Figura 36, se observa que el comportamiento de la velocidad de infiltración se ajusta al modelo de decaimiento exponencial descrito por Kostiakov (1932). Sin embargo,

existen diferencias significativas en la magnitud y la cinética de absorción entre los escenarios evaluados.

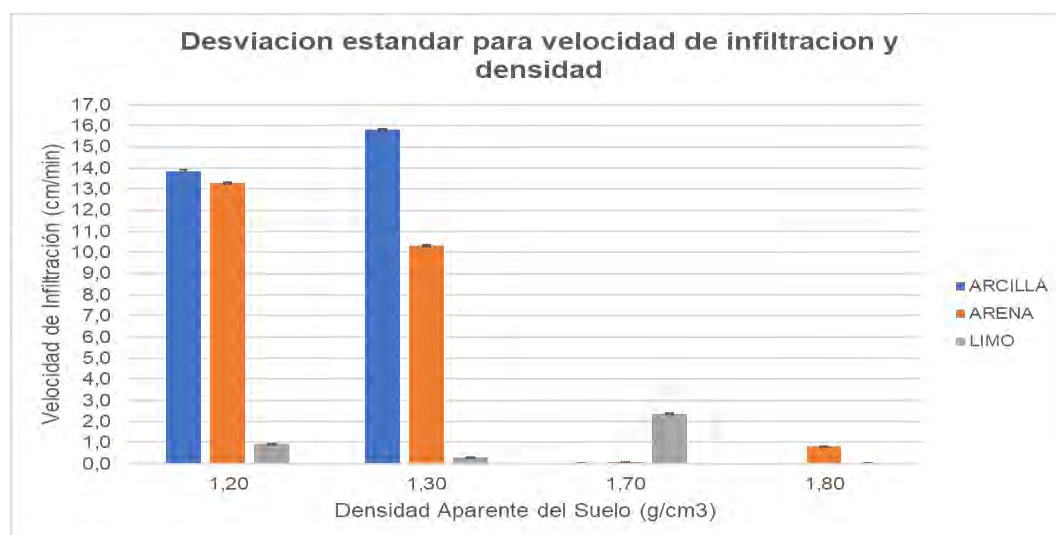
La cinética de infiltración se ve drásticamente alterada. Las curvas presentan un comportamiento asintótico cercano a cero desde el instante inicial. Esto sugiere que el producto ha generado una modificación en la tensión superficial o un sellado físico de los poros, fenómeno conocido como hidrofobicidad inducida (Hillel, 1998). La reducción del parámetro  $k$  en varios órdenes de magnitud demuestra que el tratamiento actúa como una barrera impermeabilizante efectiva.

Los resultados obtenidos se presentan como media  $\pm$  desviación estándar, lo que permite analizar la variabilidad de los datos de infiltración obtenidos en los distintos tratamientos evaluados.

Se seleccionaron los suelos representativos para la arcilla, arena y limo con las 3 repeticiones. Los datos que se muestran son velocidad de infiltración y densidad. Para el diésel y residual (R-500) se muestra como la Figura 37.

**Figura 37**

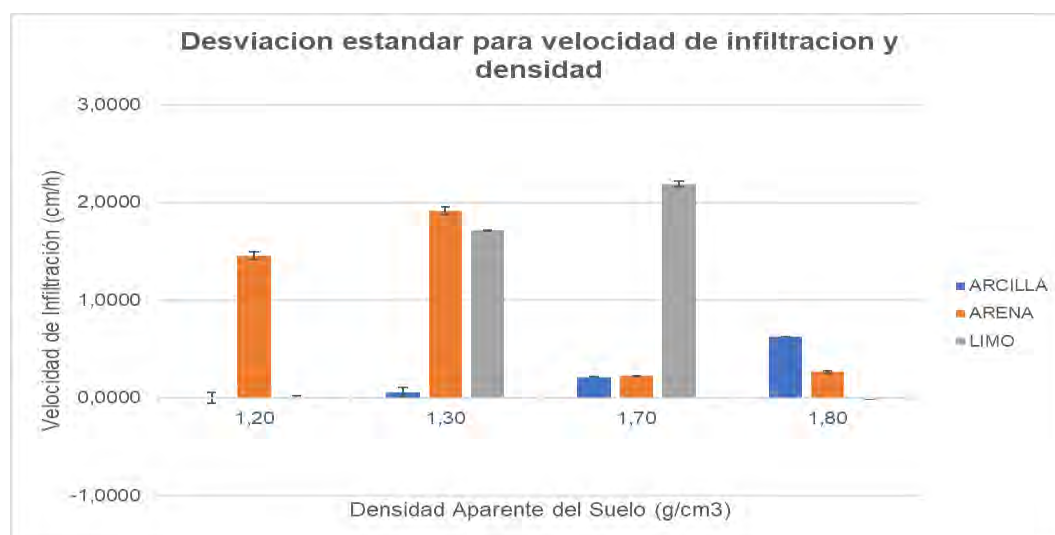
*Grafico dinámico de la desviación estándar del diésel*





**Figura 38**

*Grafico dinámico de la desviación estándar del residual (R-500)*



En la Figura 37 y 38, muestra la desviación estándar de la velocidad de infiltración del diésel y residual (R-500) en función de la densidad aparente del suelo para los tipos de suelo arcilla, arena y limo. Las barras de error representan la dispersión de los valores obtenidos a partir de las réplicas experimentales, permitiendo evaluar la variabilidad de las mediciones en cada tratamiento.

Las desviaciones estándar observadas son bajas en la mayoría de los tratamientos, lo que confirma la precisión y confiabilidad de las mediciones realizadas, respaldando la validez de los resultados obtenidos en el estudio.

En el estudio se realizaron 168 pruebas experimentales, cada una con 3 réplicas, dando un total de 504 pruebas experimentales. La desviación estándar correspondiente a cada tipo de suelo, según la densidad aparente y el porcentaje de humedad trabajados, se presenta en el Apéndice 17 para el diésel y en el Apéndice 18 para el residual (R-500).

#### 4.5. PRUEBA DE HIPÓTESIS

Para evaluar si el tipo de suelo influye en la infiltración inicial (K) de los hidrocarburos (Diésel y Residual R-500), se plantearon las siguientes hipótesis:

##### *Sobre el tipo de suelo*

Hipótesis Nula ( $H_0$ ): La infiltración de hidrocarburos es igual en los distintos tipos de suelo.

Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ): La infiltración de hidrocarburos es diferente en los distintos tipos de suelo.

##### *Sobre la Densidad*

Hipótesis Nula ( $H_0$ ): La velocidad de infiltración es igual en las distintas densidades del suelo.

Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ): La velocidad de infiltración es diferente en las distintas densidades del suelo.

##### *Diésel*

La Tabla 21 presenta los resultados del ANOVA bifactorial realizado sobre los valores de infiltración inicial (K) del diésel, donde se evaluó simultáneamente el efecto del tipo de suelo y de la densidad aparente en su comportamiento de infiltración.

**Tabla 13***Análisis de varianza del Diésel*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tipo de Suelo	70.5723208	5	14.1144642	1.0957694	0.40278133	2.90129454
Densidad	545.379113	3	181.793038	14.113412	0.00012189	3.2873821
Error	193.213063	15	12.8808708			
Total	809.164496	23				

Para el factor tipo de suelo, el estadístico F (1.0958) es menor que el valor crítico (2.9013) y el p-valor (0.4028) supera el nivel de significancia de 0.05. En consecuencia, no se rechaza la hipótesis nula, indicando que los distintos tipos de suelo no presentan diferencias significativas en cuanto a la infiltración inicial del diésel.

En contraste, para el factor densidad aparente, el valor de F (14.1134) excede el F crítico (3.2874) y el p-valor es extremadamente bajo ( $p < 0.001$ ), esto permite rechazar la hipótesis nula y establecer que la densidad aparente sí influye de manera determinante en la infiltración inicial del diésel.

En conjunto, los resultados revelan que la densidad del suelo es el factor determinante del comportamiento del diésel, mientras que el tipo de suelo no ejerce un efecto estadísticamente detectable bajo las condiciones experimentales evaluadas.

***Residual (R-500)***

En el apartado siguiente se incluye la Tabla 22. donde se muestran los resultados del ANOVA bifactorial aplicado a los valores de infiltración inicial (K) del Residual (R-500), evaluando simultáneamente el efecto del tipo de suelo y de la densidad aparente.

**Tabla 14***Análisis de varianza del Residual (R-500)*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tipo de Suelo	3.71110747	5	0.74222149	1.0746972	0.41294927	2.90129454
Densidad	1.00289992	3	0.33429997	0.48404856	0.6983564	3.2873821
Error	10.359497	15	0.69063313			
Total	15.0735044	23				

En el caso del Residual (R-500), ninguno de los factores evaluados muestra efectos significativos. Para el tipo de suelo, F (1.0747) es menor que el F crítico (2.9013) y el p-valor (0.4129) es superior a 0.05. por lo que no se rechaza la hipótesis nula. De igual forma, para la densidad aparente. F (0.4840) es muy inferior al valor crítico y el p-valor (0.6984) confirma la ausencia de efectos significativos.

Esto indica que el Residual (R-500) presenta una infiltración inicial muy baja y uniforme entre tratamientos, lo que refleja la influencia dominante de sus propiedades fisicoquímicas (alta viscosidad y baja movilidad).

Asimismo, la homogeneidad de los resultados respalda la validez del modelo, pues evidencia ausencia de patrones sistemáticos o sesgos atribuibles a los factores experimentales.

#### **4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Los resultados obtenidos permiten establecer diferencias claras entre el comportamiento del diésel y del residual (R-500) frente a la infiltración en suelos de distinta textura y densidad aparente.

En el caso del diésel, la densidad aparente del suelo se identificó como el factor decisivo para la infiltración, debido a su influencia directa sobre la porosidad y la conectividad de los poros. La baja viscosidad del diésel favorece una rápida infiltración inicial, haciéndolo altamente sensible a cambios estructurales del suelo. Asimismo, el tipo de suelo influyó de manera significativa, observándose mayores distancias de infiltración en suelos de textura más gruesa, lo cual concuerda con estudios experimentales que reportan migraciones del diésel del orden de 30 a 60 cm en suelos arenosos y francos bajo condiciones no saturadas, dependiendo del grado de compactación y humedad inicial (Fetter, 2001; Williams et al., 2005)

Por el contrario, en el residual (R-500) ninguno de los factores analizados mostró influencia significativa sobre la infiltración inicial. Este comportamiento es consistente con su elevada viscosidad y baja movilidad, que limitan severamente su penetración vertical incluso en suelos poco compactados. Estudios previos indican que los hidrocarburos de alta viscosidad suelen permanecer confinados en los primeros 5 a 15 cm del suelo, aun en texturas medias, mostrando una migración vertical muy limitada Hillel (1998) y Yard (2014). Esta tendencia coincide con los resultados obtenidos, donde la infiltración del R-500 fue mínima y relativamente homogénea entre tratamientos, reflejándose en la no significancia estadística del modelo.

La comparación entre ambos hidrocarburos evidencia que el diésel presenta una mayor capacidad de infiltración y un mayor riesgo de migración vertical, controlado principalmente por la densidad del suelo y la textura, mientras que el residual (R-500) tiende a permanecer en

superficie o en capas someras, mostrando escasa respuesta a variaciones estructurales del suelo. Esta diferencia implica riesgos ambientales contrastantes, ya que el diésel puede alcanzar capas más profundas y potencialmente la zona no saturada, mientras que el residual presenta una alta persistencia superficial, dificultando su remoción y degradación natural.

Desde un punto de vista aplicado, los resultados obtenidos permiten inferir que, ante un derrame de diésel, las medidas de contención deben priorizar una respuesta rápida para limitar su migración vertical, mientras que en derrames de residual (R-500) las estrategias pueden enfocarse en la recuperación superficial y confinamiento, dado su escaso avance en profundidad. La consistencia del modelo estadístico y los elevados coeficientes de determinación obtenidos respaldan la confiabilidad de los datos experimentales y refuerzan la utilidad práctica de los resultados para la gestión ambiental de derrames de hidrocarburos.

## CONCLUSIONES

- Se determinó que la infiltración del Diésel varía significativamente en función de la textura del suelo, siendo los suelos de textura gruesa (Arena y Arenos-Franco) los que presentan las mayores velocidades de flujo debido a su macroporosidad. Por el contrario, para el Residual (R-500), el tipo de suelo no resultó ser un factor estadísticamente determinante ( $P > 0.05$ ), ya que la alta viscosidad del fluido ( $>600$  cSt) gobierna la dinámica de flujo, limitando su movilidad independientemente de si el sustrato es arenoso o arcilloso.
- La densidad aparente se identificó como el factor físico más crítico para la contención de hidrocarburos. El análisis de varianza (ANOVA) confirmó que el aumento de la densidad reduce drásticamente la tasa de infiltración ( $P < 0.05$ ). Se observó un umbral de bloqueo entre  $1.30$  y  $1.70$  g/cm<sup>3</sup>; al superar esta densidad, la infiltración inicial ( $k$ ) del Diésel descendió en más del 90% en la mayoría de los suelos, mientras que para el Residual (R-500), la densidad aparente de  $1.70$  g/cm<sup>3</sup> generó una condición de impermeabilidad práctica en todos los casos evaluados, sin embargo, a  $1.80$  g/cm<sup>3</sup> se observó una ligera mejora en la infiltración, aunque sin diferencias significativas.
- El contenido de humedad inicial ejerce un efecto de barrera hidráulica significativo. El incremento de la humedad del 10% al 20% redujo la velocidad de infiltración en todos los escenarios. Este efecto fue particularmente drástico en los suelos arcillosos, donde la interacción agua-arcilla provocó el hinchamiento de las partículas y el cierre de grietas, reduciendo el parámetro de infiltración inicial ( $k$ ) en un 62% para el caso del Diésel, pasando de un comportamiento permeable (en seco) a uno restringido (en húmedo).

- El modelo empírico de Kostiakov ( $I = k t^n$ ) demostró ser adecuado para describir la dinámica de infiltración de hidrocarburos en suelos no saturados, obteniéndose coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0.90 en los escenarios de flujo activo. Los parámetros obtenidos permitieron cuantificar la diferencia de movilidad: los valores de  $k$  para el Diésel fueron, en promedio, entre 20 y 30 veces superiores a los del residual (R-500) en condiciones similares, validando matemáticamente el mayor riesgo de infiltración profunda asociado a los combustibles ligeros.



## RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación. se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a la gestión ambiental. la respuesta ante emergencias y el desarrollo de futuros estudios:

- Planes de contingencia ante derrames de hidrocarburos incorporen estrategias de restauración y remediación diferenciadas según el tipo de contaminante y las características del suelo. Los resultados de esta investigación muestran que el diésel presenta una alta capacidad de infiltración, particularmente en suelos de textura gruesa y baja densidad, lo que incrementa el riesgo de migración vertical hacia capas profundas del suelo. En este contexto, la implementación oportuna de medidas de contención (barreras físicas, remoción del suelo superficial) puede retardar significativamente la migración del contaminante y reducir el riesgo de afectación de acuíferos subterráneos, tal como se ha reportado en estudios de transporte de hidrocarburos livianos en suelos no saturados (Fetter, 2001).
- Gestión diferenciada según el tipo de hidrocarburo con base en los resultados obtenidos, se recomienda una gestión diferenciada por tipo de hidrocarburo. Para derrames de diésel en suelos arenosos, como los predominantes en regiones costeras del Perú (Lima, Ica, La Libertad, Arequipa y Piura), se sugiere priorizar la respuesta inmediata (minutos u horas), debido a su rápida infiltración inicial, favorecida por su baja viscosidad y la elevada conectividad porosa de estos suelos. Este comportamiento concuerda con estudios que señalan una alta movilidad de los hidrocarburos livianos en suelos permeables bajo condiciones no saturadas (Hillel, 1998).

- Ampliación y validación del modelo de infiltración para futuras investigaciones, se recomienda evaluar la infiltración de hidrocarburos en columnas de suelo de mayor profundidad y en intervalos de tiempo prolongados (días o semanas), con el fin de validar la aplicabilidad del modelo de Kostiakov más allá de las etapas iniciales del proceso. Asimismo, se sugiere analizar el efecto de la temperatura ambiental, dado que esta variable influye directamente en la viscosidad y volatilidad de los hidrocarburos, modificando su movilidad, especialmente en climas cálidos frente a climas fríos, tal como lo señalan estudios de física de suelos y transporte de contaminantes (Fetter, 1999; Hillel, 1998)
- Evaluación de técnicas de remediación, se recomienda evaluar la eficacia del lavado químico (ex situ) y otros métodos de remediación aplicables a suelos de textura gruesa (arenosos y francos arenosos) contaminados con diésel, considerando que la elevada infiltración observada en estos suelos favorece la distribución del contaminante en la matriz porosa. Estudios previos indican que estas técnicas pueden resultar efectivas para la remoción de hidrocarburos livianos en suelos permeables, siempre que se apliquen bajo condiciones controladas (Williams et al., 2005).

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abu-Ashour, J., & Shahalam, A. B. (2002). Water infiltration through diesel-contaminated soil. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 37(6), 1041–1049. <https://doi.org/10.1081/ESE-120004521>
- ASTM D7263-21. (2021). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens. *American Society for Testing and Material.*, 7. <https://doi.org/10.1520/D7263-21.1.2>
- ATSDR. (2002). Toxicological Profile for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). *Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, September*. [https://doi.org/10.1201/9781420061888\\_ch155](https://doi.org/10.1201/9781420061888_ch155)
- Bergueiro, J. R., Domínguez, F., & Morales, N. (1989). Conducta de algunos crudos y derivados del petróleo derramados en arena de playa de Baleares. *Bolletí de La Societat d'Història Natural de Les Balears*, 33, 279–286. <https://www.raco.cat/index.php/BolletiSHNBalears/article/download/168328/244954>
- Bowles, J. E. (1981). Manual de Laboratorio de Suelos en Ingenieria Civil. In *Foreign Affairs* (Vol. 91, Issue 5).
- Bueno Dueñas, M. (2023). *Aplicación de la Metodología de Desagregación Espacio-Temporal de estimaciones remotas de la humedad del suelo mediante técnicas de aprendizaje automático en la Sub cuenca Huatanay, Microcuenca Huanacaure, Kayra-Cusco en el periodo 2015-2022*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Caracteristicasdel.com. (2023, June 21). *Suelo componentes características esquemas*.

Patricia. [https://www.caracteristicasdel.com/suelo-componentes-caracteristicas-esquemas.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.caracteristicasdel.com/suelo-componentes-caracteristicas-esquemas.html?utm_source=chatgpt.com)

Cerqueira, R. de C. V., Carvalho, M. de F., de Sousa, R. P., Machado, S. L., & de Oliveira, I.

B. (2019). Percolação de diesel e água em solo areno siltoso não saturado: uma abordagem experimental. *Geotecnia*, 2019(147), 77–100.

<https://doi.org/10.24849/J.GEOT.2019.147.06>

Chávez Miyauchi, T. E., & Islas García, A. (2024). *Contaminación de suelos por*

*hidrocarburos en América Latina: contribuciones al conocimiento, diagnóstico y alternativas de solución*. De La Salle Ediciones.

Cherlinka, V. (2023, December 29). *Humedad Del Suelo: Métodos E Instrumentos De*

*Medición*. EOS DATA ANALYTICS. <https://eos.com/es/blog/humedad-del-suelo/>

Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrologia Aplicada*.

Cornell, J. A. (2011). *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of*

*Mixture Data*. 682.

[https://books.google.com/books/about/Experiments\\_with\\_Mixtures.html?hl=es&id=piWpe3yEAjYC](https://books.google.com/books/about/Experiments_with_Mixtures.html?hl=es&id=piWpe3yEAjYC)

El Inge. (2025, August 7). *Análisis granulométrico*. Facebook.

<https://www.facebook.com/photo.php?fbid=1162522475897153&set=a.440808301401911&id=100064182335762>

FAO. (2018). THE STORY OF MR AND MS KEO: BREAKING THE DEBT. *Food and*

*Agriculture Organization of the United Nations*.

- Fetter, C. W. (1999). Contaminant Hydrogeology, 2nd Edition. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 80(13), 143. <https://doi.org/10.1029/99eo00097>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. 20.
- Gonzales Bellido, J. (2018). Estudio De La Contaminación De Suelos Por Residuos De Hidrocarburos Y Propuesta De Manejo Ambiental De Los Talleres De Mecanica Automotriz Del Distrito De San Jerónimo-Cusco. *Universidad San Agustin de Arequipa*, 1, 1–188.  
<http://bibliotecas.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6544/CFMgobejf.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Grifoni, M., Rosellini, I., Angelini, P., Petruzzelli, G., & Pezzarossa, B. (2020). The effect of residual hydrocarbons in soil following oil spillages on the growth of Zea mays plants. *Environmental Pollution*, 265, 114950. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114950>
- Han, D., Wu, X., Li, R., Tang, X., Xiao, S., & Scholz, M. (2021). Critical Review of Electrokinetic Remediation of Contaminated Soils and Sediments: Mechanisms, Performances and Technologies. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(8).  
<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05182-4>
- Hernández Mendoza, C. E., García Ramírez, P., & Chávez Alegría, O. (2021). Geotechnical evaluation of diesel contaminated clayey soil. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14), 1–20. <https://doi.org/10.3390/app11146451>
- Hernández Sampieri, R. (2015). Metodología de la Investigación. In *Etika Jurnalisme Pada Koran Kuning : Sebuah Studi Mengenai Koran Lampu Hijau* (Vol. 16, Issue 2).

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press.

[https://books.google.com.co/books?id=tP\\_\\_y5xRd0oC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=tP__y5xRd0oC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false)

Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Science.

Kermani, M., & Ebadi, T. (2012). The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *Soil and Sediment Contamination*, 21(5), 655–671.  
<https://doi.org/10.1080/15320383.2012.672486>

Lanly, J. P. (1996). *Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas*. Estudio FAO Montes 131. <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s04.htm#TopOfPage>

Ley General Del Ambiente - Ley N° 28611 (2005).

[http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\\_SISTEM\\_PEMBETU\\_NGAN\\_TERPUSAT\\_STRATEGI\\_MELESTARI](http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETU_NGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI)

Ma, Y. fei, Li, Y. xia, Anderson, S. H., Zheng, X. lai, Feng, X. dong, & Gao, P. ling. (2016). Diesel oil infiltration in soils with selected antecedent water content and bulk density. In *Journal of Central South University* (Vol. 23, Issue 8, pp. 1924–1930).  
<https://doi.org/10.1007/s11771-016-3248-0>

MBGS. (2025). *¿Cómo se clasifica el diésel?* | MBGS. [https://www.mbgs.es/como-se-clasifica-el-diesel/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mbgs.es/como-se-clasifica-el-diesel/?utm_source=chatgpt.com)

McMurry, J. (2008). Química orgánica, 7a. edición. In *CENCAGE Learning*.

- Mercer, J. W., & Cohen, R. M. (1990). A Review Paper of Immiscible Fluid in the Subsurface: Properties, models, characterization and remediation. In *Journal of Contaminant Hydrology* (Vol. 6).
- MINAM. (2007). *Ley N° 29134 Ley que regula los pasivos ambientales del Subsector Hidrocarburos*. 470882–470887.
- MINAM. (2015). Guía para la Elaboración de Estudios de Evaluación de Riesgos a la Salud y el Ambiente (ERSA) en Sitios Contaminados. *Ministerio Del Ambiente*.
- Montanarella, L., Badraoui, M., Chude, Vi., Dos Santos, I., Mamo, T., Yemefack, M., Aulang, M., Yagi, K., Hong, S. Y., Vijarnsorn, P., Zhang, G. L., Arrouays, D., Black, H., Krasilnikov, P., Sobocá, J., Alegre, J., Henriquez, C. R., Mendonça Santos, M. de L., Taboada, M., ... Panah, S. K. A. (2015). Status of the World's Soil Resources. In *Intergovernmental Technical Panel on Soils*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>
- MYCAL. (2022, April 13). *Tipos de textura de suelos* . <https://mycal.com.pe/tipos-de-textura-de-suelos/>
- Narváez Aranda, R. A. (2016). Modelamiento y simulación espacial de la conductividad hidráulica por contaminación de hidrocarburos en suelos de Trujillo mediante método directo. *Pueblo Continente*, 27, 61–72.
- OSINERGMIN. (2025). *DEMANDA TOTAL DE DIESEL POR DEPARTAMENTO Unidad: Miles Barriles/Día*. Documentos SCOP.
- Petroperú. (2019a). *Ficha de Datos de Seguridad*. <http://www.petroperu.com.pe>
- Petroperú. (2019b). *Ficha de Datos de Seguridad | Petróleo Industrial N°500*. <http://www.petroperu.com.pe>

RawData. (2024, March 5). *Características y Manejo de los Suelos Francos en la Agricultura Sostenible* . Agricultura General. <https://agrawdata.com/blog/suelos-francos/>

Ray R. Weil, & Nyle C. Brady. (2017). *The NaTure aNd ProPerTies of soils*.

Repsol. (2025). *¿Qué es el diésel y qué propiedades tiene?* | Repsol.

[https://www.repsol.es/particulares/faqs/carburantes/que-es-el-diesel-y-que-propiedades-tiene/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.repsol.es/particulares/faqs/carburantes/que-es-el-diesel-y-que-propiedades-tiene/?utm_source=chatgpt.com)

Riazi, M. R. (2021). *Oil Spill Occurrence, Simulation, and Behavior*. Taylor & Francis Group, LLC. [https://www.routledge.com/Oil-Spill-Occurrence-Simulation-and-Behavior/Riazi/p/book/9780367742560?srsId=AfmBOoq0DCeWIB4GT6KY\\_v4PRattj5EuExdjQFQLLVbDBU4fJ3VkIIon&utm\\_source=chatgpt.com](https://www.routledge.com/Oil-Spill-Occurrence-Simulation-and-Behavior/Riazi/p/book/9780367742560?srsId=AfmBOoq0DCeWIB4GT6KY_v4PRattj5EuExdjQFQLLVbDBU4fJ3VkIIon&utm_source=chatgpt.com)

Soil Science Society of America. (2014). *Triángulo de Textura del Suelo*. Soils 4 Teachers. <https://www.soils4teachers.org/files/s4t/spanish/soil-texture-triangle-triangulo-de-textura-del-suelo.pdf>

Speight, J. G. (2002). *Handbook of Petroleum Product Analysis* (First Edition). Wiley-Interscience. [https://www.academia.edu/download/38749410/handbook\\_of\\_petroileum\\_product\\_analy sis\\_by\\_james\\_speight.pdf](https://www.academia.edu/download/38749410/handbook_of_petroileum_product_analy sis_by_james_speight.pdf)

StudySmarter. (2024, August 13). *Densidad Del Suelo: Método & Fórmulas* . [https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-agricola/densidad-del-suelo/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-agricola/densidad-del-suelo/?utm_source=chatgpt.com)

Suthersan, S. S. G. (1999). Remediation Engineering : Design Concept. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). Lewis Publishers.

*Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. (2007). <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07>



*Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)).* (2021). <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>

*Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.* (2019). <https://doi.org/10.1520/D2216-19>

Universidad Nacional de la Plata. (2017). *El suelo: un universo invisible*.

Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15Th Editi). Pearson Education.

Williams, S. D., Ladd, D. E., & Farmer, J. J. (2005). *Fate and Transport of Petroleum Hydrocarbons in Soil and Ground Water at Big South Fork National River and Recreation Area, Tennessee and Kentucky, 2002-2003*.

Yard, O. (2014). *FATE OF MARINE OIL SPILLS*. 55.

Zapata, R. (2018). Tipos de suelos: Caracterización de suelos arcillosos y limosos. *Geología y Geotecnia*. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32225836/Permeabilidad\\_en\\_Suelos-libre.pdf?1391522831=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_DE\\_ROSARIO\\_FACULTAD.pdf&Expires=1677848434&Signature=FqnTQyj7JRmVHpuavzq41So91gvrHdVpsu06hJ](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32225836/Permeabilidad_en_Suelos-libre.pdf?1391522831=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUNIVERSIDAD_NACIONAL_DE_ROSARIO_FACULTAD.pdf&Expires=1677848434&Signature=FqnTQyj7JRmVHpuavzq41So91gvrHdVpsu06hJ)

## APÉNDICE

### Apéndice 1

*Clasificación textural de los 21 tipos de suelo evaluados*

Nº	Suelos	Arcilla (a)	Arena (A)	Limo (L)
1	Arcilla	100%		
2	Arcilla	80%	20%	
3	Arcilla	60%	40%	
4	Arcilla	80%		20%
5	Arcilla	60%	20%	20%
6	Arcillo arenoso	40%	60%	
7	Arcillo limoso	60%		40%
8	Arcillo limoso	40%	20%	40%
9	Franco arcillo-arenoso	20%	60%	20%
10	Franco arcilloso	40%	40%	20%
11	Franco arcillo-limoso	40%		60%
12	Arena		100%	
13	Areno franco		80%	20%
14	Franco arenoso	20%	80%	
15	Franco arenoso		60%	40%
16	Franco	20%	40%	40%
17	Franco limoso		40%	60%
18	Franco limoso	20%		80%
19	Franco limoso	20%	20%	60%
20	Limo		20%	80%
21	Limo			100%

*Nota.* La tabla presenta la proporción de arena, arcilla y limo correspondiente a los 21 tipos de suelo considerados en el estudio.

## Apéndice 2

*Resultados experimentales de la infiltración de diésel a 10 % de humedad (1.20 g/cm<sup>3</sup>)*

DATOS									RESULTADOS			
Nº S	TIPO DE SUELO	ALTURA (cm)	HUMEDAD (%)	MASA HÚMEDA (g)	VOLÚMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HIDROCARBURO	%C	MASA HC. (g)	DISTANCIA (cm)	TIEMPO (min)	OBSERVACIONES
1	Arcilla	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	55	323	OK
2	Arcilla	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	55	8345	OK
3	Arcilla	50	0.1	9236	7696.9	1.20	Diésel	5%	462	50	23	OK
4	Arcilla	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	35	178	Se detuvo en 35 cm
5	Arcilla	50	0.1	9236	7696.9	1.20	Diésel	5%	462	55	16	OK
6	Arcillo arenoso	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	55		OK
7	Arcillo limoso	50	0.1	9236	7696.9	1.20	Diésel	5%	462	50	53	OK
8	Arcillo limoso	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	20	348	Se detuvo en 20 cm
9	Franco arcillo-arenoso	50	0.1	9236	7696.9	1.20	Diésel	5%	462	50	10	OK
10	Franco arcilloso	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	55		OK
11	Franco arcillo-limoso	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	27	4320	Se detuvo en 27 cm
12	Arena	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	55	285	OK
13	Areno franco	50	0.1	9236	7696.9	1.20	Diésel	5%	462	50	10	OK
14	Franco arenoso	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	50		OK
15	Franco arenoso	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	55	39	OK
16	Franco	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	55	55	OK
17	Franco limoso	50	0.1	9236	7696.9	1.20	Diésel	5%	462	50	106	OK
18	Franco limoso	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	43	2698	Se detuvo en 43 cm
19	Franco limoso	50	0.1	9236	7696.9	1.20	Diésel	5%	462	50	142	OK
20	Limo	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	43		Se detuvo en 43 cm
21	Limo	55	0.1	10160	8466.59	1.20	Diésel	5%	508	30	1440	Se detuvo en 30 cm

### Apéndice 3

*Resultados experimentales de la infiltración de diésel a 10 % de humedad (1.30 g/cm<sup>3</sup>)*

DATOS									RESULTADOS			
Nº S	TIPO DE SUELO	ALTURA (cm)	HUMEDAD (%)	MASA HÚMEDA (g)	VOLÚMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HIDROCARBURO	%C	MASA HC. (g)	DISTANCIA (cm)	TIEMPO (min)	OBSERVACIONES
1	Arcilla	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	55		OK
2	Arcilla	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	55		OK
3	Arcilla	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	46		Se detuvo en 46 cm
4	Arcilla	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50		OK
5	Arcilla	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	47	1254	Se detuvo en 47 cm
6	Arcillo arenoso	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	43		Se detuvo en 43 cm
7	Arcillo limoso	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	55	360	OK
8	Arcillo limoso	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50		OK
9	Franco arcillo- arenoso	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	55		OK
10	Franco arcilloso	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50		OK
11	Franco arcillo- limoso	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50	269	OK
12	Arena	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50		OK
13	Areno franco	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	55	43	OK
14	Franco arenoso	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	55	209	OK
15	Franco arenoso	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50	15	OK
16	Franco	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50		OK
17	Franco limoso	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	42	2943	Se detuvo en 42 cm
18	Franco limoso	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50		OK
19	Franco limoso	55	10%	11007	8466.59	1.3001	Diésel	5%	550	45	2668	Se detuvo en 45 cm
20	Limo	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50		OK
21	Limo	50	10%	10006	7696.9	1.3000	Diésel	5%	500	50		OK

## Apéndice 4

*Resultados experimentales de la infiltración de diésel a 20 % de humedad (1.70 g/cm<sup>3</sup>)*

DATOS									RESULTADOS			
Nº S	TIPO DE SUELO	ALTURA (cm)	HUMEDAD (%)	MASA HÚMEDA (g)	VOLÚMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HIDROCARBURO	%C	MASA HC. (g)	DISTANCIA (cm)	TIEMPO (min)	OBSERVACIONES
1	Arcilla	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	24	19080	Se detuvo en 24 cm
2	Arcilla	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	18		Se detuvo en 18 cm
3	Arcilla	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	4		Se detuvo en 4 cm
4	Arcilla	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	6	2880	Se detuvo en 6 cm
5	Arcilla	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	0	0	No infiltra
6	Arcillo arenoso	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	50		OK
7	Arcillo limoso	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	55	1325	OK
8	Arcillo limoso	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	0		No infiltra
9	Franco arcillo-arenoso	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	50	2880	OK
10	Franco arcilloso	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	0		No infiltra
11	Franco arcillo-limoso	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	14	49	Se detuvo en 14 cm
12	Arena	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	50		OK
13	Areno franco	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	55	1440	OK
14	Franco arenoso	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	50		OK
15	Franco arenoso	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	2	4320	Se detuvo en 2 cm
16	Franco	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	1	1440	OK
17	Franco limoso	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	55	3180	OK
18	Franco limoso	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	25		Se detuvo en 25 cm
19	Franco limoso	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	0	0	No infiltra
20	Limo	55	20%	14393	8466.59	1.7000	Diésel	5%	719.65	55		OK
21	Limo	50	20%	13085	7696.9	1.7000	Diésel	5%	654.25	50	12	OK

## Apéndice 5

*Resultados experimentales de la infiltración de diésel a 20 % de humedad (1.80 g/cm<sup>3</sup>)*

DATOS									RESULTADOS			
Nº S	TIPO DE SUELO	ALTURA (cm)	HUMEDAD (%)	MASA HÚMEDA (g)	VOLÚMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HIDROCARBURO	%C	MASA HC. (g)	DISTANCIA (cm)	TIEMPO (min)	OBSERVACIONES
1	Arcilla	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	0	0	No infiltra
2	Arcilla	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	55	4195	OK
3	Arcilla	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	0	0	No infiltra
4	Arcilla	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	50		OK
5	Arcilla	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	5	10080	Se detuvo en 5 cm
6	Arcillo arenoso	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	55		OK
7	Arcillo limoso	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	50	1440	OK
8	Arcillo limoso	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	7	1242	Se detuvo en 7 cm
9	Franco arcillo-arenoso	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	55		OK
10	Franco arcilloso	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	0		No infiltra
11	Franco arcillo-limoso	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	0	0	No infiltra
12	Arena	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	55	97	OK
13	Areno franco	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	50	5760	OK
14	Franco arenoso	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	55		OK
15	Franco arenoso	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	50	10080	OK
16	Franco	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	50		OK
17	Franco limoso	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	50	2880	OK
18	Franco limoso	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	55	3601	OK
19	Franco limoso	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	2	2880	Se detuvo en 2 cm
20	Limo	50	20%	13854	7696.9	1.7999	Diésel	5%	692.70	50		OK
21	Limo	55	20%	15240	8466.59	1.8000	Diésel	5%	762.00	55	5880	OK

*Nota.* Las tablas presentadas muestran los valores completos obtenidos en los ensayos de infiltración con diésel al 5%. considerando variaciones de tipo de suelo. altura inicial. humedad y densidad.

## Apéndice 6

*Resultados experimentales de la infiltración de residual (R-500) a 10 % de humedad (1.20 g/cm<sup>3</sup>)*

DATOS									RESULTADOS			
Nº S	TIPO DE SUELO	ALTURA (cm)	HUMEDAD (%)	MASA HÚMEDA (g)	VOLÚMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HIDROCARBURO	%C	MASA HC. (g)	DISTANCIA (cm)	TIEMPO (horas)	OBSERVACIONES
1	Arcilla	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	0	0	No infiltra
2	Arcilla	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	3	265	Se detuvo en 3 cm
3	Arcilla	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	3	10	No infiltra
4	Arcilla	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	3	310	Se detuvo en 3 cm
5	Arcilla	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	0	0	No infiltra
6	Arcillo arenoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	30	647	OK
7	Arcillo limoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	0	0	No infiltra
8	Arcillo limoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	4	254	Se detuvo en 4 cm
9	Franco arcillo-arenoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	7	163	Se detuvo en 7 cm
10	Franco arcilloso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	9	172	Se detuvo en 9 cm
11	Franco arcillo-limoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	10	184	Se detuvo en 10 cm
12	Arena	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	7	120	Se detuvo en 7 cm
13	Areno franco	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	1	154	Se detuvo en 1 cm
14	Franco arenoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	8	254	Se detuvo en 8 cm
15	Franco arenoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	10	186	Se detuvo en 10 cm
16	Franco	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	3	645	Se detuvo en 3 cm
17	Franco limoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	10	210	Se detuvo en 10 cm
18	Franco limoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	1	254	Se detuvo en 1 cm
19	Franco limoso	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	20	211	Se detuvo en 20 cm
20	Limo	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	1	254	Se detuvo en 1 cm
21	Limo	20	10%	3695	3078.76	1.2002	Residual R-500	5%	184.75	1	254	Se detuvo en 1 cm

## Apéndice 7

*Resultados experimentales de la infiltración de residual (R-500) a 10 % de humedad (1.30 g/cm<sup>3</sup>)*

DATOS									RESULTADOS			
Nº S	TIPO DE SUELO	ALTURA (cm)	HUMEDAD (%)	MASA HÚMEDA (g)	VOLÚMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HIDROCARBURO	%C	MASA HC. (g)	DISTANCIA (cm)	TIEMPO (horas)	OBSERVACIONES
1	Arcilla	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	7	453	Se detuvo en 7 cm
2	Arcilla	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	4	254	Se detuvo en 4 cm
3	Arcilla	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	3	452	Se detuvo en 3 cm
4	Arcilla	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	2	298	Se detuvo en 2 cm
5	Arcilla	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	0	0	No infiltra
6	Arcillo arenoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	0	0	No infiltra
7	Arcillo limoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	15	96	Se detuvo en 15 cm
8	Arcillo limoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	7	172	Se detuvo en 7 cm
9	Franco arcillo-arenoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	11	300	Se detuvo en 11 cm
10	Franco arcilloso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	15	592	Se detuvo en 15 cm
11	Franco arcillo-limoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	0	0	No infiltra
12	Arena	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	7	172	Se detuvo en 7 cm
13	Areno franco	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	9	96	Se detuvo en 9 cm
14	Franco arenoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	10	172	Se detuvo en 10 cm
15	Franco arenoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	15	211	Se detuvo en 15 cm
16	Franco	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	7	168	Se detuvo en 7 cm
17	Franco limoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	2	36	Se detuvo en 2 cm
18	Franco limoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	3	168	Se detuvo en 3 cm
19	Franco limoso	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	5	34	Se detuvo en 5 cm
20	Limo	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	5	168	Se detuvo en 5 cm
21	Limo	20	10%	4003	3078.76	1.3002	Residual R-500	5%	200.15	8	234	Se detuvo en 8 cm



## Apéndice 8

*Resultados experimentales de la infiltración de residual (R-500) a 20 % de humedad (1.70 g/cm<sup>3</sup>)*

DATOS									RESULTADOS			
Nº S	TIPO DE SUELO	ALTURA (cm)	HUMEDAD (%)	MASA HÚMEDA (g)	VOLÚMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HIDROCARBURO	%C	MASA HC. (g)	DISTANCIA (cm)	TIEMPO (horas)	OBSERVACIONES
1	Arcilla	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	3	24	Se detuvo en 3 cm
2	Arcilla	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	17	456	Se detuvo en 17 cm
3	Arcilla	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	359	OK
4	Arcilla	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	0	0	No infiltra
5	Arcilla	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	3	213	Se detuvo en 3 cm
6	Arcillo arenoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	164	OK
7	Arcillo limoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	9	189	Se detuvo en 9 cm
8	Arcillo limoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	169	OK
9	Franco arcillo-arenoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	362	OK
10	Franco arcilloso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	646	OK
11	Franco arcillo-limoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	12	184	Se detuvo en 12 cm
12	Arena	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	8	168	Se detuvo en 8 cm
13	Areno franco	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	10	188	Se detuvo en 10 cm
14	Franco arenoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	121	OK
15	Franco arenoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	60	OK
16	Franco	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	286	OK
17	Franco limoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	0	0	No infiltra
18	Franco limoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	19	311	Se detuvo en 19 cm
19	Franco limoso	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	67	OK
20	Limo	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	30	285	OK
21	Limo	20	20%	5234	3078.76	1.7000	Residual R-500	5%	261.70	25	318	Se detuvo en 25 cm

## Apéndice 9

*Resultados experimentales de la infiltración de residual (R-500) a 20 % de humedad (1.80 g/cm<sup>3</sup>)*

DATOS									RESULTADOS			
Nº S	TIPO DE SUELO	ALTURA (cm)	HUMEDAD (%)	MASA HÚMEDA (g)	VOLÚMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HIDROCARBURO	%C	MASA HC. (g)	DISTANCIA (cm)	TIEMPO (horas)	OBSERVACIONES
1	Arcilla	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	9	453	Se detuvo en 9 cm
2	Arcilla	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	12	311	Se detuvo en 12 cm
3	Arcilla	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	30	453	OK
4	Arcilla	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	5	456	Se detuvo en 5 cm
5	Arcilla	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	2	24	Se detuvo en 2 cm
6	Arcillo arenoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	10	265	Se detuvo en 10 cm
7	Arcillo limoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	22	82	Se detuvo en 22 cm
8	Arcillo limoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	30	645	OK
9	Franco arcillo-arenoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	30	453	OK
10	Franco arcilloso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	30	203	OK
11	Franco arcillo-limoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	30	463	OK
12	Arena	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	3	121	Se detuvo en 3 cm
13	Areno franco	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	30	110	OK
14	Franco arenoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	1	45	Se detuvo en 1 cm
15	Franco arenoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	0	0	No infiltra
16	Franco	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	30	105	OK
17	Franco limoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	30	50	OK
18	Franco limoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	4	341	Se detuvo en 4 cm
19	Franco limoso	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	8	160	Se detuvo en 8 cm
20	Limo	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	27	341	Se detuvo en 27 cm
21	Limo	20	20%	5543	3078.76	1.8004	Residual R-500	5%	277.15	27	150	Se detuvo en 27 cm

*Nota.* Las tablas presentadas muestran los valores completos obtenidos en los ensayos de infiltración con diésel al 5%. considerando variaciones de tipo de suelo, altura inicial, humedad y densidad.

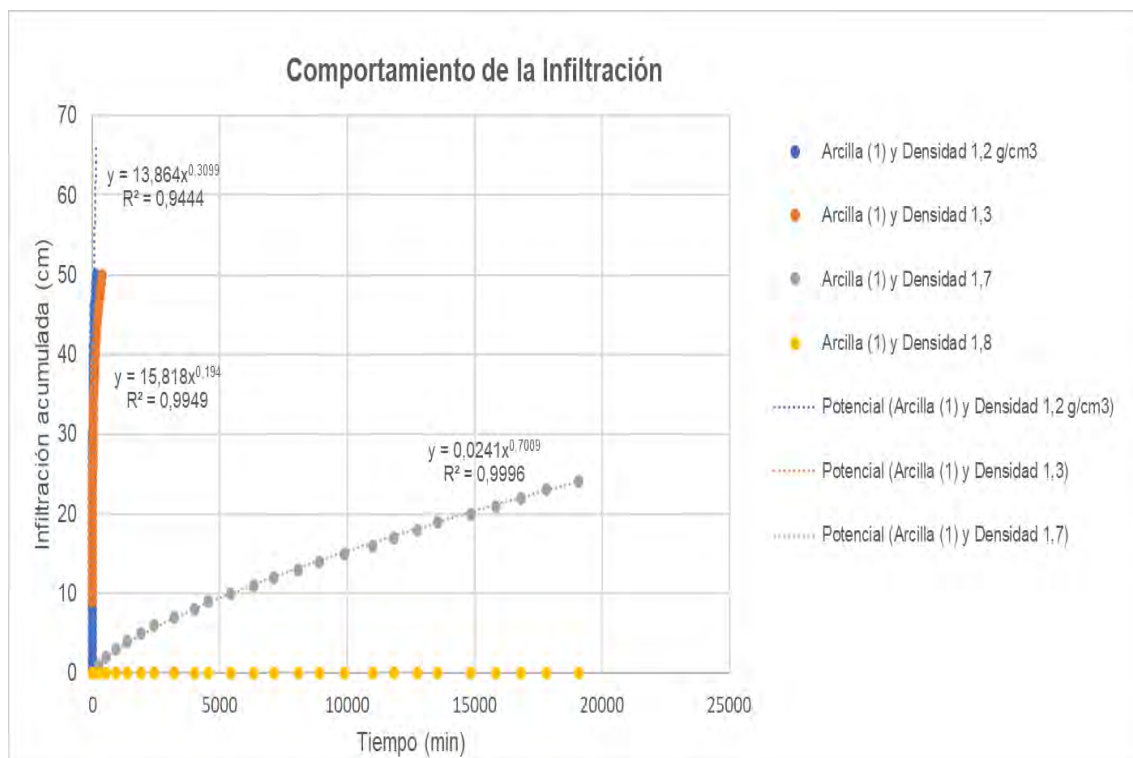
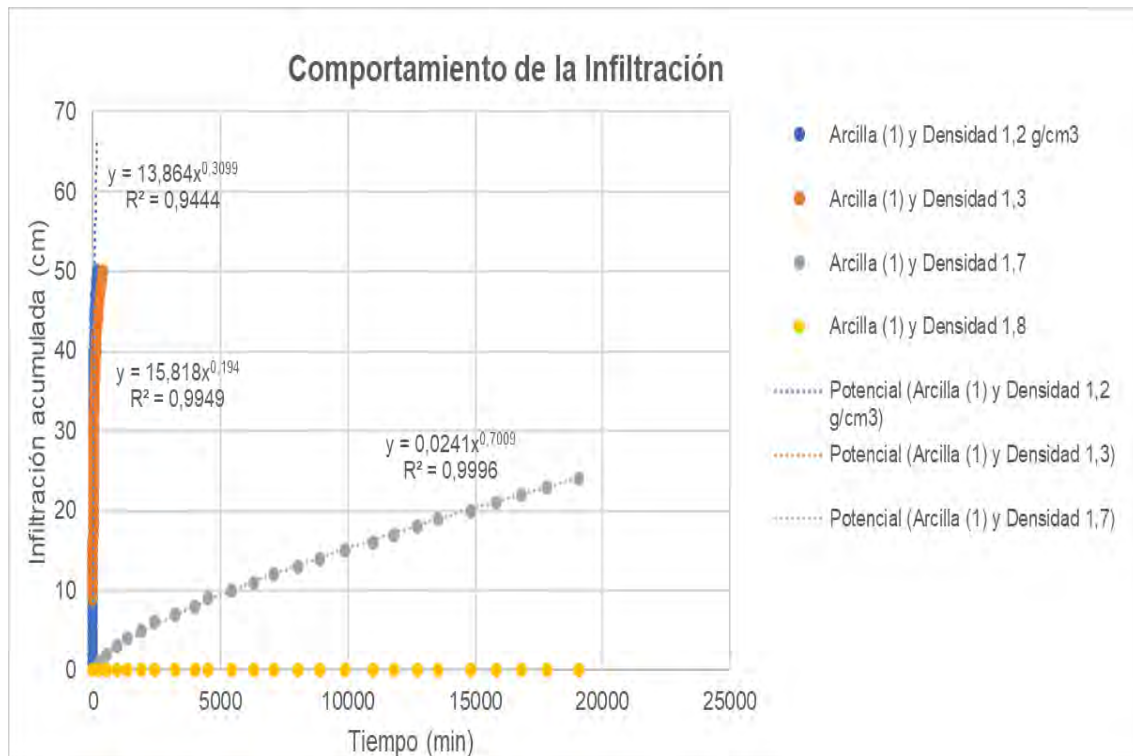
## Apéndice 10

### Operacionalización de variables

Variable	Tipo de Variable	Definición conceptual	Operacionalización	Categorías o dimensiones	Indicador	Nivel de medición	Unidad de medida
Tipo de suelo	Independiente	El suelo es la porción más superficial de la corteza terrestre. constituida por residuos de roca y materia orgánica. y se clasifica según su textura en arena. limo y arcilla (Weil & Brady, 2017).	Clasificación del tipo de suelo en función de su textura mediante análisis granulométrico.	Textura del suelo	Porcentaje de fracción textural (arena. limo. arcilla).	Nominal	-
Porcentaje de humedad	Independiente	La humedad del suelo es la cantidad total de agua presente en los poros del suelo. expresada como porcentaje del volumen total (Cherlinka, 2023).	Medición del contenido de agua en el suelo.	Contenido de agua en el suelo (10% - 20%)	Porcentaje de humedad del suelo	Razón	%
Tipo de hidrocarburo	Independiente	Un hidrocarburo es un compuesto orgánico cuya estructura molecular está formada exclusivamente por átomos de carbono (C) e hidrógeno (H) unidos mediante enlaces covalentes (Speight, 2002).	Tipos de hidrocarburos utilizados en la experimentación. siendo el diésel y residual R-500.	Clasificación de hidrocarburo (Diésel - Residual 500)	Tipo de hidrocarburo presente en la experimentación.	Nominal	-
Densidad del suelo	Independiente	La densidad del suelo es una medida que refleja la compactación de las partículas que lo componen. afectando su capacidad para retener agua y nutrientes. Se determina como la masa del suelo dividida por su volumen (StudySmarter. 2024).	Determinación de la densidad del suelo mediante métodos numéricos.	Densidad del suelo (compactación)	Densidad aparente del suelo	Razón	g/cm <sup>3</sup>
Infiltración del diésel y residual (R-500)	Dependiente	La infiltración se define como la capacidad inherente de cada tipo de suelo para permitir el movimiento descendente del agua a través de los espacios porosos existentes entre sus partículas (Hillel, 1998).	Medición de la infiltración de hidrocarburos en los suelos utilizados. realizando pruebas de campo y análisis de laboratorio.	Velocidad de infiltración.	Distancia de hidrocarburo infiltrado por unidad de tiempo.	Razón	mm/h

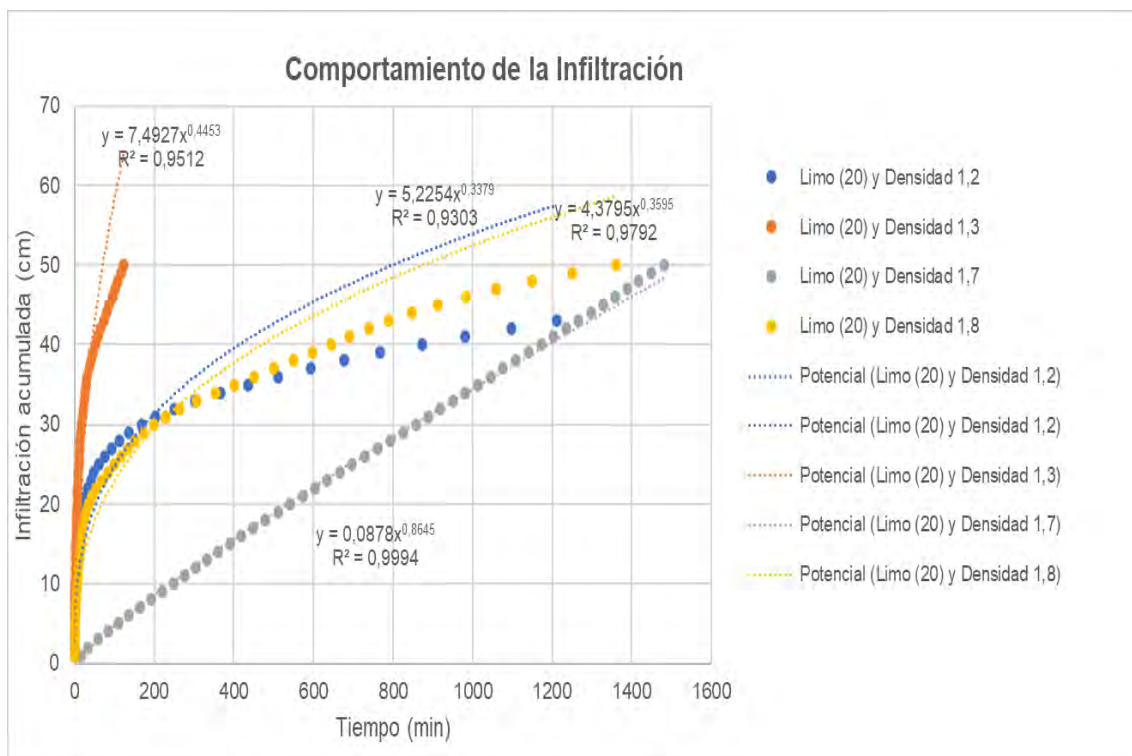
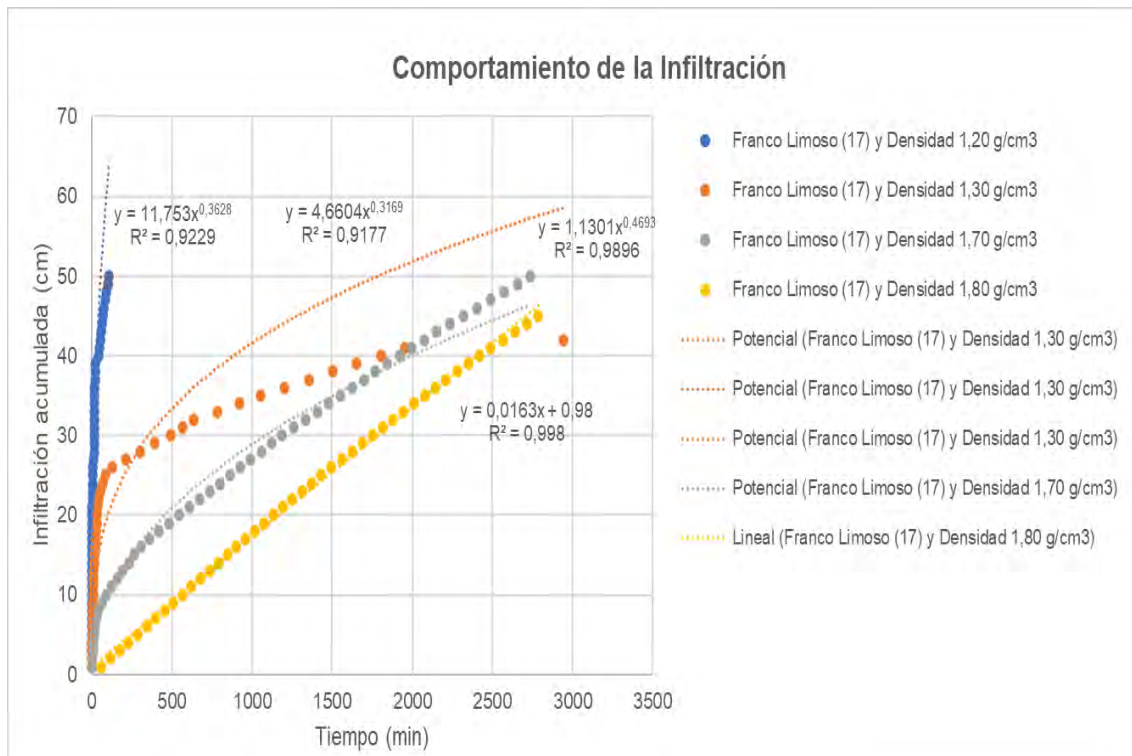
## Apéndice 11

### Comportamiento de Infiltración Baja en Diésel



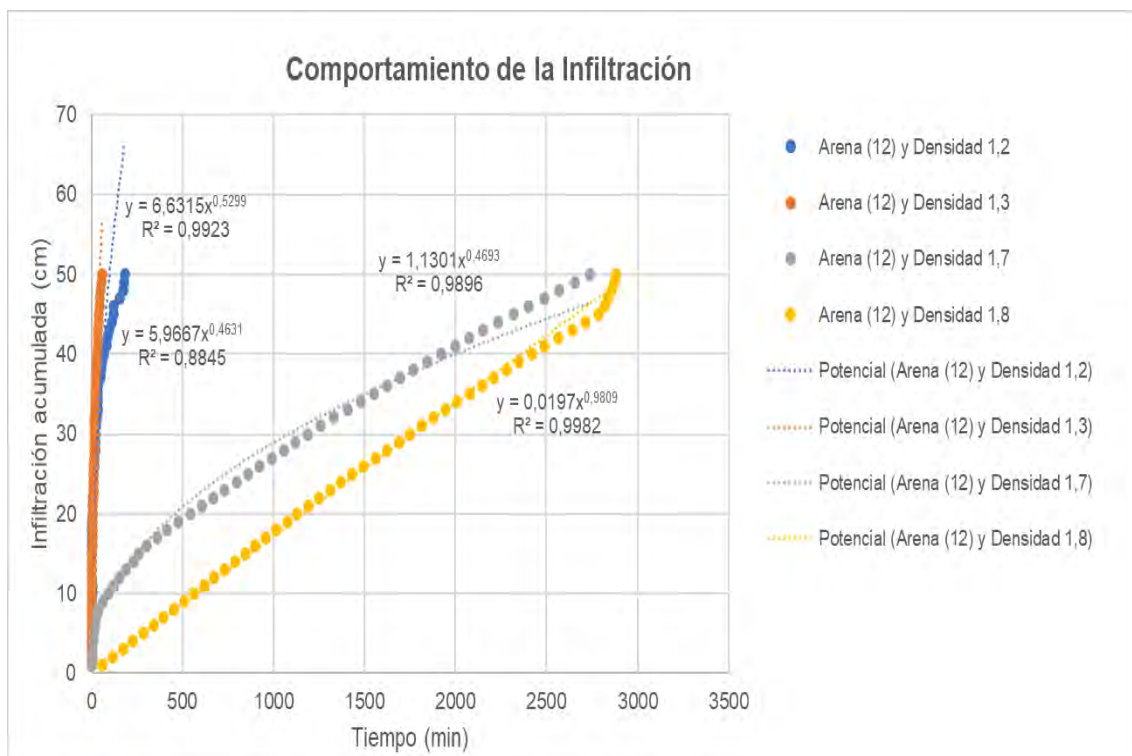
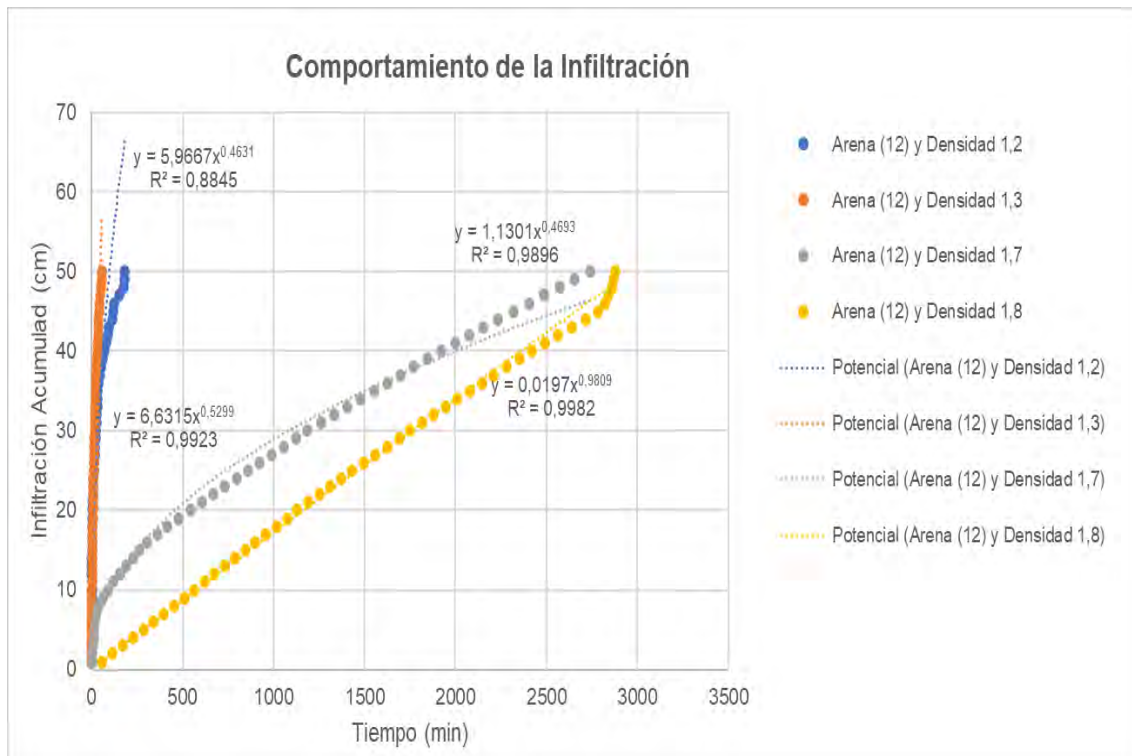
## Apéndice 12

### Comportamiento de Infiltración Intermedia en Diésel



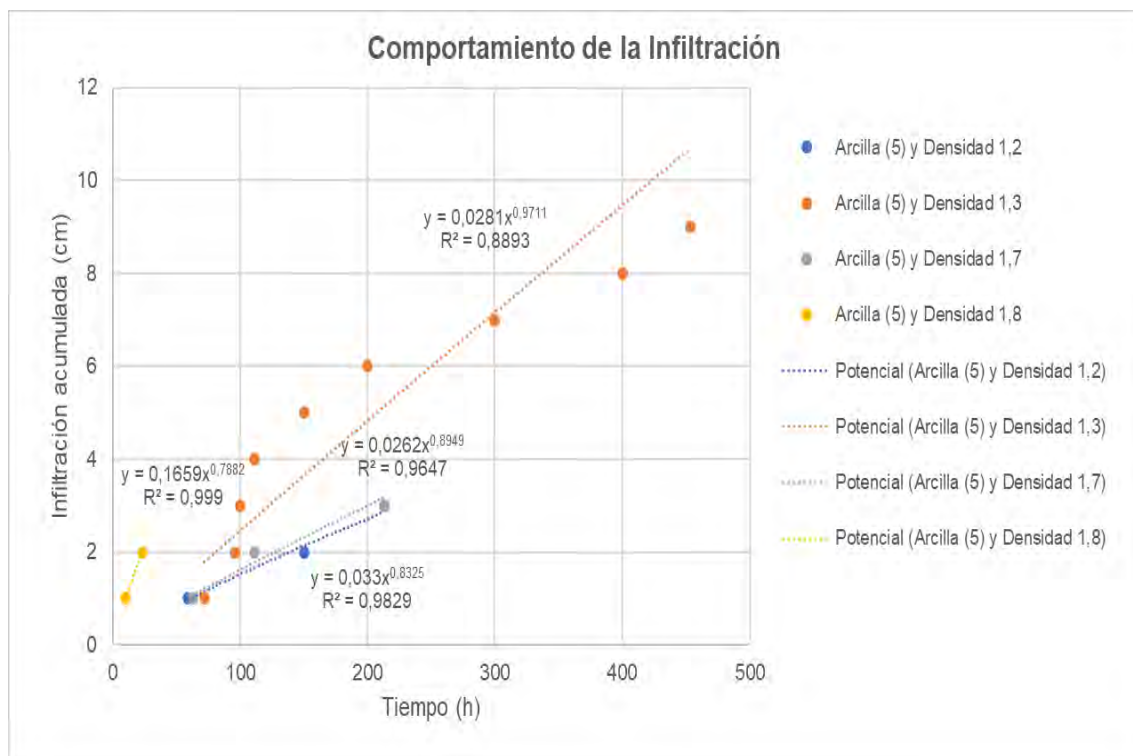
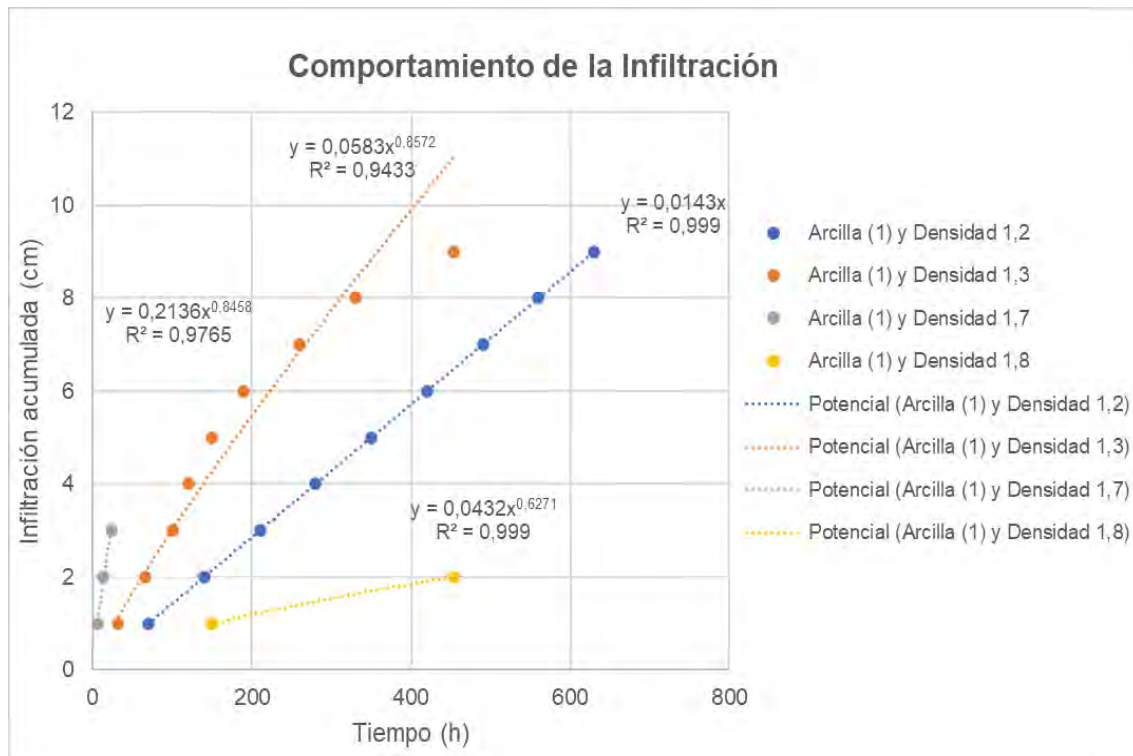
## Apéndice 13

### Comportamiento de Infiltración Alta en Diésel



## Apéndice 14

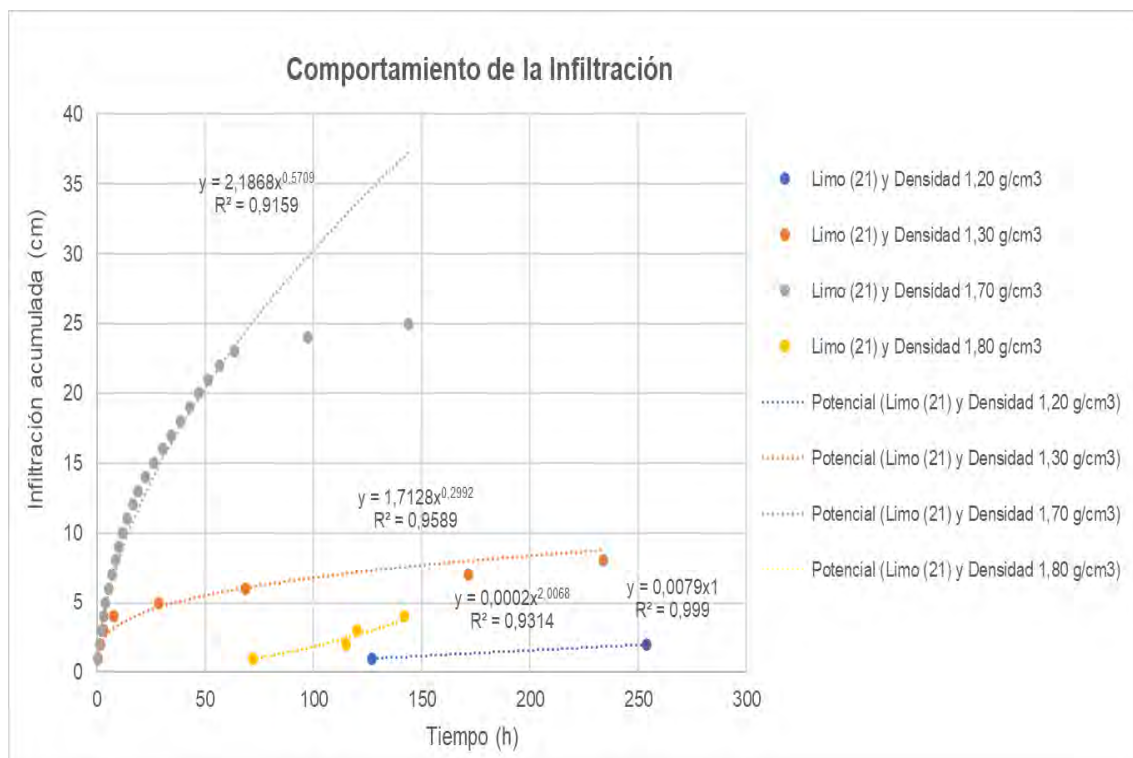
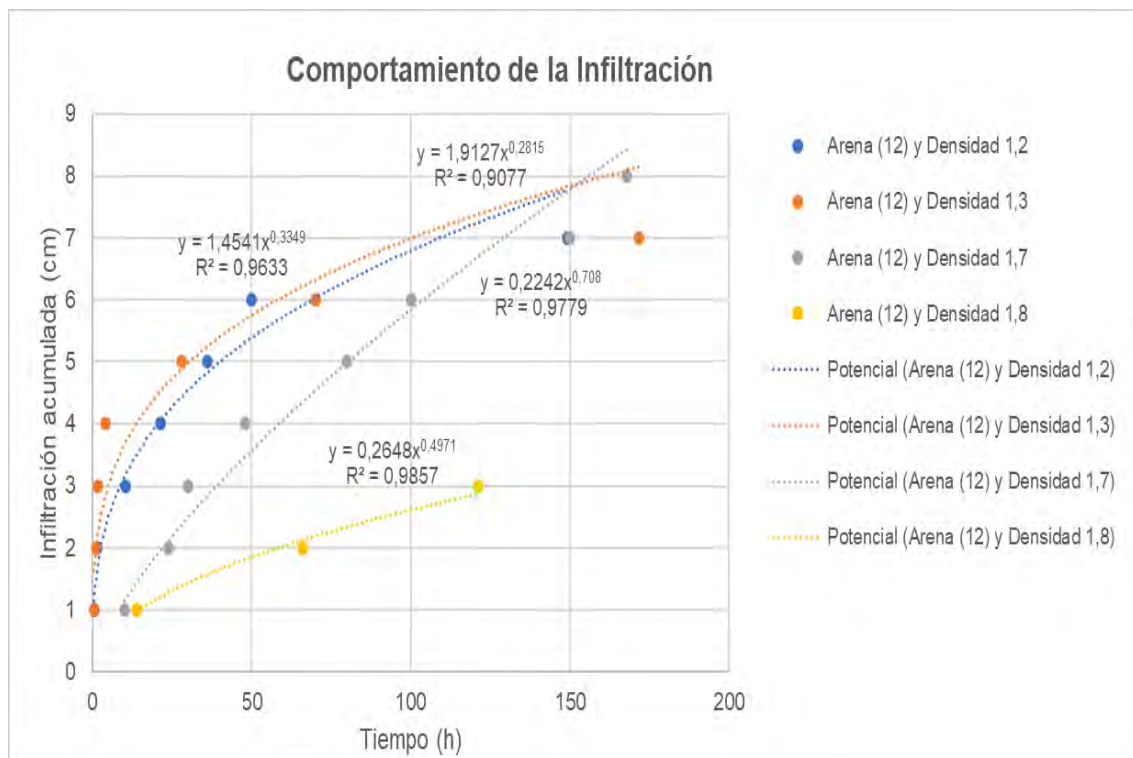
### Comportamiento de Infiltración Baja en Residual (R-500)





## Apéndice 15

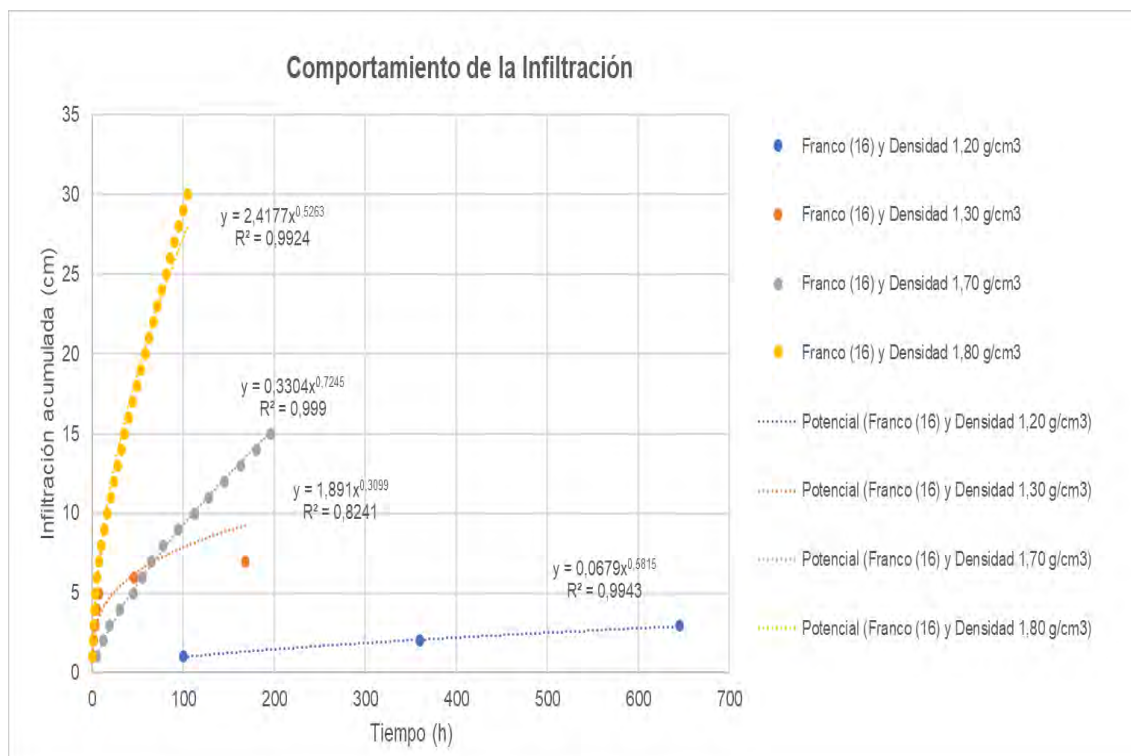
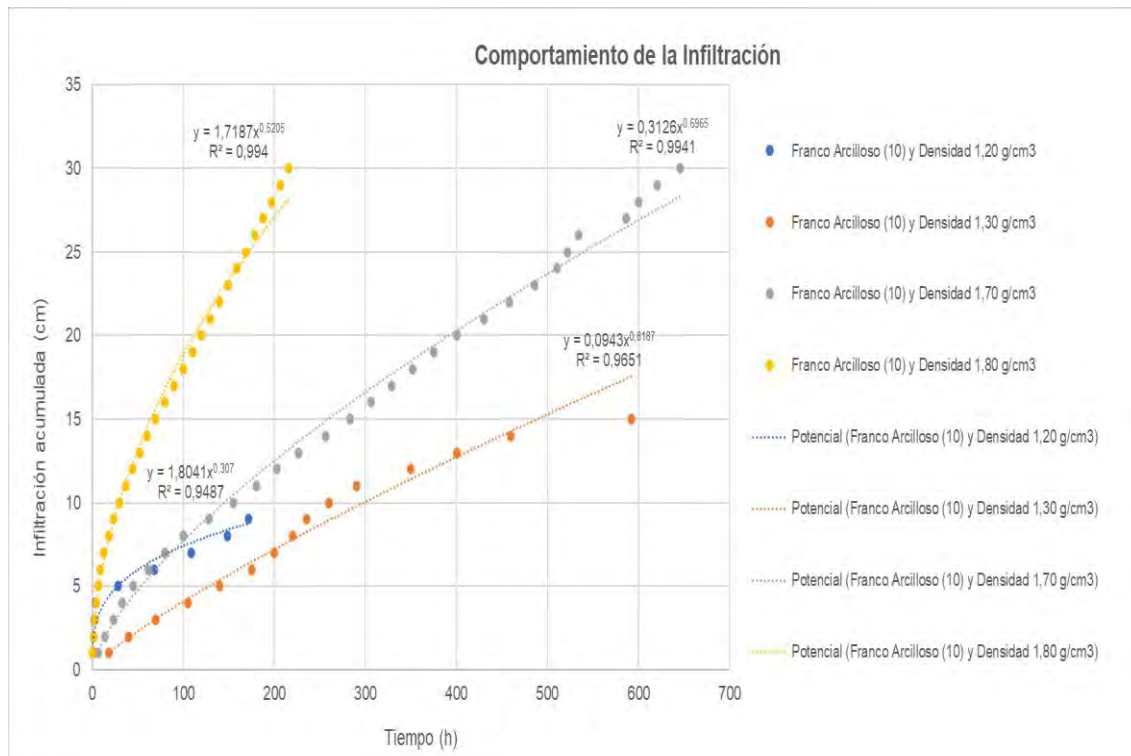
### Comportamiento de Infiltración Intermedia en Residual (R-500)





## Apéndice 16

### Comportamiento de Infiltración Alta en residual (R-500)



## Apéndice 17

*Desviación Estándar Muestral para réplicas de Diésel a diferentes densidades*

Nº S	TIPO DE SUELO	ARCILLA	ARENA	LIMO	DESVIACIÓN ESTANDAR			
					1.20	1.30	1.70	1.80
					g/cm3	g/cm3	g/cm3	g/cm3
1	Arcilla	1.00	0.00	0.00	0.05567	0.0455	0.0004	0.0000
2	Arcilla	0.80	0.20	0.00	0.01538	0.0061	0.0316	0.0003
3	Arcilla	0.60	0.40	0.00	0.01275	0.0294	0.0001	0.0000
4	Arcilla	0.80	0.00	0.20	0.05508	0.0059	0.0007	0.0001
5	Arcilla	0.60	0.20	0.20	0.05630	0.0359	0.0001	0.0034
6	Arcillo arenoso	0.40	0.60	0.00	0.03911	0.0425	0.0014	0.0366
7	Arcillo limoso	0.60	0.00	0.40	0.04850	0.0343	0.0001	0.0000
8	Arcillo limoso	0.40	0.20	0.40	0.04285	0.0429	0.0000	0.2082
9	Franco arcillo-arenoso	0.20	0.60	0.20	0.04251	0.0380	0.0317	0.0014
10	Franco arcilloso	0.40	0.40	0.20	0.04153	0.0353	0.0000	0.0000
11	Franco arcillo-limoso	0.40	0.00	0.60	0.04266	0.0333	0.0004	0.0000
12	Arena	0.00	1.00	0.00	0.03702	0.0390	0.0019	0.0136
13	Areno franco	0.00	0.80	0.20	0.05901	0.0395	0.0007	0.0014
14	Franco arenoso	0.20	0.80	0.00	0.03550	0.0382	0.0381	0.0326
15	Franco arenoso	0.00	0.60	0.40	0.04150	0.0342	0.0127	0.0000
16	Franco	0.20	0.40	0.40	0.04392	0.0415	0.0013	0.0078
17	Franco limoso	0.00	0.40	0.60	0.03650	0.0330	0.0245	0.0046
18	Franco limoso	0.20	0.00	0.80	0.03035	0.0259	0.0024	0.0337
19	Franco limoso	0.20	0.20	0.60	0.02855	0.0372	0.0000	0.0000
20	Limo	0.00	0.20	0.80	0.02710	0.0336	0.0008	0.0369
21	Limo	0.00	0.00	1.00	0.02975	0.0324	0.0016	0.0027

## Apéndice 18

*Desviación Estándar Muestral para réplicas de Residual (R-500) a diferentes densidades*

Nº S	TIPO DE SUELO	ARCILLA	ARENA	LIMO	DESVIACIÓN ESTANDAR			
					1.20	1.30	1.70	1.80
					g/cm3	g/cm3	g/cm3	g/cm3
1	Arcilla	1.00	0.00	0.00	0.00003	0.0011	0.0043	0.0117
2	Arcilla	0.80	0.20	0.00	0.00645	0.0008	0.0061	0.0006
3	Arcilla	0.60	0.40	0.00	0.00035	0.0004	0.0122	0.0003
4	Arcilla	0.80	0.00	0.20	0.00010	0.0016	0.0000	0.0075
5	Arcilla	0.60	0.20	0.20	0.00070	0.0006	0.0005	0.0037
6	Arcillo arenoso	0.40	0.60	0.00	0.00000	0.0000	0.0027	0.0039
7	Arcillo limoso	0.60	0.00	0.40	0.00000	0.0143	0.0154	0.0258
8	Arcillo limoso	0.40	0.20	0.40	0.00080	0.0281	0.0239	0.0000
9	Franco arcillo-arenoso	0.20	0.60	0.20	0.00705	0.0081	0.0114	0.0002
10	Franco arcilloso	0.40	0.40	0.20	0.02745	0.0018	0.0068	0.0247
11	Franco arcillo-limoso	0.40	0.00	0.60	0.00000	0.0000	0.0045	0.0144
12	Arena	0.00	1.00	0.00	0.02855	0.0277	0.0033	0.0054
13	Areno franco	0.00	0.80	0.20	0.00000	0.0066	0.0000	0.0235
14	Franco arenoso	0.20	0.80	0.00	0.00000	0.0309	0.0231	0.0000
15	Franco arenoso	0.00	0.60	0.40	0.00631	0.0159	0.0386	0.0000
16	Franco	0.20	0.40	0.40	0.00125	0.0268	0.0064	0.0353
17	Franco limoso	0.00	0.40	0.60	0.01265	0.0067	0.0000	0.0354
18	Franco limoso	0.20	0.00	0.80	0.00000	0.0071	0.0008	0.0005
19	Franco limoso	0.20	0.20	0.60	0.02345	0.0056	0.0356	0.0085
20	Limo	0.00	0.20	0.80	0.00000	0.0129	0.0037	0.0001
21	Limo	0.00	0.00	1.00	0.00020	0.0320	0.0430	0.0000

## ANEXOS

### Anexo 1

#### Ficha de seguridad del Diésel



#### Ficha de Datos de Seguridad

##### 1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO E INFORMACIÓN DE LA EMPRESA

1.1 NOMBRE DEL PRODUCTO	: DIESEL B5 S-50
1.2 SINÓNIMOS	: Combustible Diesel.
1.3 USO RECOMENDADO	: Combustible para motores Diesel y sistemas de generación de energía.
1.4 DATOS DEL PROVEEDOR	
Empresa	: Petróleos del Perú - PETROPERÚ S.A.
Dirección	: Av. Enrique Canaval Moreyra 150, Lima 27 - Perú
Teléfonos	: (01)614-5000, (01)630-4000, (01)630-4079 0800 77 155
Portal Empresarial	: <a href="http://www.petroperu.com.pe">http://www.petroperu.com.pe</a>
Correo electrónico	: <a href="mailto:servcliente@petroperu.com.pe">servcliente@petroperu.com.pe</a>
1.5 TELÉFONO DE EMERGENCIA	: (01) 614-5000, anexo 11444, celular 944-944-667 Horario de atención: 24 horas.

##### 2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

###### 2.1 CLASIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O MEZCLA

###### 2.1.1 Peligros físicos

Líquido inflamable: Categoría 3

###### 2.1.2 Peligros para la salud

Peligro por aspiración: Categoría 1

Corrosión/irritación cutánea: Categoría 2

Toxicidad aguda por inhalación: Categoría 4

Carcinogenicidad: Categoría 2

Toxicidad específica en órganos diana: Categoría 2

###### 2.1.3 Peligros para el ambiente

Peligro para el ambiente acuático: Categoría 2

###### 2.2 ELEMENTOS DE LAS ETIQUETAS

###### 2.2.1 Pictograma



Palabra de advertencia: Peligro

###### 2.2.2 Códigos de indicación de peligros

H226: Líquidos y vapores inflamables.

H304: Puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias.

H315: Provoca irritación cutánea.

Fecha de Revisión: 08.05.2023  
Pág. 1 de 8

## Ficha de Datos de Seguridad

H332: Nocivo en caso de inhalación.  
H351: Se sospecha que provoca cáncer.  
H373: Puede provocar daño en los órganos tras explosiones prolongadas o repetidas.  
H411: Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

### 2.2.3 Códigos de consejos de prudencia

#### Prevención

P210: Mantener alejado del calor, de superficies caliente, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.  
P261: Evitar respirar polvos/humos/gases/nieblas/vapores/aerosoles.  
P280: Usar guantes, ropa de protección, equipos de protección, para los ojos, la cara, los oídos.

#### Intervención

P301+P310: EN CASO DE INGESTIÓN: llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o un médico.  
P331: No provocar el vómito.

#### Eliminación

P501: Eliminar el contenido/recipiente conforme a la reglamentación local.

### 2.3 OTROS PELIGROS

No indicados.

## 3. COMPOSICIÓN

El Diesel B5 S-50 presenta un contenido máximo de 50 mg/Kg (ppm) de azufre y está constituido por una mezcla de:

Componentes	% Vol.
Diesel N°2: Mezcla compleja de hidrocarburos, cuya composición consta de cadenas carbonadas que contienen entre 9 y 30 carbonos (C9-C30) aprox.	95
Biodiesel (B100): Se compone principalmente de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga (FAME: Mín. 96.5% Masa).	5

## 4. PRIMEROS AUXILIOS

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PRIMEROS AUXILIOS

Contacto con los ojos: Lavar con abundante agua por aprox. 15 minutos.  
Contacto con la piel: Lavar el área afectada con agua y jabón. Quitar la ropa contaminada lo antes posible y lavarla antes de un nuevo uso o desechar de ser necesario.  
Inhalación: Trasladar inmediatamente a la persona afectada hacia un ambiente con aire fresco. Administrar respiración artificial o resucitación cardiopulmonar de ser necesario.  
Ingestión: Actuar con rapidez. No inducir al vómito a fin de evitar que el producto ingrese a los pulmones por aspiración. Mantener en reposo a la persona afectada.

### 4.2 SÍNTOMAS Y EFECTOS MAS IMPORTANTES

Contacto con los ojos: Irritación, conjuntivitis si la exposición es prolongada.

Fecha de Revisión: 08.05.2023  
Pág. 2 de 8



## Ficha de Datos de Seguridad

Contacto con la piel: Causa irritación. Puede causar dermatitis si el contacto es prolongado.

Inhalación: Puede causar náuseas, somnolencia, dolor de cabeza fatiga y mareos.

Ingestión: Irritación de la boca, garganta y estómago. El ingreso a los pulmones puede causar edema pulmonar.

4.3 INDICACIÓN DE LA NECESIDAD DE RECIBIR ATENCIÓN MÉDICA INMEDIATA  
Solicitar atención médica de inmediato.

---

### 5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIO

---

Ante un incendio o en caso exista tanques/camiones cisterna involucrados evacuar al personal fuera del área de exposición.

#### 5.1 MEDIOS DE EXTINCIÓN APROPIADOS

Polvo químico seco; en caso de incendios de grandes magnitudes utilizar espuma. NO UTILIZAR NUNCA CHORRO DE AGUA DIRECTO

#### 5.2 PELIGROS ESPECÍFICOS DEL PRODUCTO

Se puede producir gases tóxicos e irritantes durante el incendio; preferentemente, procurar detener la liberación del producto antes de intentar controlar el fuego. Utilizar los medios de extinción apropiados mencionados para extinguir el fuego y verter agua en forma de rocío para enfriar los recipientes o cilindros que contienen al producto.

#### 5.3 MEDIDAS ESPECIALES A TOMAR

En caso el incendio sea de gran magnitud, la extinción de fuego sólo debe ser realizada por personal especializado, para lo cual debe utilizar equipos de protección personal especiales como:

- Chaqueta y pantalón para combate estructural, casco, y demás indumentaria recomendado para afrontar el incendio.
- Equipo de protección respiratoria autónoma.

En algunas circunstancias se recomienda el uso de Trajes de Material Aluminizado.

---

### 6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

---

#### 6.1 PRECAUCIONES PERSONALES, EQUIPO PROTECTOR Y PROCEDIMIENTO DE EMERGENCIA

Aislar el área por riesgo de incendio. Eliminar todas las fuentes de ignición. Detener la fuga si no hay riesgo. Ver lo concerniente a equipo protector en el ítem 8 de este documento.

#### 6.2 PRECAUCIONES RELATIVAS AL AMBIENTE

Evitar que el producto entre al desagüe y fuentes de agua, mediante el uso de barreras de contención.

En caso de vertimientos en medios acuáticos, los productos que se requieran usar como dispersantes, absorbentes y/o aglutinantes deberán contar con la autorización vigente de la Dirección General de Capitanías y Guardacostas.

#### 6.3 MÉTODOS Y MATERIALES PARA LA CONTENCIÓN Y LIMPIEZA DE VERTIDOS

Contener y absorber el líquido con arena, tierra u otro material absorbente y ventilar la zona afectada. Recoger el material usado como absorbente, colocarlo en un depósito

Fecha de Revisión: 08.05.2023  
Pág. 3 de 8

## Ficha de Datos de Seguridad

identificado y proceder a la disposición final de acuerdo a un procedimiento implementado.

### 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

#### 7.1 MANIPULACIÓN

Durante la manipulación del producto, se deben tomar precauciones para evitar la concentración y estancamiento de los vapores, es recomendable tener una corriente de aire que facilite la difusión de vapores.

No realizar actividades que estén fuera de la rutina del trabajo (comer, beber, fumar), y eliminar cualquier fuente que pueda propiciar una chispa en el área de trabajo o almacenaje.

Toda manipulación del producto debe realizarse utilizando la indumentaria de protección personal respectiva (guantes y lentes de seguridad) para evitar accidentes por salpicadura, además, antes de realizar el procedimiento de carga/descarga del producto en sus contenedores, se debe realizar la conexión a tierra respectiva.

#### 7.2 ALMACENAMIENTO

Almacenar a temperatura ambiente, en recipientes cerrados claramente etiquetados y en áreas ventiladas; alejado de materiales que no sean compatibles y en áreas protegidas del fuego abierto, calor u otra fuente de ignición. El producto no debe ser almacenado en instalaciones ocupadas permanentemente por personas.

Eventualmente, se pueden utilizar recipientes de HDPE (Polietileno de alta densidad) para tomar muestras del producto.

NOTA: Los trabajos de limpieza, inspección y mantenimiento de los tanques de almacenamiento deben ser realizados siguiendo estrictamente un procedimiento implementado y considerando las medidas de seguridad pertinentes.

### 8. CONTROL A LA EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

#### 8.1 CONTROLES TÉCNICOS APROPIADOS

Antes de ingresar a espacios donde existan productos almacenados debe ser previamente monitoreados para verificar el oxígeno y explosividad.

Usar campanas extractoras y sistemas de ventilación en locales cerrados; identificar las salidas de emergencia y contar con duchas y lavaojos cerca del lugar de trabajo.

#### 8.2 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Protección respiratoria: Como medida preventiva al ingresar al área de almacenamiento se recomienda siempre ventilar y monitorear el ambiente; para la manipulación utilizar un equipo de protección respiratorio (mascara media cara con cartuchos para vapores orgánicos).

Ojos: En el trasvase o contacto con el producto, utilizar lentes de seguridad y protección facial contra salpicaduras de productos.

Piel: Guantes de neopreno, nitrilo o polivinilo; traje de protección y calzado de seguridad.

### 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Apariencia	: Líquido claro y brillante
Color	: Típico 1.0, máx. 3.0 (ASTM) (*)
Olor	: Característico

Fecha de Revisión: 08.05.2023  
Pág. 4 de 8

## Ficha de Datos de Seguridad

Umbral olfativo	: No se dispone de datos
PH	: No se dispone de datos
Punto de fusión, °C	: No se dispone de datos
Punto inicial de ebullición, °C	: 160 aprox.
Punto final de ebullición, °C	: 360 aprox.
Punto de inflamación, °C	: 52 mínimo
Tasa de evaporación	: No se dispone de datos
Inflamabilidad	: Líquidos y vapores inflamables
Límites de inflamabilidad, % vol. en aire	: Inferior: 1.3 Superior: 6
Presión de vapor a 37.8°C, atm	: 0.004
Densidad de vapor	: No se dispone de datos
Gravedad específica a 15.6/15.6°C	: 0.81 – 0.85 aprox.
Solubilidad en agua	: Insignificante
Coefficiente de reparto: n-octanol/agua	: No se dispone de datos
Temperatura de autoinflamación, °C	: 257 aprox.
Temperatura de descomposición	: No se dispone de datos
Viscosidad cinemática a 40°C, cSt	: 1.9 a 4.1

(\*) El producto puede tener un color comercial diferente a la tonalidad natural (ámbar), por adición de colorantes.

---

### 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

---

#### 10.1 REACTIVIDAD

No se dispone de datos.

#### 10.2 ESTABILIDAD QUÍMICA

El producto es estable en condiciones normales de presión y temperatura.

#### 10.3 POSIBILIDAD DE REACCIONES PELIGROSAS

No existen en condiciones previstas para su almacenamiento y uso.

#### 10.4 CONDICIONES QUE DEBEN EVITARSE

Evitar las fuentes de ignición, así como el calentamiento de los recipientes que contienen el producto.

#### 10.5 MATERIALES INCOMPATIBLES

Es incompatible con sustancias oxidantes

#### 10.6 PRODUCTOS DE DESCOMPOSICIÓN PELIGROSOS

Los producidos por la combustión completa e incompleta: CO<sub>2</sub> y CO.

---

### 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

---

#### 11.1 TOXICIDAD AGUDA

No se dispone de datos.

#### 11.2 CORROSIÓN O IRRITACIÓN CUTÁNEA

Provoca irritación cutánea.

#### 11.3 LESIONES O IRRITACIÓN OCULAR GRAVE

No se dispone de datos.

Fecha de Revisión: 08.05.2023  
Pág. 5 de 8



## Ficha de Datos de Seguridad

### 11.4 SENSIBILIDAD RESPIRATORIA O CUTÁNEA

No se dispone de datos.

### 11.5 MUTAGENICIDAD EN CÉLULAS GERMINALES

No se dispone de datos.

### 11.6 CARCINOGENICIDAD

Se sospecha que provoca cáncer (Contiene sustancias con posibles efectos cancerígenos, pero no se dispone información suficiente para realizar una evaluación satisfactoria).

### 11.7 TOXICIDAD PARA LA REPRODUCCIÓN

No existen evidencias de toxicidad para la reproducción en mamíferos.

### 11.8 TOXICIDAD ESPECÍFICA EN DETERMINADOS ÓRGANOS (STOT) - EXPOSICIÓN ÚNICA

No se dispone de datos.

### 11.9 TOXICIDAD ESPECÍFICA EN DETERMINADOS ÓRGANOS (STOT) - EXPOSICIÓN REPETIDA

Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.

### 11.10 PELIGRO DE ASPIRACIÓN

Puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias.

---

## 12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

---

### 12.1 TOXICIDAD

Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos. Evitar que el vertido alcance el alcantarillado o cursos de agua.

### 12.2 PERSISTENCIA Y DEGRADABILIDAD

Liberado en el ambiente los componentes más ligeros tenderán a evaporarse y foto oxidarse por reacción con los radicales hidroxilos, el resto de los componentes más pesados también pueden estar sujetos a fotooxidación, pero lo normal es que sean absorbidos por el suelo o sedimentos. Liberado en el agua flota y se separa y aunque es muy poco soluble en agua, los componentes más solubles podrán disolverse y dispersarse. En suelos y sedimentos, bajo condiciones aeróbicas, la mayoría de los componentes del gasóleo están sujetos a procesos de biodegradación, siendo en condiciones anaerobias más persistente. Posee un DBO de 8% en cinco días.

### 12.3 POTENCIA DE BIOACUMULACIÓN

El valor de Log Kow de los componentes del gasóleo sugiere su bioacumulación, pero los datos de literatura demuestran que esos organismos testados son capaces de metabolizar los hidrocarburos del gasóleo.

### 12.4 MOVILIDAD EN EL SUELO

No se dispone de datos.

### 12.5 OTROS EFECTOS ADVERSOS

No se dispone de datos.

---

## 13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA DISPOSICIÓN FINAL

---

Fecha de Revisión: 08.05.2023  
Pág. 6 de 8

## Ficha de Datos de Seguridad

La disposición final del producto se realiza de acuerdo a la reglamentación vigente.

### 14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

El transporte se realiza de acuerdo a la normatividad vigente aplicable.

14.1 NÚMERO ONU: UN 1202

14.2 DESIGNACIÓN OFICIAL DE TRANSPORTE DE LAS NACIONES UNIDAS: Gasóleo o combustible para motores Diesel o aceite mineral para caldeo, ligero.

14.3 CLASE RELATIVA AL TRANSPORTE: 3

14.4 GRUPO DE EMBALAJE: III

14.5 RIESGOS AMBIENTALES: Si

14.6 PRECAUCIONES ESPECIALES PARA EL USUARIO: Señalización pictórica, NTP 399.015.2014



14.7 TRANSPORTE A GRANEL CON ARREGLO A LOS INSTRUMENTOS DE LA OMI: No precisado

### 15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Normatividad vigente aplicable de referencia en el Perú:

- Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 052-1993-EM (18/11/1993), y modificaciones.
- Reglamento de Seguridad para el Transporte de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 026-94-EM (10/05/94), y modificaciones.
- Reglamentos para la Comercialización de Combustibles Líquidos y Otros Productos Derivados de los Hidrocarburos aprobados por los Decretos Supremos N° 030-1998-EM (03/08/1998) y N° 045-2001-EM (26/07/2001), y modificaciones.
- Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles, aprobado por el Decreto Supremo N° 021-2007-EM y modificaciones.
- Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 043-2007-EM (22/08/2007), y modificaciones.
- R. N° 206-2009-OS-CD (Aprueban el "Procedimiento de Control de Calidad de los Biocombustibles y sus Mezclas" y modifican Tipificación y Escala de Multas y Sanciones de Hidrocarburos).

Fecha de Revisión: 08.05.2023  
Pág. 7 de 8

### Ficha de Datos de Seguridad

- R. N° 063-2011-OS-CD (Procedimiento para la Inspección, Mantenimiento y Limpieza de Tanques de Combustibles Líquidos, Biocombustibles y Otros Productos Derivados de los Hidrocarburos).
- Reglamento para la protección ambiental en las actividades de hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 039-2014-EM (05/11/2014).
- Decreto Supremo que establece medidas relacionadas al contenido de azufre en el Diesel, Gasolina y Gasohol para su comercialización y uso y simplifican el número de Gasolinas y Gasohol, Decreto Supremo N°014-2021-EM, y modificaciones.

---

#### 16. INFORMACIÓN ADICIONAL

---

Rombo NFPA 704:



Salud: 0  
Inflamabilidad: 2  
Reactividad: 0

EMERGENCIAS a nivel nacional: 116

Dirección General de Capitanías y Guardacostas: (511) 209-9300

#### GLOSARIO

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales)

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Ensayos y Materiales)

FAME: Fatty Acid Methyl Esters (Ésteres metílicos de ácidos grasos)

NTP: Norma Técnica Peruana

NFPA: National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección contra el fuego)

OMI: Organización Marítima Internacional

STOT: Specific target organ toxicity (Toxicidad específica en determinados órganos)

---

Nota: El presente documento constituye información básica relacionada a los peligros físicos, a la salud y ambiente, en la manipulación del producto para el Cliente y/o Usuario, quienes deberán evaluar las condiciones de uso, y los cuidados necesarios para un manejo seguro del producto conforme a sus propios procedimientos. PETROPERÚ no se responsabiliza por actividades fuera de su control.

---

Fecha de Revisión: 08.05.2023

Pág. 8 de 8



## Anexo 2

### Ficha de seguridad del Residual (R-500)



#### Ficha de Datos de Seguridad

##### 1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO E INFORMACIÓN DE LA EMPRESA

1.1 NOMBRE DEL PRODUCTO	: PETRÓLEO INDUSTRIAL N°500
1.2 SINÓNIMOS	: Combustible residual.
1.3 USO RECOMENDADO	: Combustible para calderas y quemadores de equipos industriales y hornos.
1.4 DATOS DEL PROVEEDOR	
Empresa	: Petróleos del Perú - PETROPERÚ S.A.
Dirección	: Av. Enrique Canaval Moreyra 150, Lima 27 - Perú
Teléfonos	: (01)614-5000, (01)630-4000, (01)630-4079 0800 77 155
Portal Empresarial	: <a href="http://www.petroperu.com.pe">http://www.petroperu.com.pe</a>
Correo electrónico	: <a href="mailto:servcliente@petroperu.com.pe">servcliente@petroperu.com.pe</a>
1.5 TELÉFONO DE EMERGENCIA	: (01) 614-5000, anexo 11444, celular 944-944-667 Horario de atención: 24 horas.

##### 2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

###### 2.1 CLASIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O MEZCLA

2.1.1 Peligros para la salud  
Toxicidad aguda: Categoría 4  
Carcinogenicidad: Categoría 1B  
Toxicidad para la reproducción: Categoría 2  
Toxicidad específica de órganos (exposición repetida): Categoría 2  
Peligro por aspiración: Categoría 1

2.1.2 Peligros para el ambiente  
Peligro a largo plazo (crónico) para el ambiente acuático: Categoría Crónico 1  
Peligro a corto plazo (agudo) para el ambiente acuático: Categoría agudo 1

###### 2.2 ELEMENTOS DE LAS ETIQUETAS

###### 2.2.1 Pictograma



Palabra de advertencia: Peligro

###### 2.2.2 Códigos de indicación de peligros

H304: Puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias.  
H332: Nocivo si se inhala.  
H350: Puede provocar cáncer.  
H361: Se sospecha que perjudica la fertilidad o daña al feto.  
H373: Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.  
H410: Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Fecha de Revisión: 01.04.2019  
Pág. 1 de 8

## Ficha de Datos de Seguridad

### 2.2.3 Códigos de consejos de prudencia

#### Prevención

P201: Pedir instrucciones especiales antes del uso.

P260: No respirar los vapores.

P273: Evitar su liberación al ambiente.

P280: Usar guantes/ropa de protección/equipo de protección para los ojos/la cara/los oídos.

#### Intervención

P301+P310+P331: EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/médico. No inducir al vómito.

#### Eliminación

P501: Eliminar el contenido/recipiente conforme a la reglamentación local, regional, nacional e internacional.

### 2.3 OTROS PELIGROS

No indicados.

---

## 3. COMPOSICIÓN

Componentes
Mezcla compleja de hidrocarburos derivados del petróleo de alta viscosidad, cuya composición consta de cadenas carbonadas que contienen aprox. entre 12 y 50 carbonos (C12-C50).

---

## 4. PRIMEROS AUXILIOS

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PRIMEROS AUXILIOS

Contacto con los ojos: Lavar con abundante agua por aprox. 15 minutos.

Contacto con la piel: Lavar el área afectada con agua y jabón. Quitar la ropa contaminada lo antes posible y lavarla antes de un nuevo uso o desechar de ser necesario.

Inhalación: Trasladar inmediatamente a la persona afectada hacia un ambiente con aire fresco. Administrar respiración artificial o resucitación cardiopulmonar de ser necesario.

Ingestión: Actuar con rapidez. No inducir al vómito a fin de evitar que el producto ingrese a los pulmones por aspiración. Mantener en reposo a la persona afectada.

### 4.2 SÍNTOMAS Y EFECTOS MAS IMPORTANTES

Contacto con los ojos: Irritación, conjuntivitis si la exposición es prolongada.

Contacto con la piel: Causa irritación. Puede causar dermatitis si el contacto es prolongado.

Inhalación: Puede causar náuseas, somnolencia, dolor de cabeza fatiga y mareos.

Ingestión: Irritación de la boca, garganta y estómago. El ingreso a los pulmones puede causar edema pulmonar.

### 4.3 INDICACIÓN DE LA NECESIDAD DE RECIBIR ATENCIÓN MÉDICA INMEDIATA

Solicitar atención médica de inmediato.

---

## 5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIO

## Ficha de Datos de Seguridad

### 5.1 MEDIOS DE EXTINCIÓN APROPIADOS

Polvo químico seco, agua pulverizada y espuma.

NO UTILIZAR nunca chorro de agua directo.

### 5.2 PELIGROS ESPECÍFICOS DEL PRODUCTO QUÍMICO

Los productos de combustión pueden contener: Monóxido de Carbono, dióxido de carbono, óxidos de azufre, sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).

### 5.3 MEDIDAS ESPECIALES DE LOS EQUIPOS DE LUCHA CONTRA INCENDIO

Evacuar al personal del área hacia una zona más segura y a una distancia conveniente si hay un tanque o camión cisterna involucrado.

Usar un equipo protector debido a que se pueden producir gases tóxicos e irritantes durante un incendio.

Mantener los depósitos o bidones próximos fríos rociándolos con agua y ventilar la zona afectada.

En caso el incendio sea de gran magnitud, la extinción de fuego sólo debe ser realizada por personal especializado, para lo cual debe utilizar equipos de protección personal especiales como:

- Chaqueta y pantalón para combate estructural, casco, y demás indumentaria recomendado para afrontar el incendio.
- Equipo de protección respiratoria autónoma.

---

## 6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

---

### 6.1 PRECAUCIONES PERSONALES, EQUIPO PROTECTOR Y PROCEDIMIENTO DE EMERGENCIA

Aislar el área. Eliminar las fuentes de ignición. Detener la fuga si no hay riesgo. Ver lo concerniente a equipo protector en el ítem 8 de este documento.

### 6.2 PRECAUCIONES RELATIVAS AL AMBIENTE

Evitar que el producto entre al desagüe y fuentes de agua, mediante el uso de barreras de contención.

En caso de vertimientos en medios acuáticos, los productos que se requieran usar como dispersantes, absorbentes y/o aglutinantes deberán contar con la autorización vigente de la Dirección General de Capitanías y Guardacostas.

### 6.3 MÉTODOS Y MATERIALES PARA LA CONTENCIÓN Y LIMPIEZA DE VERTIDOS

Contener y absorber el líquido con arena, tierra u otro material absorbente y ventilar la zona afectada. Recoger el material usado como absorbente, colocarlo en un depósito identificado y proceder a la disposición final de acuerdo a un procedimiento implementado.

---

## 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

---

### 7.1 MANIPULACIÓN

Usar un equipo de protección personal y no comer, beber o fumar durante su manipulación; posteriormente proceder a la higiene personal.

Antes de realizar el procedimiento de carga y/o descarga del producto, conectar a tierra los tanques, cisternas y el equipo utilizado; para evitar la acumulación de cargas electrostáticas. Usar sistemas a prueba de chispas y explosión. Evitar las salpicaduras.

Los contenedores vacíos pueden contener residuos o vapores inflamables o explosivos. No manipular los contenedores sin haber tomado precauciones contra este riesgo.

Fecha de Revisión: 01.04.2019

Pág. 3 de 8



## Ficha de Datos de Seguridad

### 7.2 ALMACENAMIENTO

Almacenar a temperatura ambiente, en recipientes cerrados claramente etiquetados y en áreas ventiladas; alejado de materiales que no sean compatibles y en áreas protegidas del fuego abierto, calor u otra fuente de ignición. El producto no debe ser almacenado en instalaciones ocupadas permanentemente por personas.

#### NOTAS:

- La limpieza, inspección y mantenimiento de los tanques de almacenamiento deben ser realizadas siguiendo estrictamente un procedimiento implementado.
- Para facilitar el bombeo en el despacho del producto, éste es sometido a un precalentamiento, tomar las precauciones necesarias.

---

## 8. CONTROL A LA EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

---

### 8.1 PARÁMETROS DE CONTROL

No han sido establecidos niveles de exposición para este producto.

### 8.2 CONTROLES TÉCNICOS APROPIADOS

Las áreas de almacenamiento deben mantenerse sin derrames o producto en recipientes abiertos.

Antes de ingresar a espacios donde existan productos almacenados debe ser previamente, monitoreados para verificar oxígeno y explosividad

Usar campanas extractoras y sistemas de ventilación en locales cerrados; identificar las salidas de emergencia, y además contar con duchas y lavajos cerca del lugar de trabajo.

Toda manipulación solo debe realizarse en zonas bien ventiladas.

Evitar el contacto, la inhalación y la ingestión del producto.

### 8.3 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Protección respiratoria: Como medida preventiva antes de ingresar al área de almacenamiento se recomienda siempre ventilar y monitorear el ambiente; seguidamente utilizar un respirador media cara contra vapores orgánicos.

Ojos: En el trasvase o contacto con el producto, utilizar lentes de seguridad y protección facial contra salpicaduras de productos.

Piel: Guantes de nitrilo o polivinilo; calzado de seguridad y ropa/traje de trabajo.

---

## 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

---

Apariencia	: Líquido muy viscoso
Color	: Marrón oscuro a negro
Olor	: Característico.
Umbral olfativo	: No se dispone de datos
PH	: No se dispone de datos
Punto de fusión, °C	: No se dispone de datos
Punto inicial y final de ebullición, °C	: No se dispone de datos
Punto de inflamación, °C	: 65 mínimo
Tasa de evaporación	: No se dispone de datos
Inflamabilidad	: Líquidos y vapores Inflamables
Límites de inflamabilidad, %Vol. en aire	: Inferior: 1.3 Superior: 6
Presión de vapor a 37.8°C, KPa	: No se dispone de datos
Densidad de vapor	: No se dispone de datos
Gravedad específica a 15.6/15.6 °C	: 0.96 – 0.99 aprox.
Solubilidad en agua	: Insignificante
Coefficiente de reparto: n-octanol/agua	: No se dispone de datos

Fecha de Revisión: 01.04.2019

Pág. 4 de 8



## Ficha de Datos de Seguridad

Temperatura de autoinflamación, °C	: 407 aprox.
Temperatura de descomposición	: No se dispone de datos
Viscosidad cinemática a 50°C, cSt	: Mín. 641, máx. 1060

---

### 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

---

#### 10.1 REACTIVIDAD

No se dispone de datos.

#### 10.2 ESTABILIDAD QUÍMICA

El producto es estable en condiciones normales de presión y temperatura de uso.

#### 10.3 POSIBILIDAD DE REACCIONES PELIGROSAS

No existen en condiciones previstas para su almacenamiento y uso.

#### 10.4 CONDICIONES QUE DEBEN EVITARSE

Fuego, temperaturas extremas.

#### 10.5 MATERIALES INCOMPATIBLES

Es incompatible con sustancias oxidantes

#### 10.6 PRODUCTOS DE DESCOMPOSICIÓN PELIGROSOS

Los producidos por la combustión: CO<sub>2</sub> y CO (Completa e Incompleta). Las emisiones pueden contener óxidos de azufre y H<sub>2</sub>S.

---

### 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

---

#### 11.1 TOXICIDAD AGUDA: No se dispone de datos.

#### 11.2 CORROSIÓN O IRRITACIÓN CUTÁNEA

Puede causar irritación, sequedad o desgrase de la piel. En algunos casos el contacto repetido puede ocasionar dermatitis y foliculitis, además, algunos componentes del producto pueden absorberse ocasionando daños severos.

#### 11.3 LESIONES O IRRITACIÓN OCULAR GRAVE

El contacto causa irritación con sensación de ardor, enrojecimiento e inflamación. Daños posibles en la córnea.

#### 11.4 SENSIBILIDAD RESPIRATORIA O CUTÁNEA

Dolor de cabeza, irritación nasal y respiratoria, náuseas, somnolencia, dificultad para respirar, depresión del sistema nervioso central y pérdida de la conciencia.

NOTA: Los síntomas de la inhalación de los vapores del producto caliente pueden ser graves pues poseen efectos irritantes y tóxicos.

#### 11.5 MUTAGENICIDAD EN CÉLULAS GERMINALES

No se dispone de datos.

#### 11.6 CARCINOGENICIDAD

Clasificación IARC: Puede provocar cáncer. Grupo 2B (El agente es posiblemente carcinógeno para el hombre).

#### 11.7 TOXICIDAD PARA LA REPRODUCCIÓN

Se sospecha que perjudica la fertilidad o daña al feto.

#### 11.8 TOXICIDAD ESPECÍFICA EN DETERMINADOS ÓRGANOS (STOT) - EXPOSICIÓN ÚNICA

Fecha de Revisión: 01.04.2019  
Pág. 5 de 8





## Ficha de Datos de Seguridad

No se dispone de datos.

11.9 TOXICIDAD ESPECIFICA EN DETERMINADOS ÓRGANOS (STOT) – EXPOSICIÓN REPETIDA  
puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.

11.10 PELIGRO DE ASPIRACIÓN  
No se dispone de datos.

---

### 12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

---

12.1 TOXICIDAD  
Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

12.2 PERSISTENCIA Y DEGRADABILIDAD  
No se dispone de datos.

12.3 POTENCIAL DE BIOACUMULACIÓN  
No se dispone de datos.

12.4. MOVILIDAD EN EL SUELO  
No se dispone de datos.

12.5 OTROS EFECTOS ADVERSOS  
No existen evidencias

---

### 13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA DISPOSICIÓN FINAL

---

La disposición final del producto se realiza de acuerdo a la reglamentación vigente.

---

### 14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

---

El transporte se realiza de acuerdo a la normatividad vigente aplicable.

14.1 NÚMERO ONU: UN 1993

14.2 DESIGNACIÓN OFICIAL DE TRANSPORTE DE LAS NACIONES UNIDAS: Líquido inflamable, N.E.P.

14.3 CLASE RELATIVA AL TRANSPORTE: 3

14.4 GRUPO DE EMBALAJE: III

14.5 RIESGOS AMBIENTALES: SI

14.6 PRECAUCIONES ESPECIALES PARA EL USUARIO: Señalización pictórica, NTP 399,015,2014

Fecha de Revisión: 01.04.2019  
Pág. 6 de 8



14.7 TRANSPORTE A GRANEL CON ARREGLO A LOS INSTRUMENTOS DE LA OMI: No precisado.

---

**15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA**

---

Normatividad vigente aplicable de referencia en el Perú:

- Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 052-1993-EM (18/11/1993), y modificaciones.
- Reglamento de Seguridad para el Transporte de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 026-94-EM (10/05/94), y modificaciones.
- Reglamentos para la Comercialización de Combustibles Líquidos y Otros Productos Derivados de los Hidrocarburos aprobados por los Decretos Supremos N° 030-1998-EM (03/08/1998) y N° 045-2001-EM (26/07/2001), y modificaciones.
- Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 043-2007-EM (22/08/2007), y modificaciones.
- R. N° 063-2011-OS-CD (Procedimiento para la Inspección, Mantenimiento y Limpieza de Tanques de Combustibles Líquidos, Biocombustibles y Otros Productos Derivados de los Hidrocarburos).
- Reglamento para la protección ambiental en las actividades de hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 039-2014-EM (05/11/2014).

---

**16. INFORMACIÓN ADICIONAL**

---

Rombo NFPA 704:



Salud: 0  
Inflamabilidad: 2  
Reactividad: 0

EMERGENCIAS a nivel nacional: 116

Dirección General de Capitanías y Guardacostas: (511) 209-9300

**GLOSARIO**

NTP: Norma Técnica Peruana

NFPA: National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección contra el fuego)

OMI: Organización Marítima Internacional

STOT: Specific target organ toxicity (Toxicidad específica en determinados órganos)

Fecha de Revisión: 01.04.2019

Pág. 7 de 8



## Ficha de Datos de Seguridad

---

Nota: El presente documento constituye información básica relacionada a los peligros físicos, a la salud y ambiente, en la manipulación del producto para el Cliente y/o Usuario, quienes deberán evaluar las condiciones de uso, y los cuidados necesarios para un manejo seguro del producto conforme a sus propios procedimientos. PETROPERÚ no se responsabiliza por actividades fuera de su control.

---

Fecha de Revisión: 01.04.2019  
Pág. 8 de 8

## Anexo 3

### Instructivo del agitador de tamices RO-TAP

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO</b>	Código	<b>I-ATR-3816</b>
	FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS		
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA	Versión	03
	<b>LABORATORIO DE HIDROCARBUROS</b>		
	<b>INSTRUCTIVO DEL AGITADOR DE TAMICES RO-TAP MODELO: RX-29-16</b>	Fecha	15/02/2025

#### 1. Objetivo

Usar correctamente del agitador de tamices RO-TAP **modelo: RX-29-16**

#### 2. Alcance:

3. El presente instructivo es para cumplimiento obligatorio de docentes, jefes de prácticas, estudiantes, tesisistas, y demás usuarios internos y/o externos de laboratorio de hidrocarburos

#### 4. Descripción del equipo:

La Ro-Tap es la tamizadora requerida por numerosas especificaciones industriales, según los estándares ASTM. El equipo ha sido diseñado para simular y mecanizar el tamizaje manual.

La tamizadora Ro-Tap, gracias a su movimiento rotativo y a la energía de golpeteo, da resultados de análisis por tamizaje consistentes y repetibles.

Los tamices de ensayo adecuados para su aplicación

Para el ensayo por tamizado con el equipo W.S. TYLER Ro-Tap RX-29, el tamiz de ensayo necesario dependerá de la aplicación en cuestión. El sistema de fijación está pensado para 6 tamices de ensayo normales o 13 de media altura y una cubeta de tamizado con 203 mm (8") o 200 mm de diámetro.

#### 5. Responsabilidades

- El responsable y/o director de laboratorio debe hacer cumplir el instructivo.
- El docente de la asignatura debe hacer cumplir el instructivo durante el uso del laboratorio.
- El técnico de laboratorio es el responsable de hacer el seguimiento de la ejecución del instructivo.

#### 6. Procedimiento a seguir para el uso del destilador atmosférico

- Conectar el variador de frecuencia y regular entre 80 y 90 y encenderlo.
- Encender el Ro-tap con la tecla START
- Con la tecla MODE seleccionar el tiempo (minutos, segundos, horas).
- Con la ayuda de las flechas subir o bajar seleccionar 3, 5, minutos
- Preparar las mallas correspondientes de mayor a menor malla (6 tamices) y al final colocar la cubeta de tamizado para la recolección de la muestra.
- Colocar la muestra a tamizar en la malla superior y tapar con la tapa del Ro-tap.
- Asegurar los tamices en la plataforma de tal forma que quede al ras de la plataforma con el corcho hacia arriba.
- Para asegurar los tamices usar las manivelas a ambos lados del equipo que sube y baja al desajustarlos al girarlos en sentidos opuestos el uno del otro, y al ubicarlos en la posición correcta asegurar las manivelas.
- Bajar el brazo de golpeteo.
- Presionar START para iniciar el tamizaje.

Elaborado por: Ing. Silvia Luna  
Huamani

Revisado por: Comisión de instalaciones, infraestructura y  
equipamiento de la Escuela Profesional de Ingeniería Química y  
Petroquímica.

Aprobado por:



## Anexo 4

### Instructivo del Viscosímetro Stabinger

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO</b>	Código	I-VMS-11IQ
	FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS	Versión	01
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	LABORATORIO DE HIDROCARBUROS		
	<b>INSTRUCTIVO DE MANEJO DE: VISCOSÍMETRO STABINGER MODELO: SVM-3000</b>	Fecha	04/04/2023

#### 1. Objetivo

Usar correctamente el Viscosímetro Stabinger modelo SVM-3000.

#### 2. Alcance

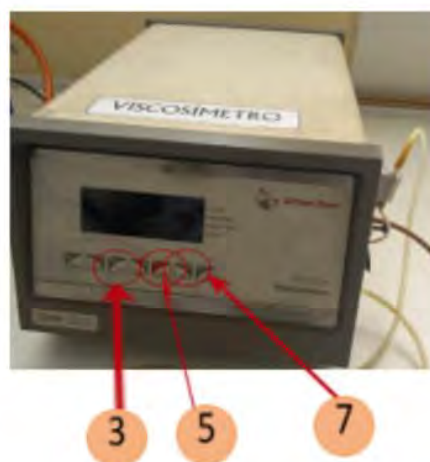
El viscosímetro SVM 3000 mide la viscosidad dinámica [mPa.s], la densidad de la muestra, y calcula la viscosidad cinemática [mm<sup>2</sup>/s] a partir de estos valores. Este equipo es usado durante los ensayos de prácticas, seminarios o tesis realizados en el laboratorio de hidrocarburos.

#### 3. Responsabilidades

- El responsable y/o director de laboratorio debe hacer cumplir el instructivo.
- El docente de la asignatura debe hacer cumplir el instructivo durante el uso del laboratorio.
- El técnico de laboratorio es el responsable de hacer el seguimiento de la ejecución del instructivo.

#### 4. Descripción

1. Colocar encima de una mesa en posición horizontal.
2. Conectar a una fuente de energía y encender el equipo presionando el botón de la parte posterior.
3. Para programar la temperatura pulsar "SET" y ayudarse de los cursores para programar la temperatura deseada.
4. Colocar 8 mL de muestra con ayuda de una jeringa.
5. Presionar "START", seguidamente el equipo calculará automáticamente la viscosidad.
6. Una vez calculado el equipo dejará de parpadear y aparecerá un símbolo de rombo, el cual indica que el análisis finalizó.
7. Para expulsar la muestra presionar "PUMP" y limpiar con un solvente adecuado para el tipo de muestra.



Elaborado por: Est. Diego Becerra

Revisado por: Comisión de instalaciones, infraestructura y equipamiento de la Escuela Profesional de Ingeniería Química y Petroquímica.

Aprobado por: