



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA**



Descripción de la percolación de hidrocarburos sobre suelos.

POR

Nicol Belén Cuevas Salinas

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniera Civil Química

Profesor Guía:
Andrés Mejía Matallana

Profesor Comisión:
Gerard Alonso Benito

Profesional Supervisor:
Pía Bustos Ramírez

Enero 2026
Concepción (Chile)
© 2026 Nicol Cuevas Salinas

© 2026 Nicol Cuevas Salinas

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Agradecimientos

No sé exactamente cómo empezar, pues son muchas las personas que estuvieron a mi lado a lo largo de la carrera. Cada una, a su manera, contribuyó a que hoy esté cerrando esta etapa, una etapa de seis años que pasó más rápido de lo que imaginé y que marca el fin de un camino largo, desafiante y profundamente significativo para mí.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes me hicieron sentir capaz incluso en los momentos en que yo misma dudaba. A mi mamá, quién estuvo a mi lado en todo momento, acompañándome en muchos días de traspase, ayudándome a practicar una y otra vez para mis presentaciones, también leía cada trabajo para apoyarme en la redacción, y créeme que este informe no será la excepción. A mi papá, por su apoyo incondicional, por ayudarme a mirar hacia adelante cuando el estrés me sobrepasaba y por recordarme que podía seguir adelante incluso cuando todo parecía difícil. A mi abuelo Lolo, por su constante ánimo y confianza. Gracias por creer en mí cuando yo no lo hacía, no saben cuánto los quiero y lo agradecida que estoy con ustedes.

A mis amigas, mi grupo de cotorras, con quienes enfrenté esta etapa juntas. En cada ramo nos apoyamos, guiamos y ayudamos mutuamente, compartiendo tanto el estrés como la alegría de cada logro. Su compañía hizo todo más llevadero, y sin duda son lo más valioso que me llevo de esta etapa.

Quiero destacar especialmente a Flavia y Javi, quienes fueron un soporte fundamental durante este proceso. Flavia, esta amistad que se fortaleció en los últimos años fue clave para mí me apoyaste en cada momento en que flaqueaba y me ayudaste a ver que era capaz incluso cuando lo dudaba profundamente. Javi, este último año nos apoyamos constantemente, levantándonos el ánimo en la etapa final y compartiendo largas jornadas de estudio para avanzar en la memoria. Gracias por recordarme que no estaba sola.

A Marcela Cartes, Marce, gracias por tu constante disposición y apoyo durante los experimentos, por acompañarme en cada instancia, por tus ánimos cuando algo no resultaba y por la motivación en los momentos de cansancio.

A mi profesor guía, Andrés Mejía, agradezco su orientación, apoyo y valiosos comentarios durante el desarrollo de esta memoria, así como la confianza depositada en mí, lo que representó un importante aprendizaje académico y personal.

Asimismo, agradezco al grupo AM Thermo por su disposición y apoyo en las presentaciones, ayudándome a mejorar en un aspecto que nunca ha sido mi fuerte.

Finalmente, agradezco a ENAP, en particular a Pía Bustos, quien no solo me permitió realizar la práctica profesional, sino también desarrollar este tema de memoria. Fue un desafío, pero gracias a su disposición y apoyo fue posible superarlo. También a Enzo Mella, por su apoyo y compañía en las visitas a la refinería.

A cada uno les agradezco de corazón, pues contribuyeron a que hoy pueda llegar a este momento.

Resumen

Las fugas y/o derrames de hidrocarburos representan un riesgo ambiental permanente, especialmente en zonas industriales donde puede ocurrir la infiltración de estos compuestos en los suelos. En este contexto el presente trabajo tiene como objetivo estudiar la percolación de hidrocarburos en los diferentes tipos de suelos, con el fin de estimar el avance vertical de estos y analizar el comportamiento hidráulico del medio poroso frente a tres tipos de hidrocarburos, gasolina, diesel y crudo.

Para ello, se realizaron ensayos experimentales que simulan un escenario de pérdida de contención de hidrocarburos en una columna de suelo, para que esto sea representativo, se tomaron dos muestras diferentes de suelo, donde una de las muestras es de textura arenosa y la otra de carácter más arcilloso. Durante los experimentos se realizaron mediciones de flujo de salida en función del tiempo, permitiendo calcular el caudal de salida e identificar el momento donde se estaba en estado transitorio y estacionario del sistema.

A partir de estos resultados, se calibraron los parámetros hidráulicos del modelo (parámetros de Van Genuchten) y se implementó un modelo numérico capaz de simular perfiles de flujo y del contenido volumétrico de líquido en profundidad.

Los resultados evidencian que la gasolina presenta la mayor velocidad de percolación, seguida por el diésel, mientras que el crudo muestra un avance considerablemente más lento y una mayor tendencia a la retención, especialmente en el suelo arenoso. Asimismo, se observaron diferencias significativas entre ambos tipos de suelo, siendo el suelo arcilloso el que presenta una menor conductividad hidráulica y mayor resistencia al flujo. El modelo numérico logró reproducir de manera adecuada las tendencias experimentales, tanto en los tiempos de inicio del goteo como en la estabilización del flujo.

En conjunto, este estudio permite estimar la profundidad de avance de distintos hidrocarburos ante posibles pérdidas de contención y constituye una herramienta de apoyo para la gestión ambiental y en la toma de decisiones ante este tipo de eventos, contribuyendo a una mejor evaluación de riesgo.

Abstract

Leaks and/or spills of hydrocarbons represent a persistent environmental risk, particularly in industrial areas, where infiltration of these compounds into soils may occur. In this context, the objective of this study is to investigate the percolation of hydrocarbons in different soil types, in order to estimate their vertical advancement and to analyze the hydraulic behavior of the porous medium when exposed to three types of hydrocarbons: gasoline, diesel, and crude oil.

To this end, experimental tests were conducted to simulate a hydrocarbon loss-of-containment scenario in a soil column..To ensure representativeness, two different soil samples were taken from the refinery area: one with a sandy texture and the other with a more clayey character. During the experiments, outlet flow measurements were recorded as a function of time, allowing the calculation of the outflow rate and the identification of the transient and steady-state conditions of the system.

Based on these results, the hydraulic parameters of the model (Van Genuchten parameters) were calibrated, and a numerical model capable of simulating flow profiles and volumetric liquid content with depth was implemented.

The results show that gasoline exhibits the highest percolation velocity, followed by diesel, while crude oil shows a considerably slower advance and a greater tendency toward retention, especially in sandy soil. Likewise, significant differences were observed between the two soil types, with the clayey soil exhibiting lower hydraulic conductivity and greater resistance to flow. The numerical model was able to accurately reproduce the experimental trends, both in the onset times of dripping and in the stabilization of flow.

Overall, this study enables the estimation of the penetration depth of different hydrocarbons under potential loss-of-containment scenarios and constitutes a supporting tool for environmental management and decision-making, contributing to improved risk assessment.

Índice

1. Introducción	9
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. Metodología	14
3.1 Hidrocarburos de interés	14
3.2 Muestras de suelo seleccionadas	14
3.3 Descripción de principales propiedades físicas	15
3.3.1 Porosidad	15
3.3.2 Permeabilidad intrínseca	15
3.3.3 Saturación efectiva	16
3.3.4 Conductividad hidráulica	16
3.3.5 Presión capilar	17
3.4 Modelo teórico predictivo	18
3.4.1 Formulación física y matemática del modelo	18
3.4.2 Condiciones iniciales y de frontera	20
3.5 Procedimiento experimental	21
3.5.1 Materiales para el equipo	21
3.5.2 Procedimiento del experimento	22
3.5.3 Granulometría del suelo	23
3.6 Estimación de parámetros de Van Genuchten	24
4. Resultados y discusión	25
4.1 Resultados experimentales	25
4.1.1 Percolación en muestra de suelo 1	25

4.1.2	Percolación en muestra de suelo 2	28
4.1.3	Ajuste de parámetros	31
4.2	Perfiles de combustible en suelos	32
4.2.1	Descripción de la gasolina en la muestra de suelo 1	32
4.2.2	Descripción de la gasolina en la muestra de suelo 2	34
4.2.3	Descripción del crudo en la muestra de suelo 1	36
4.2.4	Descripción del crudo en la muestra de suelo 2	38
4.3	Comparación percolación entre los hidrocarburos de estudio	40
4.3.1	Muestra del suelo 1	40
4.3.2	Muestra del suelo 2	42
5.	Conclusión	45
6.	Referencias	47
7.	Anexos	49
7.1	Determinación del flujo de Darcy a partir de mediciones experimentales	49
7.2	Gráficas de ajuste de parámetros	50
7.2.1	Muestra de suelo 1 – Gasolina	50
7.2.2	Muestra de suelo 1 – Diesel	50
7.2.3	Muestra de suelo 1 – Crudo	51
7.2.4	Muestra de suelo 2 – Gasolina	51
7.2.5	Muestra de suelo 2 – Diesel	52
7.2.6	Muestra suelo 2 – Crudo	52
7.3	Perfil de combustible del diesel	53
7.3.1	Descripción del diesel en la muestra de suelo 1	53
7.3.2	Descripción del diesel en la muestra de suelo 2	55
7.4	Medición de humedad	57
7.4.1	Humedad inicial	57

7.4.2	Humedad de saturación	57
7.5	Características de las muestras de suelo	58
7.5.1	Propiedades de las muestras de suelo	58
7.5.2	Imágenes de las muestras de suelo	58
7.6	Resultados granulometría.....	60
7.6.1	Muestra del suelo 1.....	61
7.6.2	Muestra del suelo 2.....	62
7.7	Valores parámetros de Van Genuchten	63
7.8	Valores de permeabilidad	64
7.9	Efecto de la porosidad	64
7.10	Características del petróleo crudo	65
7.10.1	Clasificación según grado API	65
7.10.2	Correlación para cálculo de viscosidad	65
7.11	Estudio de suelo en la octava región	66
7.11.1	Composición del suelo en la costa de la región	67
7.11.2	Mapa geológico del sector costero de la provincia de Concepción	68

1. Introducción

El suelo es un sistema natural complejo compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. Esta capa delgada se ha formado muy lentamente a lo largo de los siglos mediante la desintegración de las rocas superficiales, proceso conocido como meteorización [14], lo cual tiene una gran influencia en la composición y textura del suelo, es decir, las proporciones relativas en masa de las fracciones de minerales primarios (arcilla, arena y limo) [13]. Para comprender el comportamiento del suelo frente al agua y otros fluidos, es importante conocer su textura y composición, ya que estos dependen directamente del tamaño de las partículas. Cuando predominan partículas grandes, el suelo tendrá una textura arenosa, es decir, permite un movimiento rápido del fluido debido a la gravedad y capacidad de drenaje, resultando en una infiltración veloz. Por el contrario, cuando predominan partículas más finas el suelo retendrá el fluido por más tiempo y presenta un movimiento más lento [29].

Para clasificar los suelos según su textura se utilizan herramientas gráficas como los triángulos texturales (figura 1), que permiten interpretar los resultados obtenidos a partir de exámenes granulométricos [8]. La granulometría consiste en ingresar una muestra, en este caso de suelo, por una columna de tamices de diferente tamaño de apertura, esto según el tamaño de “grano” quedará retenido en uno u otro tamiz, a partir de ello es que se obtiene la composición del suelo en porcentaje, para posteriormente, revisar el siguiente diagrama y definir de mejor manera la muestra de suelo.

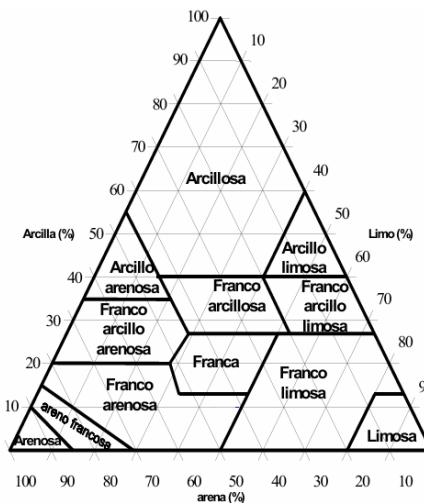


Figura 1. Triángulo textural [8].

Desde el punto de vista físico, el suelo se puede entender como un medio poroso, compuesto por una red de espacios vacíos que se encuentran entre las partículas minerales y orgánicas que lo conforman, permitiendo el movimiento y almacenamiento de fluidos como el agua y el aire.

La porosidad representa la proporción entre el volumen de esos espacios vacíos y el volumen total de un lecho.

Esta característica resulta fundamental en la producción agrícola, ya que regula el movimiento y la disponibilidad de agua, aire y nutrientes para las raíces de las plantas. La distribución del tamaño de los poros determina la capacidad del suelo para almacenar agua y permitir la aireación en la zona radicular, favoreciendo el desarrollo vegetal. Tanto la porosidad como la variación en el tamaño de los poros influyen directamente en las propiedades hidráulicas del suelo, como la conductividad hidráulica, la retención e infiltración de agua, y la capacidad de agua disponible para las plantas [16]. Sin embargo, esa misma capacidad que hace del suelo un medio vital para la vida vegetal, también lo convierte en un receptor vulnerable ante la infiltración de otras sustancias que pueden terminar afectando la calidad del suelo.

Ante esta situación, nace la curiosidad por saber cuál es la condición actual del suelo de la zona costera de la región del Bío - Bío y que comportamiento tendría este ante una posible pérdida de contención de producto.

Actualmente, ENAP (Empresa Nacional del Petróleo) recibe crudo tanto por vía marítima, mediante barcos desde el puerto, como a través de oleoductos. Dado que el crudo que llega a la refinería es de diversa composición, este es enviado inicialmente a estanques de mezcla, donde se preparan para alcanzar las condiciones necesarias para ingresarlo al proceso. Posteriormente, el crudo se envía a la unidad de fraccionamiento primario, la cual permite separarlo en las diferentes fracciones de hidrocarburos. Luego estas corrientes entran a otros procesos que finalmente permiten obtener productos como gasolina (93 y 97 octanos), LPG (gas licuado de petróleo o propano, butano, propileno, etc), diesel, kerosene, fuel oil, entre otros.

Una vez los productos salen de las respectivas áreas de proceso, estos se envían a los estanques, donde se certifican de acuerdo a la normativa nacional vigente. Finalmente, para la entrega de productos, esta se puede realizar a través de gaseoductos, poliductos, camiones o vía marítima.

Actualmente no se tiene una herramienta de modelación para predecir el comportamiento de un fluido en el suelo, es decir, se desconoce a qué profundidad puede infiltrar cada hidrocarburo y en cuanto tiempo desde que comenzó la fuga. Esta falta de información resulta relevante, ya que las pérdidas de contención de hidrocarburos pueden seguir generando efectos negativos mientras se terminan de implementar los planes de contingencia [1].

Los hidrocarburos, constituyen uno de los principales recursos energéticos a nivel mundial, siendo ampliamente utilizados en la generación de energía, el transporte y la industria [9]. Esto se ve reflejado actualmente en el informe anual de “Perspectivas de la Energía en el Mundo”, donde la AIE (Agencia Internacional de la Energía) pronosticó que la demanda de petróleo mundial alcanzará un valor de 113 millones de barriles diarios a mediados de siglo, lo que supone un aumento del 13% respecto al consumo del 2024 [30]. Entonces ante una mayor exigencia en la producción y manejo del petróleo, es que se debe mejorar la estimación teórica ante pérdidas de contención y/o fugas inesperadas a lo largo de las diferentes etapas de su cadena de valor, es decir, durante la extracción, transporte, almacenamiento y refinación, incluso, entre las causas antropogénicas más habituales de contaminación de suelos se destaca la industria, a la minería y la gestión de desechos [15].

En este contexto, resulta de interés analizar la percolación de hidrocarburos en el suelo. Para ello, en este estudio se considerarán tres categorías de hidrocarburos: livianos, intermedios y pesados (gasolina, diesel y crudo, respectivamente), los cuales representan parte de los compuestos manejados en la refinería.

En base a lo anteriormente mencionado, es que el presente trabajo se enfoca en estudiar el comportamiento de dichos hidrocarburos al infiltrarse en suelos típicos de la región del Bío-Bío, específicamente zona costera, con énfasis en su dispersión vertical. Para ello, se emplea la ley de Darcy como base para describir el flujo de líquidos en medios porosos, en conjunto de los parámetros de Van Genuchten, los cuales permiten caracterizar el suelo en cuanto a su tamaño y dispersión de los poros, además se usan algunas parametrizaciones del mismo autor para representar la relación entre el contenido de humedad y la presión capilar, entre otras propiedades físicas.

La elección de un modelo unidimensional en dirección vertical busca simplificar el sistema sin perder la capacidad de captar el fenómeno de interés: el avance del hidrocarburo en profundidad. El enfoque aplicado permitirá estimar parámetros clave como el tiempo requerido para alcanzar

determinada profundidad, el perfil de saturación del fluido y la extensión de terreno potencialmente infiltrado.

Esta información resulta valiosa no solo para comprender y modelar el comportamiento físico del sistema, sino también para apoyar la toma de decisiones en caso de incidentes reales de infiltración.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Modelación teórica y validación experimental del derrame de hidrocarburos sobre suelos.

2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar modelo fenomenológico que describa la variación espacio - temporal del contenido de hidrocarburos en suelos.
- Diseñar un procedimiento experimental para validar el modelo fenomenológico.

3. Metodología

3.1 Hidrocarburos de interés

Con el objetivo de caracterizar fluidos representativos que se mueven en el país, es que se definen tres tipos, gasolina, diesel y crudo (intermedio, revisar Anexo 7.10, donde se especifica su identificación). A continuación, se muestra una tabla resumen de las propiedades de los hidrocarburos de interés:

Tabla 1. Tabla resumen de propiedades de los hidrocarburos de interés.

Propiedad	Gasolina (20°C)	Diesel (40°C)	Crudo (20°C)
Densidad (kg/m^3)	739.7	834.9	874
Viscosidad ($kg/m * s$)	0.00035	0.0023	0.015

Dado que la viscosidad del crudo no se determinó experimentalmente en laboratorio, se recurrió al uso de correlaciones empíricas con el fin de estimar un valor aproximado de esta propiedad (ver Anexo 7.10.2). La temperatura considerada para dicho cálculo corresponde a la temperatura de almacenamiento del crudo [11]. En el caso del diesel, la viscosidad se obtuvo a la temperatura disponible en laboratorio en ENAP, que correspondía a las condiciones bajo las cuales se realizó la medición experimental. Por último, la viscosidad y densidad de la gasolina fue determinada a temperatura ambiente en el laboratorio del departamento de Ingeniería Química, pues esa temperatura también corresponde a su condición de almacenamiento.

3.2 Muestras de suelo seleccionadas

Se tomaron dos muestras de suelo en distintas zonas, con el objetivo de obtener material representativo del sector costero. En términos generales, los suelos presentes en el área presentan características similares debido a la geografía de la zona. Esto se confirma al revisar el mapa geológico (Anexo 7.11.2), donde se aprecia que la zona donde se emplaza la refinería corresponde a un mismo tipo de formación de suelo.

La primera ubicación corresponde a un tipo de suelo, a primera vista, más arenoso y con gravilla de diverso tamaño.

La segunda zona de interés corresponde a un tipo de suelo de características más arcillosa y rocas de mayor tamaño, también contenía arena, pero su textura al tacto era mucho más suave y ligera.

En el Anexo 7.5.2 se puede observar en más detalle las características físicas de las muestras utilizadas en este estudio.

3.3 Descripción de principales propiedades físicas

El comportamiento hidrodinámico del medio poroso está influenciado por las propiedades físicas tanto del fluido como del sólido involucrado, en este caso hidrocarburos y el suelo, respectivamente. A continuación, se presentan las definiciones de las principales propiedades físicas que permiten entender este fenómeno de transporte.

3.3.1 Porosidad

La porosidad de un material se define como la relación entre el volumen vacío y el volumen total del material.

De manera más específica, la porosidad del suelo está representada por la cantidad de huecos existentes respecto al volumen total del mismo. Además, la porosidad depende de la textura, estructura y actividad biológica del suelo, a su vez, la facilidad de transporte de un fluido dependerá del tamaño de poro.

3.3.2 Permeabilidad intrínseca

La permeabilidad intrínseca (k) es una propiedad fundamental del lecho poroso, ya que representa qué tan fácilmente puede desplazarse un fluido a través de él. Valores altos de k indican baja resistencia al flujo, mientras que valores bajos reflejan un medio más restrictivo [21].

Esta propiedad está directamente relacionada con la porosidad, pues a mayor tamaño de poro, se espera que la permeabilidad aumente.

Se dice también que un material es permeable cuando contiene vacíos continuos, estos vacíos existen en todos los suelos, incluyendo las arcillas más compactas [2].

Es importante distinguir entre la permeabilidad intrínseca y la permeabilidad real o hidráulica. La primera depende únicamente de las características del medio (como su estructura y porosidad) [19], mientras que la segunda incorpora además las propiedades del fluido que lo atraviesa, tales como la viscosidad y la densidad [17].

De manera experimental hay varios métodos que se utilizan para determinar la permeabilidad del suelo, los cuales pueden clasificarse en métodos de laboratorio, de campo y métodos indirectos [25]. Entre ellos se encuentran:

- a. Métodos de laboratorio
 - Permeámetro de carga constante.
- b. Métodos de campo
 - Ensayo de nivel variable o método de Porchet.
- c. Métodos indirectos
 - A partir de granulometría.

Este último es de especial interés, ya que a partir de la granulometría es posible obtener una caracterización completa del suelo, lo cual permite estimar la permeabilidad intrínseca.

3.3.3 Saturación efectiva

Esta propiedad representa el contenido de solución en el suelo, lo cual no depende solo del flujo de riego, sino también de la propia humedad que tenga el suelo previamente, en este caso corresponde a agua. Esta humedad previa puede generar un bloqueo y dificultar el paso de hidrocarburos, por lo que resulta fundamental tener en cuenta esta propiedad en el análisis. El contenido de líquido en un medio poroso se expresa en términos de su saturación efectiva, S_e [21].

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

Donde θ es el contenido volumétrico de líquido (m^3/m^3), θ_r es el contenido volumétrico residual de líquido (m^3/m^3) y θ_s es el contenido volumétrico de saturación de líquido (m^3/m^3).

Físicamente, representa la fracción de poros drenables que ya está llena (en este caso) de hidrocarburo. Entonces, a un mayor valor de S_e , se entiende que habrá más fluido móvil en el medio poroso, por tanto, generará un flujo gravitacional mayor.

3.3.4 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es una función entre el sólido como del fluido que lo atraviesa, lo cual que refleja la relativa facilidad del flujo de líquido a través de medios porosos y se encuentra entre las propiedades de los materiales más variables en toda la ingeniería.

La conductividad hidráulica está dada mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{k * g * \rho}{\mu} * k_r(\theta) \quad (2)$$

Donde, K corresponde a la conductividad hidráulica (m/s), k es la permeabilidad intrínseca del lecho (m^2), g la aceleración de gravedad (m/s^2), ρ y μ son la densidad (kg/m^3) y viscosidad del fluido ($kg/(m * s)$).

La función $k_r(\theta)$ permite establecer la relación entre la conductividad hidráulica y el grado de saturación del medio poroso. En condiciones de saturación total, esta función toma el valor de 1, y la conductividad hidráulica corresponde a la conductividad hidráulica saturada (K_s). Para medios no completamente saturados, el valor de $k_r(\theta)$ se encuentra entre 0 y 1.

En este trabajo, se ha utilizado la expresión desarrollada por Van Genuchten en 1980 para describir el comportamiento de $k_r(\theta)$, la cual permite modelar esta relación de forma continua en función de la saturación efectiva [21].

$$k_r(\theta) = S_e^{0.5} * \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

Donde n y α son parámetros de Van Genuchten que definen la curva de retención (n es adimensional y α es de unidades m^{-1}) y m es un parámetro asociado a $n \rightarrow m = 1 - \frac{1}{n}$.

El parámetro “ α ” se interpreta como el inverso de la carga de presión de entrada de aire (o escala de succión), lo cual corresponde a la carga necesaria para drenar un poro saturado de fluido. Generalmente, los medios porosos con mayor diámetro de poro se caracterizan por valores mayores de α [7] ya que requieren menor presión para que ocurra el drenaje. Por otro lado, el parámetro “ n ” está relacionado a la distribución del tamaño de poro, donde generalmente, los suelos con una distribución más amplia de tamaños de poro se caracterizan por valores más pequeños de “ n ” [23], lo cual se refleja en un medio más heterogéneo y tortuoso.

3.3.5 Presión capilar

La presión capilar es definida como la diferencia entre la presión ejercida por un fluido que moja y la ejercida por la que no lo moja. Matemáticamente está dada por la siguiente relación:

$$P_c = P_{mm} - P_m \quad (4)$$

Donde P_c es la presión capilar (Pa), P_{mm} es la presión ejercida por el fluido que no moja el material (Pa), P_m es la presión ejercida por el fluido que moja el material (Pa).

La presión capilar puede entenderse físicamente como la tendencia que posee un medio poroso a absorber un fluido que lo moja o a rechazar aquel que no lo hace. Esta presión, al igual que la conductividad hidráulica, varía en función del grado de saturación del suelo y depende también de las características del fluido y del medio. Para el desarrollo del presente trabajo, se ha utilizado la expresión propuesta por Van Genuchten (1980) para modelar la presión capilar en medios porosos no saturados [21]. Esta relación se expresa matemáticamente como:

$$P_c = \frac{\rho * g}{\alpha} * \left(S_e^{\frac{-1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Dentro de esta expresión todos los términos poseen el mismo significado descrito anteriormente.

3.4 Modelo teórico predictivo

Para estudiar la dispersión de los hidrocarburos en un material poroso como lo es el suelo, es que se investigó acerca de un modelo teórico que permite predecir la dispersión de los hidrocarburos en el suelo, abordando a que profundidad llega el hidrocarburo, en cuanto tiempo se logra cierta profundidad y lo cual permitirá estimar la cantidad de tierra que se debe extraer para retirar la totalidad de hidrocarburo que se introdujo en la tierra.

3.4.1 Formulación física y matemática del modelo

El desarrollo del modelo se basa en el modelo de drenaje de pila de lixiviación [21], este ha sido adaptado a las condiciones particulares del sistema de estudio, para ello se han considerado una serie de suposiciones:

- El sistema está compuesto por tres fases: sólido, líquido y gas.
- Sistema es isotérmico y las propiedades físicas de los hidrocarburos se mantienen constantes.
- Régimen de flujo laminar.
- El flujo principal de fluido ocurre en la dirección vertical.
- El suelo está sometido a irrigación constante desde la parte superior.
- El fondo del lecho no presenta gradientes de contenido de humedad, pues se supone que pasa a un medio de resistencia despreciable a presión atmosférica.

- El modelo no considera la evaporación de líquido.
- La fuerza de fricción aire – líquido se considera despreciable y la presión de aire es constante.
- Los suelos elegidos no contienen hidrocarburo previamente, por lo que $\theta_r = 0$.

A continuación, se presentan las ecuaciones fundamentales que describirán la fluidodinámica del líquido a través de un lecho poroso.

La ecuación de Darcy modificada para medios no saturados [5] está dada por:

$$\underline{q} = -\frac{k_r(\theta) * k}{\mu} * \nabla(P - \gamma * z) \quad (6)$$

Donde $\underline{q}$ es la velocidad superficial del líquido (m/s), $k_r(\theta)$ es la permeabilidad relativa del lecho para la fase líquida (adimensional), μ es la viscosidad del líquido (kg/m), P es la presión total en el lecho (Pa), γ es el peso específico del líquido (N) y z corresponde a la coordenada vertical (positiva hacia abajo, m).

Por otro lado, se considera la conductividad hidráulica del lecho, la cual está dada mediante la expresión:

$$K(\theta) = \frac{k * g * \rho}{\mu} * S_e^{0.5} * \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (7)$$

Luego, empleando la definición de peso específico ($\gamma = g * \rho$) y reordenando la ecuación de Darcy se llega a la siguiente expresión:

$$\underline{q} = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + K(\theta) \quad (8)$$

Considerando la ecuación de continuidad (sin reacción química):

$$\nabla \underline{q} + \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación 8 en la 9 y considerando una dimensión queda lo siguiente:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial h} + K(\theta) \right] = 0 \quad (10)$$

Por último, se define el coeficiente de transporte $D(\theta)$:

$$D(\theta) = -\frac{K(\theta)}{\frac{\partial \theta}{\partial h}} \quad (11)$$

Reemplazando la ecuación 11 en la ecuación 10 queda la siguiente expresión.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right] = 0 \quad (12)$$

La ecuación 12 describe la evolución espacio temporal del contenido de líquido en un medio poroso en una dimensión, en este caso sería el contenido de líquido en el suelo en la dirección vertical.

Su solución depende del conocimiento de las condiciones iniciales y de frontera, así como de la manera en que las propiedades del medio varían con la humedad. Esta última dependencia se incorpora utilizando la formulación desarrollada por Van Genuchten [21].

A continuación, se tienen la expresión en términos de los parámetros de Van Genuchten.

- **Coefficiente de transporte**

$$D = \frac{\frac{k * g * \rho}{\mu} * \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2}{S_e^{0,5} * (\theta_s - \theta_r) * (m * n * \alpha) * \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m * \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (13)$$

Reemplazando la ecuación 13 en la ecuación 12 se tendrá que el sistema modelado queda formado por una ecuación diferencial parcial con coeficientes variables no lineales. Para resolver el modelo se utilizan métodos numéricos, precisamente el algoritmo de diferencias finitas de Cranck – Nicholson y el algoritmo de Thomas [21].

3.4.2 Condiciones iniciales y de frontera

- **Condición inicial:** $\theta = \theta_{inicial}$ a $t = 0$ y $z > 0$

Como condición inicial del sistema se tendrá el contenido volumétrico inicial del líquido en el lecho, el cual tiene un valor fijo según el suelo de estudio (detalle de cómo se obtiene este valor en el Anexo 7.4.1)

- **Condición de frontera superior:** $\left[-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right] = R(t)$ en $z = 0$ y $t > 0$

Esta condición de frontera define que se tendrá el flujo de irrigación desde la parte superior del medio poroso. Donde $R(t)$ es el flujo de irrigación (detalle del cómo se calcula en el Anexo 7.1).

- **Condición de frontera inferior**

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \text{ en } z = H \text{ y } t > 0$$

Esta condición de frontera demuestra que se tendrá que el contenido volumétrico de líquido permanece constante a una profundidad “H” en el medio poroso. Entonces, al considerar una profundidad mayor a H se tendrá drenaje libre.

3.5 Procedimiento experimental

Para establecer un punto de comparación con los resultados del modelo se propone el siguiente experimento.

3.5.1 Materiales para el equipo

La siguiente figura muestra el montaje experimental y los principales elementos que lo componen. Cada número corresponde a una parte específica del sistema:

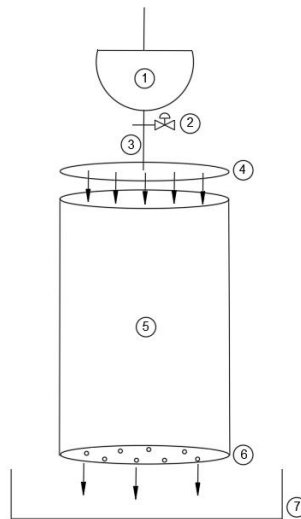


Figura 2. Esquema del montaje experimental de la columna de flujo. Donde: (1) Recipiente con hidrocarburo, (2) Válvula reguladora, (3) Manguera, (4) Placa perforada distribuidora, (5) Tubo cilíndrico de vidrio, (6) Placa perforada de retención y drenaje, (7) Recipiente graduado [Elaboración propia].

Adicionalmente es necesario tener: (1) Balanza de precisión, (2) Cronómetro, (3) Regla o calibre y (4) Guantes, gafas y zapatos de seguridad.

Es importante mencionar que la placa perforada superior es necesaria para lograr una distribución uniforme y evitar el “flujo preferencial”, el cual es un fenómeno donde el fluido que ingresa al suelo

se desplaza rápidamente a través de vías preferenciales (bioporos, grietas, etc.) [6], lo cual no permite una percolación homogénea a lo largo del lecho.

3.5.2 Procedimiento del experimento

La propuesta experimental consiste en simular la infiltración de un hidrocarburo en el suelo con el fin de evaluar su movilidad y comportamiento durante el proceso de percolación. Para ello, se emplearán dos muestras representativas de suelo, estas se ingresan dentro de un tubo cilíndrico de aproximadamente 15 cm de diámetro y 60 cm de alto, pero relleno hasta 45 cm de altura con la muestra de suelo. Estas muestras serán previamente tamizadas (tamiz de 0.06 pulgadas), para normalizarla y evitar que haya piedras muy grandes dentro de la columna.

En la parte superior del tubo se colocará un recipiente que contendrá el hidrocarburo seleccionado. Dicho recipiente estará conectado a un sistema de goteo, que se regulará con una válvula, lo que permitirá controlar el caudal de entrada al suelo. El hidrocarburo ingresará gradualmente en la columna, simulando un escenario de infiltración natural.

El efluente será recolectado en un recipiente en la parte inferior del sistema. Dicho recipiente estará graduado cada 50 ml, por lo que se registrará el tiempo cada vez que el volumen acumulado aumente en 50 ml. Esto finalmente permitirá medir el volumen percolado en función del tiempo.

La información obtenida se graficará para analizar la variación del flujo de salida a lo largo del experimento. Las mediciones terminarán una vez que el flujo de salida se estabilice, es decir, cuando se mantenga constante en el tiempo. Esta condición de estabilidad también corresponde a cuando el flujo de entrada es igual al flujo de salida.

A continuación, se presenta el equipo experimental:



Figura 3. Montaje experimental utilizado en la simulación de la infiltración de hidrocarburos en el suelo.

3.5.3 Granulometría del suelo

La granulometría es el análisis que determina la distribución de tamaños de las partículas del suelo, lo que permite conocer la proporción de grava, arena, limo y arcilla. En el método por tamizado, una muestra previamente secada se hace pasar por tamices de aberturas decrecientes, quedando retenidas las fracciones según su tamaño [12].

A continuación, se muestra una imagen del tamiz.

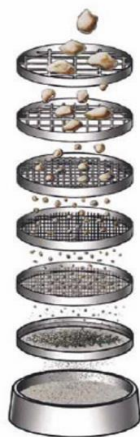


Figura 4. Esquema del proceso de tamizado mediante una columna de tamices de diferente apertura [12].

A partir de este es que se puede caracterizar el suelo y también estimar propiedades como la permeabilidad, esto en base al porcentaje que la muestra tengo de limo, arcilla, polvo, arena, entre otros.

3.6 Estimación de parámetros de Van Genuchten

El procedimiento consiste en resolver el modelo ajustando los parámetros n y α . A partir de valores iniciales coherentes con los rangos esperados (ver Anexo 7.7), se aplica un algoritmo de optimización de Matlab que ejecuta un proceso iterativo de búsqueda. De esta manera, se obtienen los valores óptimos de n y α que permiten reproducir con mayor precisión el comportamiento del drenaje observado.

A continuación, se tiene la figura 5 que ilustra el proceso iterativo y su secuencia de resolución.

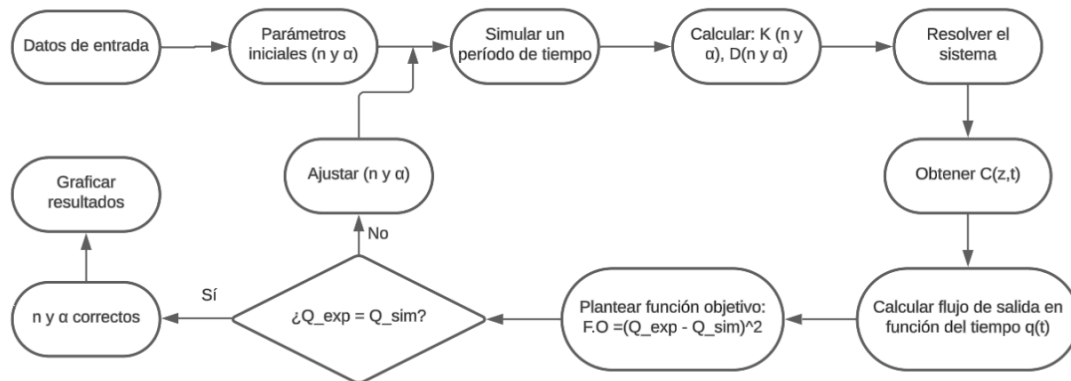


Figura 5. Procedimiento iterativo de resolución para el cálculo de n y α [Elaboración propia].

Como se muestra en esta figura, el proceso comienza con la definición de los datos de entrada, que incluyen el conjunto de mediciones experimentales del efluente, los parámetros físicos del sistema (altura del cilindro o profundidad esperada, densidad y viscosidad del fluido, permeabilidad intrínseca del suelo, humedad de saturación y residual), y la condición inicial de humedad del suelo.

Con estos datos, en cada iteración, se calculan las propiedades hidráulicas del medio (K y D), y se resuelve numéricamente el sistema de ecuaciones que describe la evolución de la humedad en el tiempo y en la profundidad del suelo. El resultado de esta simulación permite estimar el flujo de salida teórico (efluente), el cual se compara con el valor experimental. Si existe una diferencia significativa, el algoritmo ajusta nuevamente los parámetros n y α y repite la simulación. Este ciclo continúa hasta que la diferencia entre ambos efluentes sea mínima, momento en el cual se converge a los valores óptimos de n y α , que representan adecuadamente el comportamiento hidráulico del suelo ensayado.

4. Resultados y discusión

Se busca estimar y analizar a que profundidad llega el hidrocarburo, para esto se hicieron experimentos con los tres tipos de combustibles ingresándolos en dos diferentes tipos de suelo, fijando el flujo de entrada y midiendo cada cierto tiempo el flujo de salida. Cada suelo utilizado fue analizado con granulometría para su caracterización (resultados granulometría en Anexo 7.6).

4.1 Resultados experimentales

Para iniciar cada experimento, se ingresó la muestra de suelo en el tubo, se añadió el respectivo combustible y luego se abrió la válvula reguladora. Debido a la diferencia de válvulas usadas e inexperiencia en su manipulación, no fue posible tener el mismo flujo inicial en todos los experimentos, sin embargo, una vez iniciados, se procuró mantener un grado de apertura constante a lo largo de estos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos, los cuales permiten determinar tanto el flujo de entrada como la variación del flujo de salida. Esta información es fundamental para estimar el avance de los hidrocarburos dentro del suelo.

4.1.1 Percolación en muestra de suelo 1

Primero se realizó el experimento con gasolina, dado que, al ser el fluido de menor densidad y viscosidad de los tres combustibles estudiados, se esperaba que su percolación fuera rápida. Sin embargo, debido al bajo grado de apertura de la válvula, el sistema demoró más de 2 horas en estabilizarse, obteniendo la siguiente gráfica de caudal de salida.

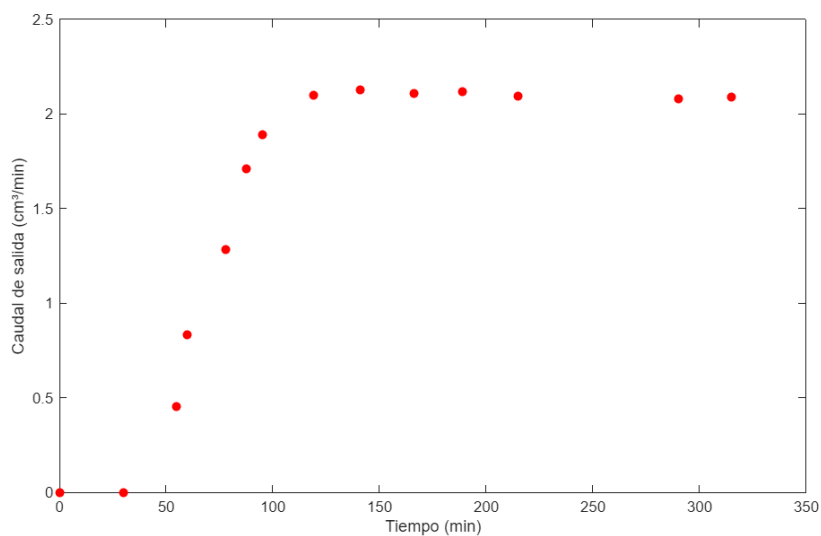


Figura 6. Variación de caudal de salida en el tiempo usando gasolina.

Se observa que, a medida que transcurre el tiempo, el caudal aumenta gradualmente hasta estabilizarse en aproximadamente $2 \text{ cm}^3/\text{min}$, valor que corresponde al caudal de entrada. Este flujo es relativamente bajo y podría representar un escenario de fuga leve. No obstante, pese a su reducido caudal, la gasolina mostró un avance rápido, ya que en menos de una hora recorrió los 45 cm de la columna de suelo. Este comportamiento se explica principalmente por la textura arenosa del suelo, que favorece una mayor permeabilidad. A ello se suman las propiedades de la gasolina, cuya baja viscosidad facilita el establecimiento temprano de caminos de percolación.

En el caso del diesel, el goteo comenzó cerca de las 3 horas de experimento, es decir, en un lapso de 3 horas el diesel recorrió y saturó 7948 cm^3 (representa el volumen contenido en el tubo, equivalente a 0.008 m^3 de suelo), lo cual da una velocidad de infiltración considerable para ser un flujo de $1.93 \text{ cm}^3/\text{min}$.

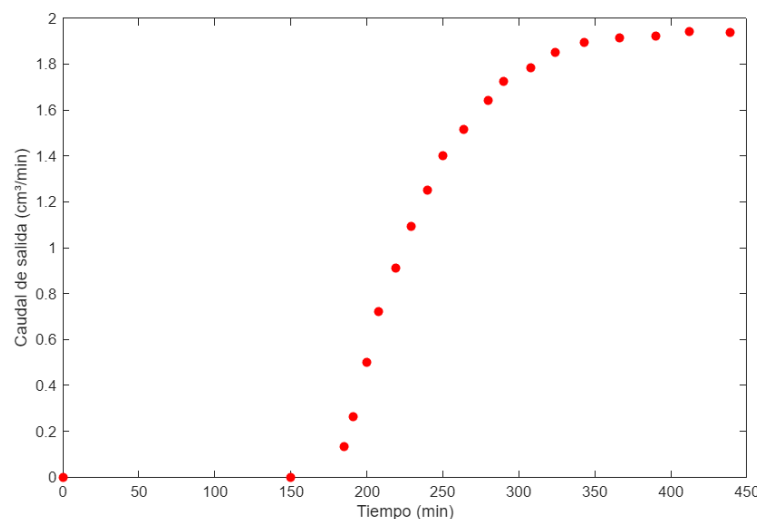


Figura 7. Variación de caudal de salida en el tiempo usando diesel.

Este comportamiento también se explica por la textura arenosa del suelo, que ofrece baja resistencia hidráulica y facilita el avance del fluido. A ello se le suman las propiedades del diesel, cuya viscosidad es mayor que la de la gasolina, pero aún es lo suficientemente baja para permitir un desplazamiento relativamente rápido a través de los poros del suelo. Como resultado, el flujo de salida aumentó progresivamente hasta estabilizarse aproximadamente a las 7 horas después del inicio del experimento. Esto se traduce en una infiltración eficiente y en un aumento acelerado del caudal de salida hasta llegar al estado estacionario, lo cual se evidencia en la pendiente que muestra la curva.

El tercer y último combustible estudiado es el crudo. Inicialmente se observó un ingreso constante del hidrocarburo en el suelo, es decir, era absorbido sin presentar acumulación superficial. Sin embargo, a medida que transcurrió el tiempo, aproximadamente a las tres horas de experimento, la saturación en la parte superior de la columna comenzó a incrementarse, lo que disminuyó progresivamente la capacidad de infiltración del suelo. Como consecuencia, el sistema alcanzó una condición cercana a la saturación y comenzó a generar una altura de líquido sobre la superficie.

Debido al aumento excesivo de esta altura, se decidió cerrar la válvula. Sin embargo, el monitoreo del goteo continuó por tres horas más, momento en el cual el sistema alcanzó una condición cercana al estado estacionario, obteniéndose la siguiente gráfica:

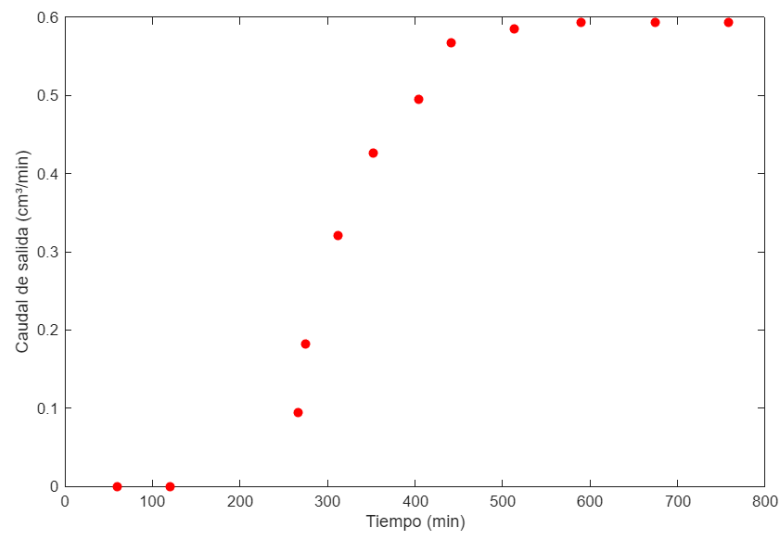


Figura 8. Variación de caudal de salida en el tiempo usando crudo.

Este comportamiento del suelo frente a un fluido tan denso como lo es el crudo (en este caso crudo intermedio, detalle en Anexo 7.10) evidencia un proceso de infiltración lento y tiende más a la acumulación superficial de líquido que a la percolación, siendo más probable que se expanda de manera horizontal que verticalmente.

Lo anterior se explica porque el crudo satura rápidamente los poros y su alta viscosidad reduce su movilidad. Como resultado, a lo largo de experimento se llega a un momento donde el flujo impuesto de irrigación supera la capacidad del suelo de infiltrar ($q_{irrigación} > q_{infiltración}$). Bajo esa condición, el exceso de fluido no infiltrado se acumula en la superficie.

Incluso varias horas después de detener la irrigación y de no realizar más mediciones, la altura de líquido disminuyó entre 1 y 1.5 cm, lo cual demuestra que este suelo, contrario a lo que se creía inicialmente, posee características en su composición que permiten un avance muy lento del crudo y un elevado grado de retención de este en la muestra de suelo 1.

4.1.2 Percolación en muestra de suelo 2

En la figura 9 se muestra la variación del caudal en el experimento realizado con gasolina en la segunda muestra de suelo. En este caso, debido al bajo flujo inicial y por el montaje experimental, se generó una burbuja en la boquilla de la válvula reguladora, lo cual obstruyó parcialmente el flujo. Para desplazar dicha burbuja y evitar que se detenga el flujo, fue necesario aumentar levemente el grado de apertura de la válvula. Sin embargo, esta acción provocó un retraso en la llegada al estado estacionario, lo que se refleja en la forma de la curva, donde se generan pequeñas “oscilaciones”, evidenciando la sensibilidad del sistema ante la variación del flujo de entrada. Finalmente, se alcanzó el estado estacionario aproximadamente 7 horas después de iniciar el experimento con un caudal de $4.8 \text{ cm}^3/\text{min}$.

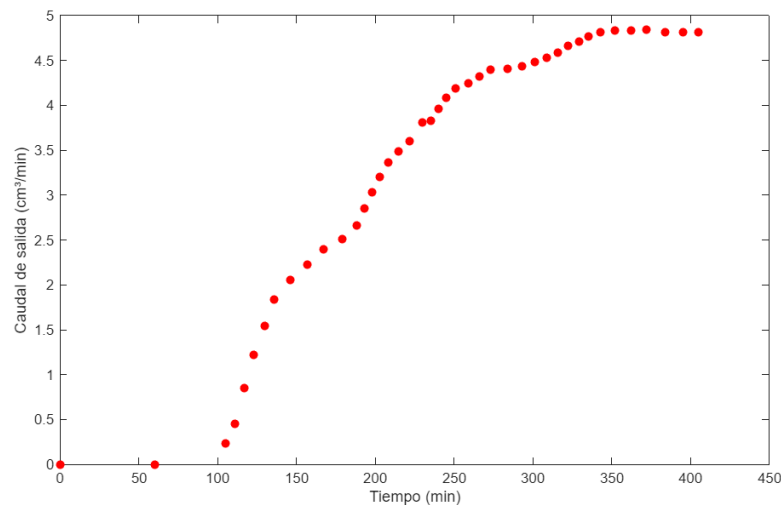


Figura 9. Variación de caudal de salida en el tiempo usando gasolina.

El tiempo requerido para que la gasolina percolara la columna de suelo, además del efecto asociado a la formación de burbujas, se vio influenciado principalmente por la composición del suelo. En comparación con la muestra 1, esta presenta una textura de grano más pequeño y contenía arcillas en su composición. Las arcillas tienden a retener el líquido y ralentizar el flujo dentro del suelo, dado que sus partículas son finas y reducen el tamaño de poro, lo que explica el avance más lento que se observa durante el experimento.

En el caso del diesel, se observa que el caudal de salida aumenta progresivamente, iniciando el goteo cerca de una hora desde que inicia el experimento. Posteriormente, el flujo se estabiliza pasado dos horas desde que comienza la irrigación, alcanzando un caudal de $5.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ aproximadamente. A lo largo del experimento también se produjo la formación de una burbuja asociado a lo mismo que en el caso anterior, sin embargo, este fenómeno no generó una interrupción evidente en el caudal de salida, ya que el sistema logró alcanzar el estado estacionario.

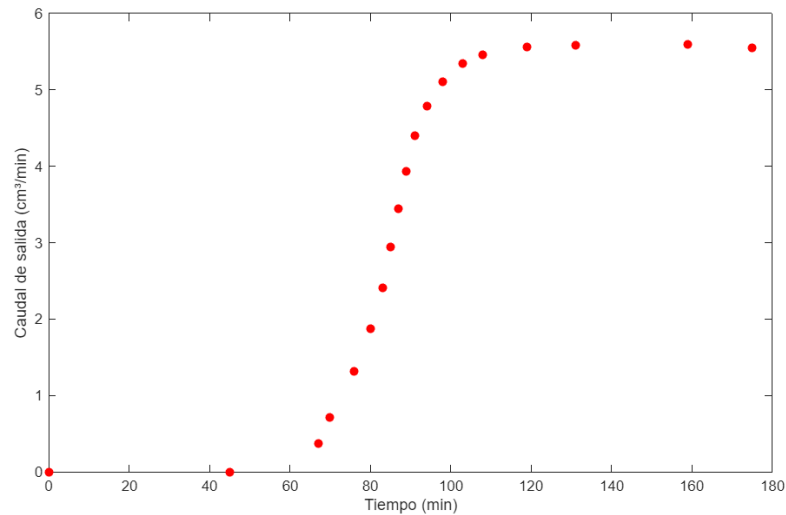


Figura 10. Variación de caudal de salida en el tiempo usando diesel.

El comportamiento observado refleja un proceso de percolación relativamente lento, característico de esta muestra de suelo. Mas allá de las diferencias del caudal de entrada, lo que afecta el avance del fluido es la composición del suelo. A esto se le suman los efectos de las propiedades del diesel, ya que, debido a su mayor viscosidad, este tenderá a presentar un avance más lento en comparación con hidrocarburos más livianos.

Como último experimento de esta sección, se ingresó crudo al sistema con el objetivo de evaluar su comportamiento en la segunda muestra de suelo, obteniendo la siguiente gráfica de caudal de salida:

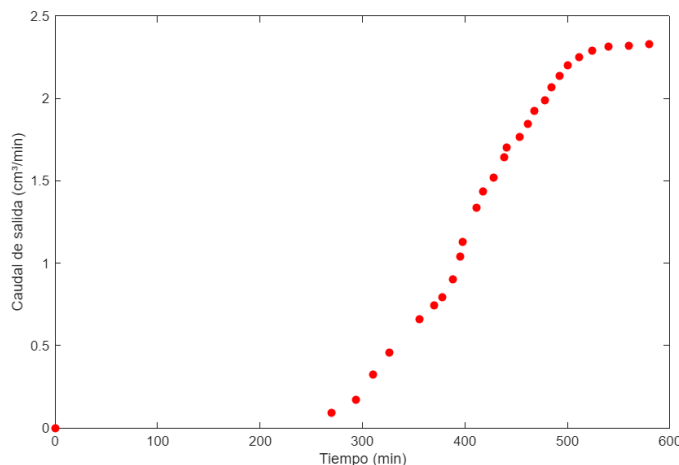


Figura 11. Variación de caudal de salida en el tiempo usando crudo.

Como se esperaba de esta muestra de suelo, la percolación del crudo fue lenta, atravesando la columna de 45 cm aproximadamente cuatro horas después de iniciar el experimento. Posteriormente, el caudal de salida aumentó de manera gradual hasta alcanzar un valor cercano a los $2.4 \text{ cm}^3/\text{min}$. Durante un momento del ensayo se observó una leve disminución del caudal de entrada, por lo que, para mantener el flujo constante, fue necesario abrir un poco la válvula, lo cual se refleja en la gráfica.

El sistema comenzó a estabilizarse cerca de las ocho horas desde de que se inició la irrigación. Los primeros 20 cm de columna fueron recorridos en alrededor de dos horas, lo cual da una idea de la velocidad de avance del crudo en esta muestra.

En este caso, no se evidenció la formación de la altura de líquido en la superficie, lo que indica una menor retención en comparación con la muestra 1. Este comportamiento sugiere que dicha muestra presenta una característica particular en su composición que favorecen la retención del crudo, dado este fenómeno no se observó en ninguno de los experimentos anteriores.

4.1.3 Ajuste de parámetros

Luego de realizar los experimentos, se ingresa el flujo de salida experimental como set de datos y se inició la simulación, obteniendo, mediante un proceso iterativo, los valores de los parámetros α y n .

Tabla 2. Resumen resultados de los parámetros de Van Genuchten obtenidos de la simulación.

Parámetro	Muestra de suelo 1			Muestra de suelo 2		
	Diesel	Gasolina	Crudo	Diesel	Gasolina	Crudo
$\alpha (m^{-1})$	2.72	4.70	2.40	0.35	0.06	0.22
n (adimensional)	1.41	1.47	1.55	1.92	1.56	1.62

Para la muestra 1, el parámetro α está en un valor promedio para suelos de textura arenosa, siendo consistente con la literatura. Sus valores relativamente elevados indican que se requiere una menor presión para drenar los poros, lo que se asocia a tamaños de poro mayores, por tanto, tendrá una mayor tendencia al drenaje del fluido.

Por otro lado, la muestra 2 presenta menores valores de α , lo cual indica que se requiere una mayor presión para drenar un poro saturado. Esto se interpreta como que la muestra presenta poros más pequeños, característicos de suelos más arcillosos, los cuales tienden a la retención de fluido en los microporos. Este resultado es también consistente con lo observado en la muestra de suelo.

Respecto al parámetro n , ambas muestras presentan valores relativamente elevados, lo que sugiere que la distribución de tamaños de poros es relativamente uniforme y presenta caminos de flujo menos tortuosos, lo cual favorece la percolación de fluidos, tanto en la muestra arenosa como en la arcillosa. Este comportamiento se verá reflejado posteriormente en perfiles más abruptos, los cuales se mostrarán en la sección siguiente.

Es importante de señalar la diferencia observada entre los valores obtenidos en los ajustes del α del diesel y crudo en comparación con el de gasolina en la muestra 2, a pesar del buen ajuste (Ver anexo 7.2). Esta discrepancia puede estar asociada a las propiedades físicas de ambos hidrocarburos, como la tensión superficial y presión capilar de cada uno con la muestra. Así mismo, no se descarta la existencia de errores experimentales (como la medición de tiempo inexacta para un avance determinado del volumen), lo cual puede repercutir en la precisión del ajuste.

En este contexto, los parámetros de Van Genuchten se ajustan principalmente para representar el fluido efectivo que infiltra, más que entregar una caracterización absoluta del suelo. Sin embargo, estos parámetros permiten obtener una aproximación del comportamiento hidráulico de los suelos en estudio. Comparando los resultados obtenidos con los reportados en literatura, se observa que los parámetros estimados son consistentes con los rangos esperados (Ver anexo 7.7). Por tanto, se puede considerar que se describe adecuadamente a las muestras de suelo de tipo arenosa y arcillosa, respectivamente.

4.2 Perfiles de combustible en suelos

A partir de los resultados anteriores, se pueden obtener los perfiles del contenido de combustible en los suelos. Considerando la misma profundidad utilizada en el laboratorio (45 cm) y su respectivo flujo de irrigación, se podrá analizar en detalle cómo es la percolación de los diferentes hidrocarburos en cada muestra para la situación planteada. A continuación, se muestran los diferentes perfiles obtenidos (descripción del diesel se encuentra en el anexo 7.3).

4.2.1 Descripción de la gasolina en la muestra de suelo 1

Ingresando el flujo experimental, el modelo da la siguiente representación de cómo es la variación del flujo de salida.

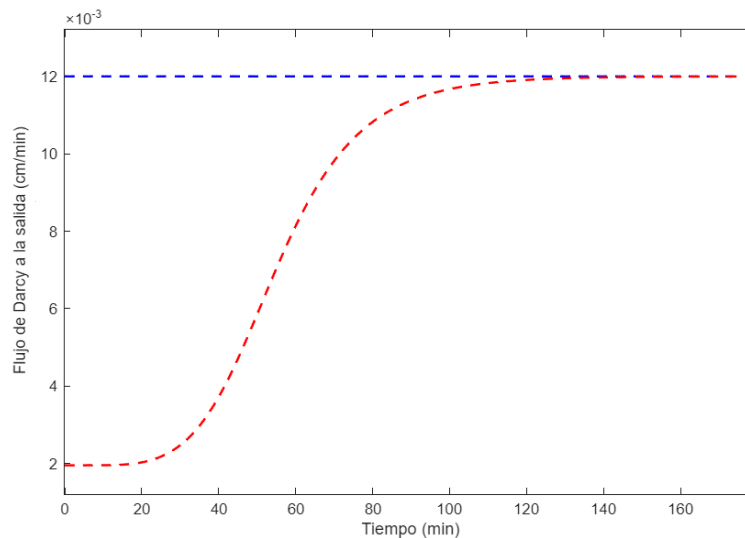


Figura 12. Variación del flujo de Darcy que entrega el modelo. Donde (--) azul es el flujo de salida y (--) rojo es el flujo de entrada.

Se observa que el flujo de salida comienza a aumentar transcurrido aproximadamente 40 minutos desde el inicio de la irrigación, alcanzando el estado estacionario, es decir, la igualdad entre el flujo de entrada y de salida, cerca de las dos horas y media.

Comparando este resultado con el obtenido de manera experimental (figura 6), se aprecia que el aumento de flujo de salida ocurre en tiempos similares (a los 30 – 40 minutos), y que el estado estacionario también se alcanza dentro del mismo intervalo de tiempo (entre 110 a 130 minutos de irrigación). Por lo que, en este caso, se puede afirmar que el modelo reproduce de manera adecuada el comportamiento observado experimentalmente.

Sin embargo, al inicio de la curva el modelo presenta un leve aumento de flujo, a diferencia de lo que sucede en el experimento. Este comportamiento puede deberse a la alta sensibilidad de la conductividad hidráulica respecto a los parámetros de Van Genuchten y a las propiedades físicas del hidrocarburo, en este caso gasolina, siendo la de menor viscosidad. En particular, el alto valor de α implica que se necesita un pequeño valor de saturación efectiva para que exista conectividad entre los poros y se permita el flujo, lo que hace que la conductividad hidráulica no saturada sea distinta de cero en los primeros instantes. Como resultado, el modelo interpreta que ya hay fluido disponible para mover desde el inicio de la simulación.

Teniendo el tiempo donde se llega al estado estacionario, se procede a graficar el perfil de la gasolina en la muestra de suelo 1.

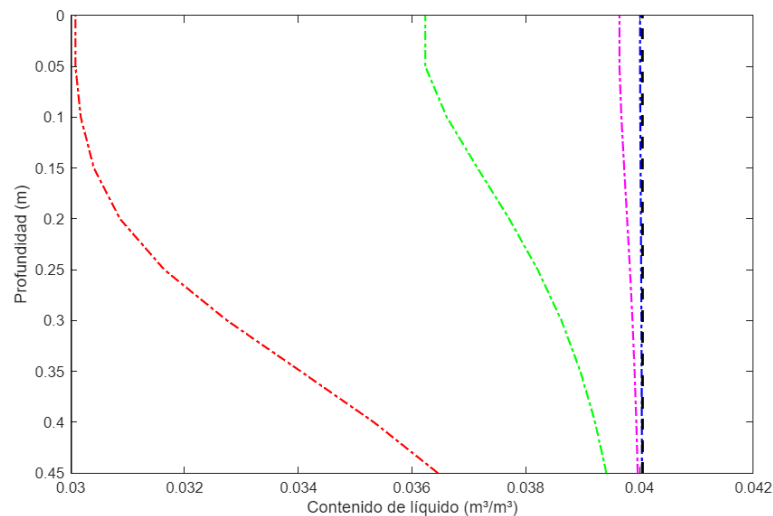


Figura 13. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 1 con gasolina. Donde (-.) rojo es el perfil a los 18 min, (-.) verde es el perfil a los 54 min, (-.) morado es el perfil a 1 hora y 30 min y (-.) azul es el perfil a las 2 horas desde que comenzó la irrigación, (-) corresponde a la condición inicial (tiempo cero) y (- -) negro es la condición final de humedad a las 3 horas de comenzada la irrigación.

En la figura 13 se observa la evolución del contenido de líquido a lo largo de la columna de suelo para distintos tiempos de simulación, correspondiente a la percolación de gasolina en la muestra 1.

Inicialmente, el perfil es casi uniforme y se mantiene cercano a su condición inicial (humedad inicial de $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$), lo que indica que el suelo está relativamente seco. Bajo estas condiciones, la conductividad hidráulica es baja, por lo que el desplazamiento de fluido a través de la muestra es lento.

A medida que transcurre el tiempo y bajo el flujo constante impuesto en la superficie, la zona superior comienza a humedecerse primero, formándose un frente de humedad que progresivamente avanza hacia mayores profundidades. En esta región, el incremento del contenido de líquido conlleva un aumento de la saturación efectiva y por tanto de la conductividad hidráulica. Como consecuencia el fluido dispone de “caminos” cada vez más continuos para avanzar hacia capas más profundas del suelo.

Hacia el tiempo final de simulación, el perfil alcanza casi el estado estacionario, en el que la mayoría de los poros relevantes para el flujo ya están llenos de líquido y la presencia de aire es mínimo. En esa región la conductividad hidráulica se aproxima a un valor elevado, cercano a la conductividad hidráulica saturada, por lo que el contenido de humedad ya no cambia de manera significativa y se estabiliza. La baja viscosidad de la gasolina eleva $K(\theta)$, acortando el tiempo para alcanzar dicho equilibrio y provocando casi la superposición de las curvas con el estado final.

La forma observada de los perfiles está relacionada con los parámetros de Van Genuchten obtenidos en el apartado anterior. Donde α era de un valor relativamente elevado, que indica que el suelo requiere baja presión para comenzar a drenar, lo que conlleva a un aumento rápido de la conductividad hidráulica conforme aumenta el contenido de humedad. Así mismo, el valor de n explica la transición más abrupta entre zonas de baja y alta humedad, característica de una distribución más homogénea de poros.

4.2.2 Descripción de la gasolina en la muestra de suelo 2

Al igual que en el caso anterior, el flujo de salida parece iniciar sobre cero, lo cual puede deberse al ajuste realizado. Comparando con el caso de la muestra 1, se observa que el aumento de flujo más notorio sucede cerca del mismo lapso, entre 50 a 100 minutos, para posteriormente seguir aumentando hasta que llega al estado estacionario, esta curva mucho más suavizada muestra como hubiese sido el aumento progresivo de flujo al mantener el flujo de entrada constante y sin la formación de burbujas documentada. Se comprueba también que el ajuste es correcto para la caracterización y modelación del suelo de estudio.

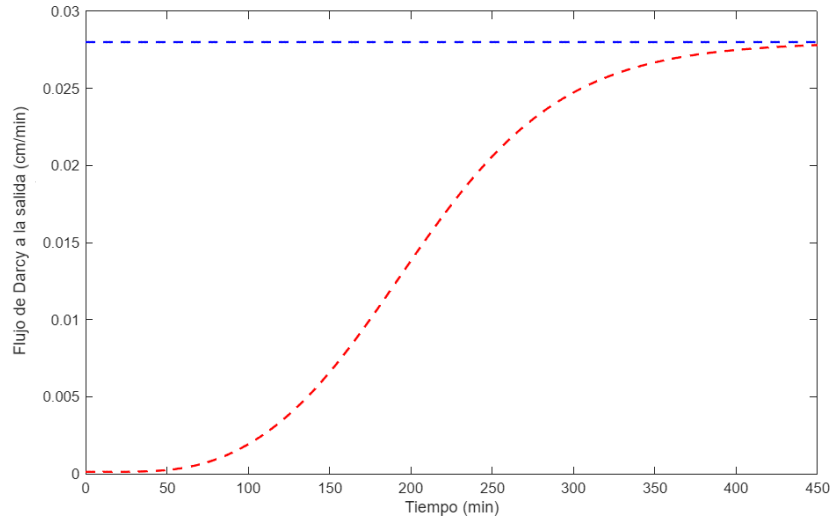


Figura 14. Variación del flujo de Darcy que entrega el modelo. Donde (- -) azul es el flujo de salida y (- -) rojo es el flujo de entrada.

A continuación, se muestra el perfil de la gasolina en la muestra 2, donde se observa que, a los 70 minutos, la gasolina ha avanzado por toda la columna de suelo, alcanzando un perfil bastante homogéneo. La humedad en este momento ya no se encuentra en su condición inicial (humedad inicial de $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$), lo que sugiere que la percolación ha sido rápida para este tiempo. Sin embargo, es importante destacar que, si el perfil se hubiese observado a tiempos menores, como a 20 minutos, por ejemplo, la curva probablemente sería menos curva y con una humedad menor en profundidad, ya que la infiltración inicial aún no habría alcanzado toda la columna de suelo.

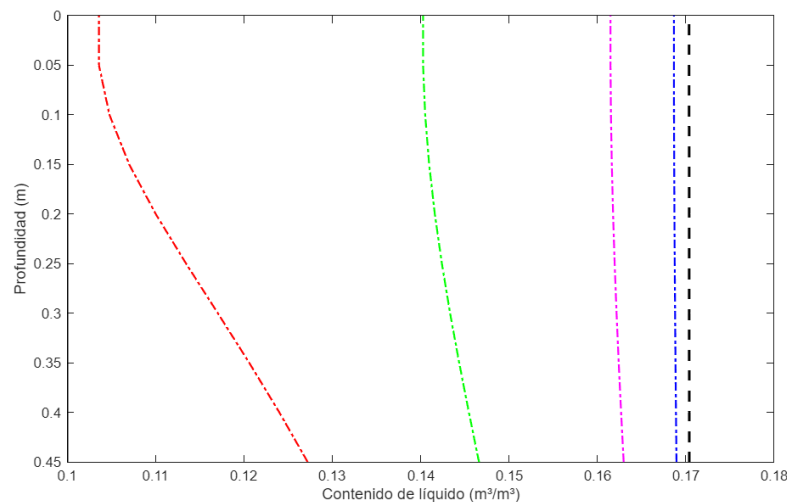


Figura 15. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 2 con gasolina. Donde (- -) rojo es el perfil a los 45 min, (- -) verde es el perfil a los 135 min, (- -) morado es el perfil a los 225 min y (- -) azul es el perfil a los 315 min desde que comenzó la irrigación, (-) corresponde a la condición inicial (tiempo cero) y (- -) negro es la condición final de humedad a los 450 min comenzada la irrigación.

Este suelo es más arcilloso, lo que naturalmente implica una mayor retención capilar y un avance más lento del fluido. En este tipo de suelos, el agua y, en este caso los hidrocarburos, tienden a desplazarse lentamente dado que los poros son más pequeños y se refleja en el comportamiento que se observa en la gráfica.

A pesar de lo anterior, la gasolina, con su baja viscosidad y, por tanto, alta conductividad hidráulica, permite un avance más directo del fluido. Esto significa que, a pesar de la retención que impone el suelo, la gasolina puede superar rápidamente las primeras capas del suelo y avanzar por toda la columna, lo que se refleja en la forma relativamente rápida y directa del perfil de humedad.

4.2.3 Descripción del crudo en la muestra de suelo 1

En la figura 16 se presenta la evolución temporal del flujo de Darcy obtenido a partir del modelo numérico para el caso del crudo en la muestra 1. Se observa que, durante los primeros 200 minutos el flujo se mantiene en valores muy bajos, lo que indica un régimen inicial dominado por condiciones transitorias.

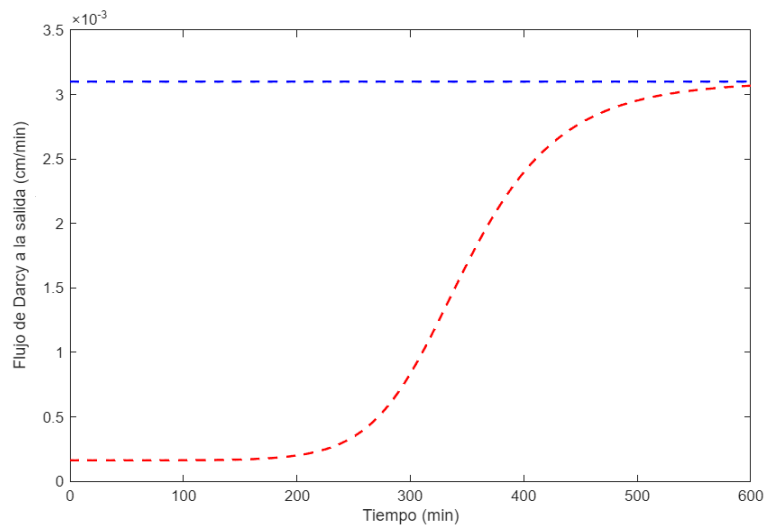


Figura 16 Variación del flujo de Darcy que entrega el modelo. Donde (- -) azul es el flujo de salida y (- -) rojo es el flujo de entrada.

A medida que transcurre el tiempo, el flujo comienza a incrementarse progresivamente, aunque con una pendiente más suave en comparación con los otros hidrocarburos estudiados. Esto indica que el sistema requiere un mayor tiempo para transitar desde el régimen inicial hacia un régimen de flujo estacionario.

Finalmente, el flujo tiende a estabilizarse y se aproxima al valor de irrigación, alcanzando la condición de estado estacionario casi a las 10 horas desde que inició la irrigación. Este instante indica

que ya se estableció una conectividad hidráulica continua entre poros, permitiendo un flujo prácticamente constante en el tiempo.

Este comportamiento refleja una dinámica de percolación más lenta, característica del crudo. Además, los tiempos asociados al inicio del goteo y estabilización son coherentes con los observados durante el experimento.

A continuación, se presenta el perfil del crudo en la muestra de suelo 1. En ella se observa los diferentes gradientes de humedad a lo largo del tiempo.

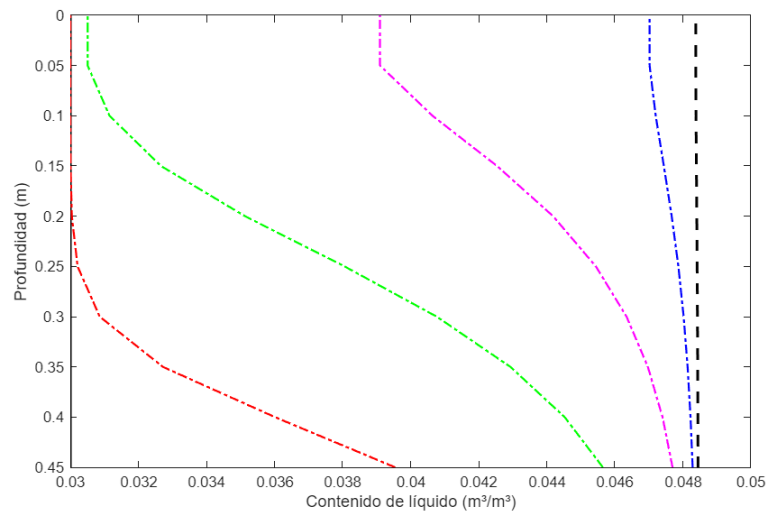


Figura 17. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 1 con crudo. Donde (-) rojo es el perfil a los 60 min, (-) verde es el perfil a los 180 min, (-) morado es el perfil a 300 min y (-) azul es el perfil a los 420 min desde que comenzó la irrigación, (-) corresponde a la condición inicial (tiempo cero) y (- -) negro es la condición final de humedad a los 600 min comenzada la irrigación.

En este caso, se evidencia un frente de humedad más lento, donde los perfiles tienen curvas más pronunciadas, mostrando el efecto de la alta viscosidad y densidad del crudo, esto implica que el crudo tiene mayor resistencia a moverse a través del medio poroso, en comparación con hidrocarburos menos viscosos como la gasolina, por ejemplo.

Este comportamiento está definido por la conductividad hidráulica, que aumenta según el grado de humedad del suelo. En el caso del crudo, el aumento es más gradual, a pesar de que la muestra es de poro de mayor tamaño, de igual forma tiende a tener un avance lento hacia la profundidad. Si bien no se aborda en mayor detalle aquello que provoca la retención de crudo, en este caso, y en base al gráfico de flujo que estima el modelo, se sabe que se representa de manera efectiva el avance del crudo en el suelo.

Ya acercándose al estado final, el perfil se va haciendo cada vez más plano, indicando que se está llegando al estado final de saturación y homogeneizando la humedad a lo largo de la columna de suelo.

Entonces, el modelo refleja correctamente este patrón de flujo más lento. Lo que sigue siendo clave en el modelo es cómo el valor de α (que define la capacidad de drenaje) se ve reflejado en esta tendencia de saturación lenta y estable del crudo a medida que el frente avanza hacia mayores profundidades.

4.2.4 Descripción del crudo en la muestra de suelo 2

Por último, se muestra la figura 18, que presenta la variación de flujo que entrega el modelo para el caso de crudo percolando en la muestra 2. Al comparar este resultado con el obtenido experimentalmente, se observa que el inicio del aumento de flujo sucede dentro del mismo instante de tiempo en ambos casos, al igual que el momento donde se alcanza el estado estacionario, lo cual indica una buena concordancia entre el modelo y el comportamiento observado en el experimento.

De forma similar a otros casos analizados, el flujo simulado no parte estrictamente desde cero, sino desde un valor muy bajo. Este comportamiento se asocia, como es mencionado con anterioridad, a la alta sensibilidad de la conductividad hidráulica respecto a los parámetros de Van Genuchten y a las condiciones de humedad inicial del suelo. En particular, debido al elevado valor de los parámetros estimados, aun para valores bajos de saturación efectiva, el modelo puede predecir una conductividad hidráulica distinta de cero, lo que produce un flujo inicial de salida pequeño, pero no nulo, sin afectar de manera significativa la evolución posterior del sistema.

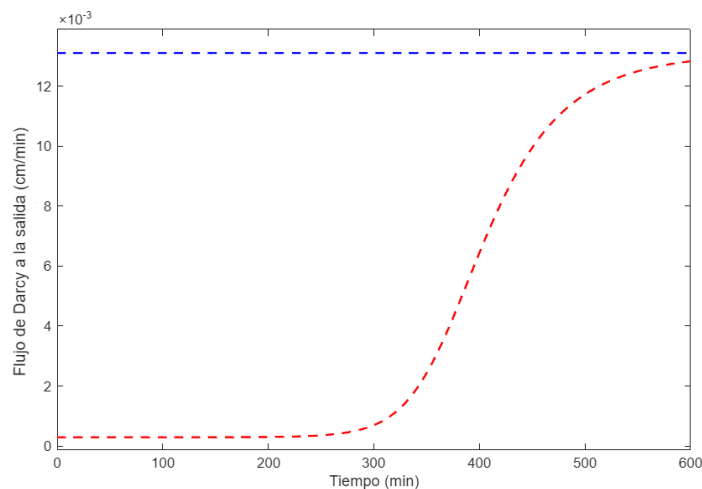


Figura 18. Variación del flujo de Darcy que entrega el modelo. Donde (- -) azul es el flujo de salida y (- -) rojo es el flujo de entrada.

A continuación, se presenta el perfil del crudo en la muestra de suelo 2. En ella se observa los diferentes gradientes de humedad a lo largo del tiempo.

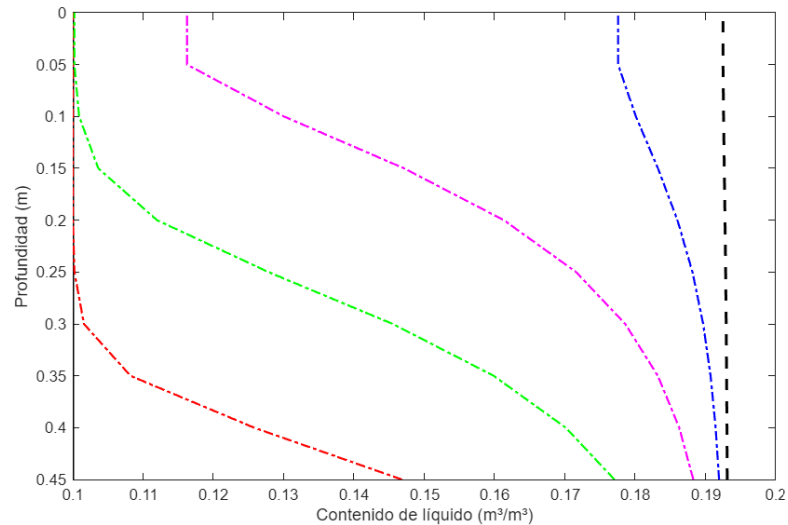


Figura 19. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 2 con crudo. Donde (-.) rojo es el perfil a los 60 min, (-.) verde es el perfil a los 180 min, (-.) morado es el perfil a 300 min y (-.) azul es el perfil a los 420 min desde que comenzó la irrigación, (-) corresponde a la condición inicial (tiempo cero) y (- -) negro es la condición final de humedad a los 600 min comenzada la irrigación.

Como se observa en la figura 19, se presenta el perfil de humedad correspondiente al crudo en la muestra 2. En este caso, el avance del frente de humedad es más lento y progresivo que en los hidrocarburos previamente analizados, lo cual se refleja en perfiles más extendidos y con gradientes suaves a lo largo de la columna. Este comportamiento está asociado tanto a las propiedades físicas del crudo (mayor viscosidad y densidad) como a las características del suelo, que en esta muestra presenta poros de menor tamaño y una mayor proporción de arcillas.

Desde el punto de vista del modelo, el bajo valor del parámetro α obtenido para esta muestra implica que se requiere una mayor succión capilar para incrementar la saturación efectiva del medio. En consecuencia, la conductividad hidráulica no saturada aumenta de forma más gradual con el contenido de líquido, limitando la conectividad entre poros durante gran parte del proceso. Esto se traduce en un avance más lento del frente de humedad y en un mayor gradiente vertical de contenido de líquido, evidenciando que la percolación del crudo se encuentra fuertemente controlada por efectos capilares.

En términos generales, la capacidad del suelo para transmitir el crudo queda limitada por la combinación de su alta viscosidad y la baja permeabilidad efectiva asociada a la microestructura del suelo arcilloso.

4.3 Comparación percolación entre los hidrocarburos de estudio

Para analizar en más detalle el comportamiento de cada hidrocarburo en ambos suelos, se compararán sus respectivos perfiles de saturación. Para ello, se considerará un mismo flujo de entrada (5 cm/h) y profundidad (5 m), donde se evaluará su tiempo de percolación y cómo varían los perfiles bajo condiciones similares.

El tiempo de estudio se dividirá en seis etapas, abarcando la condición inicial, 4 perfiles intermedios obtenidos durante el avance de la infiltración y, por último, la condición final alcanzada por cada hidrocarburo.

4.3.1 Muestra del suelo 1

Como es esperado, la gasolina es la primera en llegar al estado estacionario, casi 1 hora 30 min antes que el diesel y 2 horas 30 min antes que el crudo. Esto está dado principalmente por la diferencia de densidad y viscosidad, por esto la gasolina tiende a percolar más rápido que los otros dos hidrocarburos de estudio.

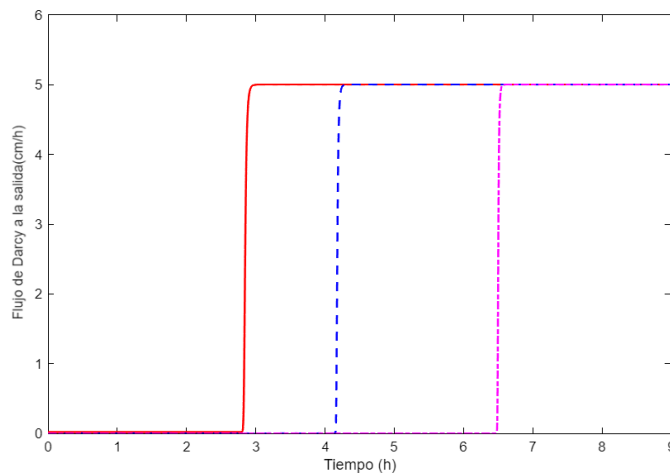


Figura 20. Comparación de evolución de flujo de Darcy que entrega el modelo. Donde (-) rojo es el perfil de flujo de la gasolina, (- -) azul es el perfil de flujo del diesel y (-.) morado es el perfil de flujo del crudo.

Se observa que los tres hidrocarburos ya pasan los 5 metros de profundidad (enfoque vertical) entre las 3 a 6 horas desde que inició la percolación. Si bien el flujo abordado es relativamente alto

(comparado con lo usado en los experimentos), esto también refleja que el sistema en sí es rápido, por lo que, en casos de una fuga real, el avance, sobre todo de la gasolina y el diesel, será bastante veloz en este tipo de suelo, dado tanto por las propiedades de los hidrocarburos como por las características del suelo, que en este caso particular es de grano grande, tipo arenoso, caracterizado por percolaciones sin tanta dificultad.

A continuación, se presentan los perfiles comparativos entre los tres hidrocarburos de interés en la muestra de suelo 1.

En la condición inicial se mantiene en el valor de humedad inicial de $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$. En este instante no existe infiltración de ningún hidrocarburo y, por tanto, las curvas se superponen en este valor inicial.

Tras el inicio de la irrigación constante, se comienzan a formar gradientes de humedad, asociados a los avances del frente de infiltración de cada hidrocarburo.

A medida que continúa la irrigación, las diferencias entre los perfiles de los hidrocarburos se hacen más evidentes como se muestra a continuación:

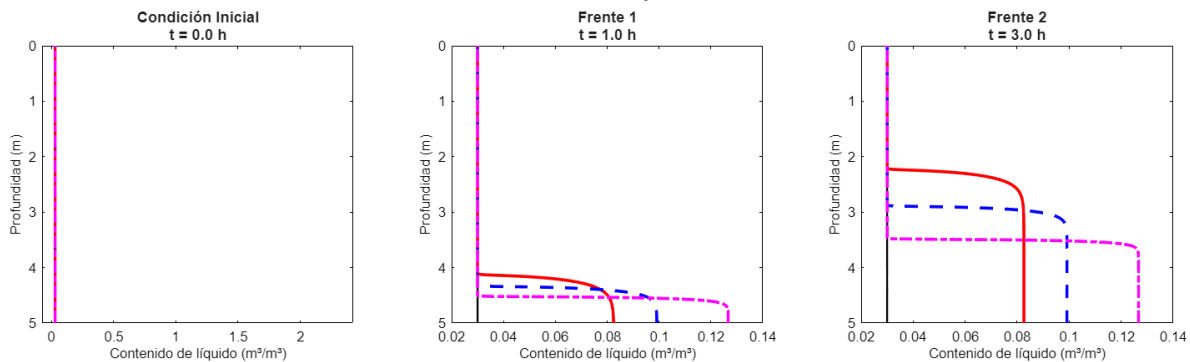


Figura 21. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 1 con los tres hidrocarburos desde el inicio de la irrigación hasta 3 horas después. Donde (-) rojo es el perfil de la gasolina, (- -) azul es el perfil del diesel y (-.) morado es el perfil del crudo.

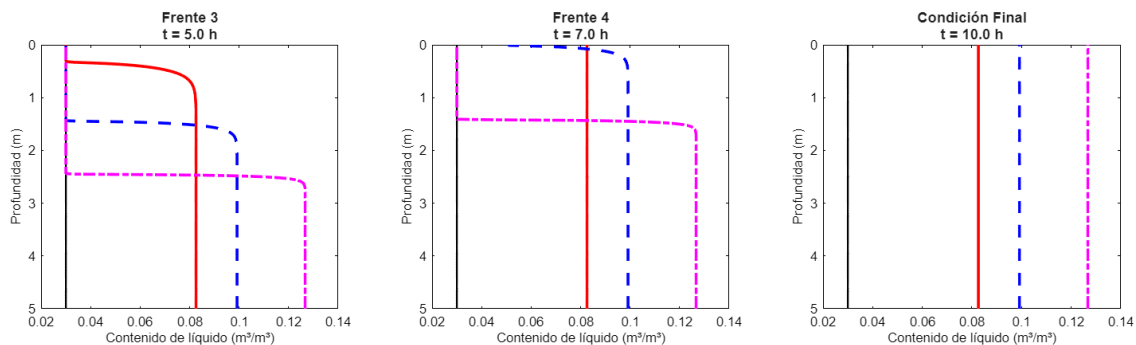


Figura 22. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 1 con los tres hidrocarburos entre 5 y 10 horas de irrigación constante. Donde (-) rojo es el perfil de la gasolina, (- -) azul es el perfil del diesel y (-.) morado es el perfil del crudo.

En las figuras anteriores se presenta la evolución comparativa de los perfiles de humedad para los distintos hidrocarburos en la muestra 1, bajo un mismo flujo de irrigación. A diferencia de los perfiles individuales, este análisis conjunto permite identificar patrones globales de avance y ordenar el comportamiento de los fluidos bajo condiciones hidráulicas equivalentes.

Se observa que, en todos los casos, el frente de humedad mantiene una forma similar y una progresión vertical rápida, lo que indica que el tipo de suelo domina el mecanismo de percolación. Las diferencias entre hidrocarburos se manifiestan principalmente en la diferencia temporal con la que cada frente alcanza una determinada profundidad, más que en la forma del perfil propiamente tal.

Esto confirma que, para este tipo de suelo, pequeñas diferencias en viscosidad o densidad se traducen en cambios en la velocidad de avance, pero no alteran sustancialmente el patrón general de infiltración.

4.3.2 Muestra del suelo 2

En la figura 23 se presenta la comparación de la evolución del flujo de salida para los tres hidrocarburos en la muestra 2, correspondiente a un suelo de textura más fina y con contenido de arcillas. Se observa que, bajo un mismo flujo, los tres hidrocarburos logran atravesar los 5 metros de profundidad en un intervalo de tiempo entre las 10 y 22 horas desde el inicio de la percolación.

A pesar de que el avance vertical se produce en todos los casos, la forma de las curvas evidencia una transición más lenta hacia el estado estacionario en comparación con la muestra 1. Este comportamiento se asocia a las características de esta muestra (permeabilidad, textura, etc.), la cual presenta poros de menor tamaño y posee una mayor capacidad de retención de fluidos, lo que termina ralentizando el avance y suaviza la pendiente del aumento de flujo.

Dentro de este contexto, la gasolina y el diésel presentan un avance más rápido que el crudo, alcanzando antes el régimen estacionario, lo que refleja la influencia de sus propiedades físicas (viscosidad principalmente). No obstante, en todos los casos la respuesta del sistema está dominada por la textura del suelo, que impone una dinámica de percolación más gradual.

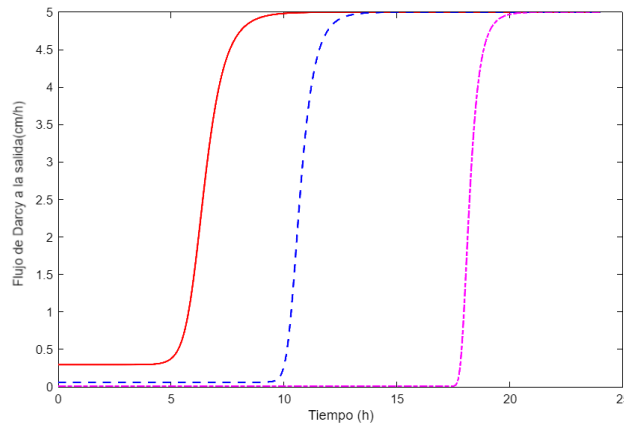


Figura 23. Comparación de evolución del flujo de Darcy que entrega el modelo. Donde (-) rojo es el perfil de flujo de la gasolina, (- -) azul es el perfil de flujo del diesel y (-.) morado es el perfil de flujo del crudo.

A continuación, se presentan los perfiles comparativos entre los tres hidrocarburos de interés en la muestra de suelo 2.

En la condición inicial se mantiene en el valor de humedad inicial de $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$. En este instante no existe infiltración de ningún hidrocarburo y, por tanto, las curvas se superponen en este valor inicial.

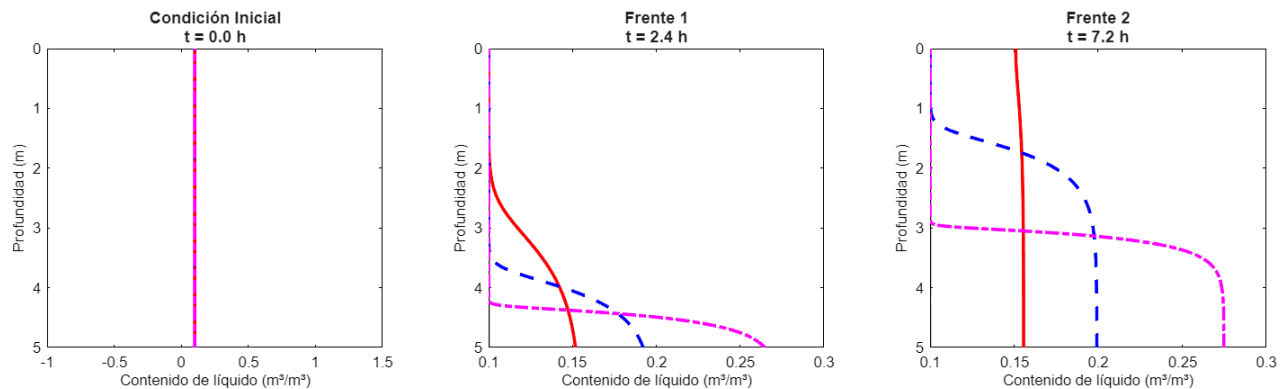


Figura 24. Perfil del contenido de líquido en la muestra de suelo 2 con los tres hidrocarburos entre el inicio de la irrigación hasta 8 horas aprox. después. Donde (-) rojo es el perfil de la gasolina, (- -) azul es el perfil del diesel y (-.) morado es el perfil del crudo.

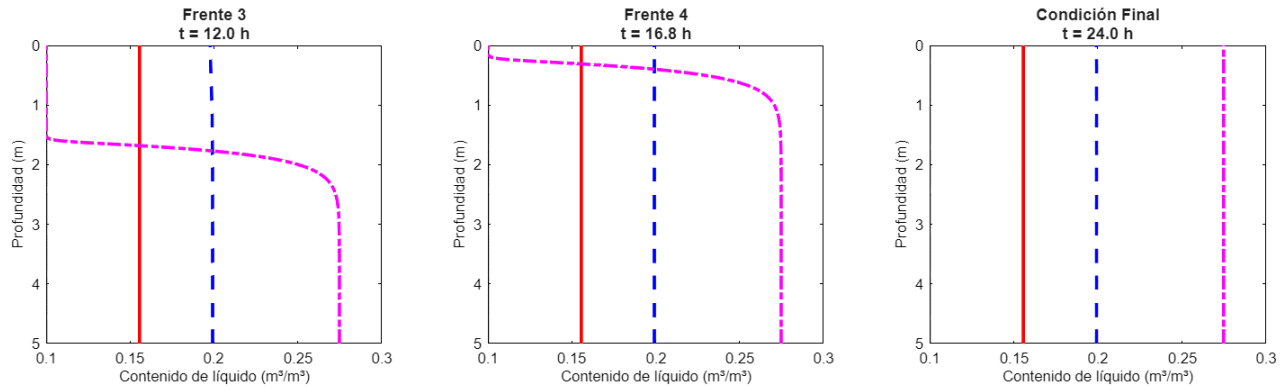


Figura 25. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 2 con los tres hidrocarburos entre 12 y 24 hrs de irrigación constante. Donde (-) rojo es el perfil de la gasolina, (- -) azul es el perfil del diesel y (-.) morado es el perfil del crudo.

Finalmente, la comparación muestra una mayor separación temporal entre los frentes y una transición más gradual hacia el estado estacionario, lo que refleja una mayor capacidad de retención y una menor conectividad hidráulica inicial. A diferencia del suelo arenoso, el sistema requiere tiempos más largos para que el perfil complete su evolución, evidenciando un control más fuerte de la conductividad no saturada, dada la diferencia de permeabilidad intrínseca.

5. Conclusión

A partir de lo observado durante el experimento, se puede concluir que, tal como se esperaba, entre los tres combustibles de estudio, la gasolina fue la más rápida en cuanto a velocidad de percolación. Este comportamiento se explica principalmente por su baja viscosidad, lo cual se traduce en una mayor conductividad hidráulica y, por tanto, una mayor facilidad para atravesar la columna de suelo, por lo que, en el caso de una fuga o derrame habría que actuar lo más rápido posible.

El diesel presentó una velocidad de percolación intermedia, coherente con su viscosidad mayor que la de la gasolina, pero aún lo suficientemente baja como para permitir un avance relativamente rápido en comparación con el crudo. Por su parte, el crudo fue el hidrocarburo con el comportamiento más lento, mostrando mayores tiempos de percolación y una mayor tendencia a la retención, lo que evidencia la fuerte influencia de sus propiedades físicas en el proceso de infiltración.

En cuanto a los suelos característicos, se estudiaron dos tipos representativos. La primera muestra correspondió a un suelo de textura más arenosa, es decir, de grano más grande y con presencia de gravilla en su composición y un contenido prácticamente nulo de arcillas, lo cual favorece el transporte de fluidos a través del medio poroso. Sin embargo, esta muestra presentó un comportamiento particular frente al crudo, siendo el único caso en el que se observó una acumulación significativa de hidrocarburo en la superficie, formando una altura de líquido considerable y una percolación extremadamente lenta. Este resultado sugiere que, además de la textura, podrían existir características específicas de la composición del suelo o de la interacción sólido – fluido que favorecen dicha retención del crudo, lo cual sería interesante de abordar en futuros estudios.

La segunda muestra presentó un tamaño de grano más fino, con mayor presencia de arcillas y fragmentos de distinto tamaño. Debido a sus características, es que se esperaba que el suelo tuviese más tendencia a retener y ralentizar el flujo de hidrocarburos a través de este, lo cual se manifiesta en mayores tiempos de percolación y pendientes más suaves en la evolución del flujo de salida.

Se puede decir que la forma del diseño experimental fue la adecuada para estudiar este fenómeno, el cual permitió ver el avance de los diferentes hidrocarburos en ambas muestras de suelo, sin embargo, aún quedan cosas por mejorar en cuanto al ensamblaje experimental, como todo primer experimento, hubo errores experimentales y formación de burbujas, dificultando la toma de mediciones. Otro punto de este aspecto es la forma en la que se ingresó la muestra al tubo, lo cual puede quitar cierta exactitud del suelo, pero sin perder la representatividad del mismo, ya que la

muestra podría extraerse de una manera diferente, mejorando así la distribución al interior del tubo para que sea similar a como está el suelo en la zona.

Se estima que la diferencia entre el modelo teórico y los experimentos realizados puede deberse a diferentes factores inherentes tanto al sistema físico, como las simplificaciones asociadas a la modelación. En primer lugar, las propiedades reales de los hidrocarburos pueden variar respecto al valor utilizado en el modelo, ya sea por cambios de temperatura o variaciones en la muestra. Estas diferencias afectarán directamente a la conductividad hidráulica y, por ende, a la velocidad de infiltración.

Por otro lado, durante los experimentos, es frecuente la presencia de aire atrapado en los poros, lo cual reduce temporalmente la permeabilidad efectiva del suelo, esto puede retrasar o alterar la evolución del flujo. A ello se suma la heterogeneidad natural del suelo, ya que incluso pequeñas variaciones en la distribución de partículas, compactación, porosidad o contenido de humedad inicial pueden modificar el comportamiento del flujo respecto al que predice el modelo.

Por su parte, el modelo numérico se basa en supuestos como flujo unidimensional, propiedades hidráulicas homogéneas y ausencia de procesos fisicoquímicos adicionales, por lo que es esperable que se presenten ligeras diferencias al compararlo con el sistema real. No obstante, el modelo logró reproducir de manera satisfactoria el comportamiento observado experimentalmente, gracias a la precisión del ajuste de realizado, a partir del cual se obtuvieron parámetros coherentes para una misma muestra de suelo, aun cuando estos dependían tanto del suelo como del hidrocarburo que lo atraviesa, y también consistente con lo que se observaba en literatura.

Posteriormente, fue posible simular con adecuada precisión las curvas de flujo de salida, reproduciendo de forma consistente el tiempo donde sucedía el inicio del goteo, el régimen transitorio y, finalmente, la llegada al estado estacionario en cada uno de los casos de estudio.

Finalmente, se concluye que el objetivo del trabajo fue cumplido, ya que se logró estimar la profundidad alcanzable por los combustibles ante una pérdida de contención. Estos resultados pueden emplearse como una herramienta complementaria a las medidas de mitigación existentes, contribuyendo a mejorar la respuesta ante fugas, a reducir la propagación de hidrocarburos en el subsuelo y disminuir el impacto al medio ambiente.

6. Referencias

- [1] Academia de Ciencias Físicas Matemáticas y Naturales. (2022). *Efecto de los derrames de hidrocarburos en el ambiente* (978-980-6195-76-9). <https://acfiman.org/wp-content/uploads/2022/07/Efectos-Derrames.pdf>
- [2] Angelone, S., Garibay, M., & Couhapé, M. (2006). *Permeabilidad de suelos*. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Retrieved 20 septiembre 2025 from <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- [3] Anton Paar Wiki. (2025). *Viscosity of Crude Oil*. Retrieved 12 octubre 2025 from <https://wiki.anton-paar.com/ca-en/crude-oil/>
- [4] ASTM International. (2019). Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying (ASTM C566-19). In: ASTM International.
- [5] Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Dover, New York, USA.
- [6] Bellora, G., Rafael, V., Luis, L., Salazar, M., Nicolás, P., M., C., & Carlos, S. (2024, 21–24 de mayo de 2024). *Caracterización del flujo preferencial en suelos con cultivos de cobertura mediante tinturas a campo* XXIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CACS), Catamarca, Argentina. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/174693>
- [7] Benson, C. H., Chiang, I., Chalermyanont, T., & Sawangsuriya, A. (2014). *Estimating van Genuchten Parameters α and n for Clean Sands from Particle Size Distribution Data* Geo-Congress 2014, <https://dx.doi.org/10.1061/9780784413265.033>
- [8] Casanova, M., Seguel, O., Luzio, W., & Acevedo, E. (2004). *Manual de edafología: Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.
- [9] Cornejo, P. (2025). Importancia de los hidrocarburos. Retrieved 26 septiembre 2025, from <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n2/m11.html>
- [10] CSR-Laboratorio. (s.f). *La estructura del suelo y su clasificación*. CSR Laboratorio. Retrieved 24 octubre 2025 from <https://csrlaboratorio.es/suelos/horizontes-estructura-clasificacion/>
- [11] Delgado, R. C., Vallejo, M. A., Soria, J. C., & Aguirre, P. V. (2013). *Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador*. Ministerio del Ambiente. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART11.pdf>
- [12] Dynapac. (2017). *Granulometría, consistencia y sedimentación*. Blog Dynapac. Retrieved 25 septiembre 2025 from https://dynapac.blog/latinoamerica/manual_compactador-pavimentacion-fresado/granulometria-consistencia-y-sedimentacion-que-se-necesita-conocer-para-obtener-los-mejores-resultados-en-la-compactacion/?lang=ar
- [13] Earle, S. (2019). Weathering and the Formation of Soil. In *Physical Geology* (2nd ed.). BCcampus. <https://opentextbc.ca/physicalgeology2ed/chapter/5-4-weathering-and-the-formation-of-soil/>
- [14] FAO. (1994). *Manual de laboratorio de suelos y agua*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s00.htm#TopOfPage>
- [15] Iberdrola. (2025). *¿Qué es la contaminación del suelo? Efectos y causas*. Retrieved 22 noviembre 2025 from <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-suelo-causas-efectos-soluciones>

- [16] Indoria, A. K., Sharma, K. L., & Reddy, K. S. (2020). Hydraulic properties of soil under warming climate. In *Soil Hydrology, Land Use and Agriculture* (pp. 473-508). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818032-7.00018-7>
- [17] Juárez, E., & Rico, A. (2002). *Fundamentos de Hidrología. Tomo I*. Editorial Limusa, México.
- [18] Kay, B. D., & Vandenbygaart, A. J. (2002). Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 66, 107-118. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(02\)00019-3](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(02)00019-3)
- [19] Langguth, H., & Voigt, R. (2006). *Hydrogeologische Methoden*. Springer Verlag.
- [20] Martínez, R. (2004). *Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII Región del Bío-Bío (Sector sur)* [Memoria de Título, Universidad de Chile]. Santiago. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/101729/martinez_r.pdf
- [21] Mejía, S. A. (2000). *Modelación y simulación de la visualización del transporte de fluido a través de pilas de lixiviación de minerales de cobre* [Tesis de Magíster, Universidad de Chile]. Santiago de Chile.
- [22] Montoro, M., & Francisca, F. (2010). Permeabilidad intrínseca de suelos arenosos con presencia de partículas de limo y arcilla. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 11, 163-170. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/190626/CONICET_Digital_Nro.b9f19ac5-070e-488f-bb30-9d40c7a0d5b7_B.pdf?sequence=2&isAllowed=n
- [23] Peche, A., Houben, G., & Altfelder, S. (2024). Approximation of van Genuchten Parameter Ranges from Hydraulic Conductivity Data. *Groundwater*, 62, 469-479. <https://doi.org/10.1111/gwat.13365>
- [24] Pioneer. (2020). *Porosidad del suelo*. Retrieved 20 septiembre 2025 from https://www.pioneer.com/ar/articulos/porosidad_suelos.html
- [25] Puga, P. (2012). *Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas* [Memoria de Título, Universidad Católica de la Santísima Concepción]. Concepción. <http://web2.ucsc.cl/~civil/investigacion/memorias/2012PatricioPuga.pdf>
- [26] Quinzio, L. A., Bonilla, R. U., González, A. E., & González, L. (2011). *Geology of the Coastal Range, Biobío Region, Chile* 22. Lateinamerika Kolloquium (LAK2011 22nd), Heidelberg. Conference Paper
- [27] Sánchez, F. (s.f). *Ley de Darcy: Conductividad hidráulica*. Universidad de Salamanca, España. Retrieved 13 noviembre 2025 from https://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf
- [28] Sattarin, M., Modarresi, H., Bayat, M., & Teymori, M. (2007). New viscosity correlations for dead crude oils. *Petroleum and Coal*, 49, 33-39. https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/07/pc_2_2007_sattarin.pdf
- [29] Shaxson, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: El significado de la porosidad del suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/4/y4690s/y4690s00.htm#Contents>
- [30] Twidale, S. (2025). *La demanda mundial de petróleo y gas podría crecer hasta 2050, según la AIE*. GBM Media. Retrieved 22 noviembre 2025 from <https://gbm.com/media/noticia/la-demanda-mundial-de-petroleo-y-gas-podria-crecer-hasta-2050-segun-la-aie/>

7. Anexos

7.1 Determinación del flujo de Darcy a partir de mediciones experimentales

El flujo de Darcy q (cm/h) requerido como condición de frontera en el modelo numérico se obtiene a partir de las mediciones volumétricas experimentales mediante la siguiente relación:

$$R = \frac{\dot{Q}}{S} \quad (14)$$

Donde $\dot{Q}$ es el caudal de entrada (ml/min) S es la sección transversal de la columna de suelo (cm^2). Esta formulación convierte el flujo volumétrico medido experimentalmente en una velocidad de Darcy, que representa el volumen de fluido que atraviesa una unidad de área por unidad de tiempo [27]. Físicamente, el flujo de Darcy obtenido corresponde a la intensidad de irrigación o infiltración aplicada en la zona superior de la columna.

Entonces, la sección transversal se puede medir como:

$$S (\text{área}) = \pi * r^2$$

Donde las dimensiones del tubo son las mencionadas anteriormente, entonces la sección transversal corresponde a 177 cm^2 .

7.2 Gráficas de ajuste de parámetros

A continuación, se muestran las gráficas de ajuste, donde en base a la información experimental, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados para obtener los parámetros de Van Genuchten.

7.2.1 Muestra de suelo 1 – Gasolina

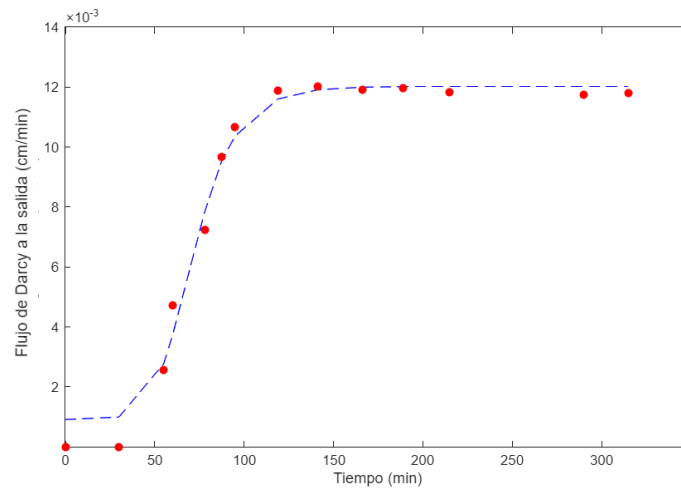


Figura 26. Ajuste de los datos experimentales de la gasolina en la muestra 1.

7.2.2 Muestra de suelo 1 – Diesel

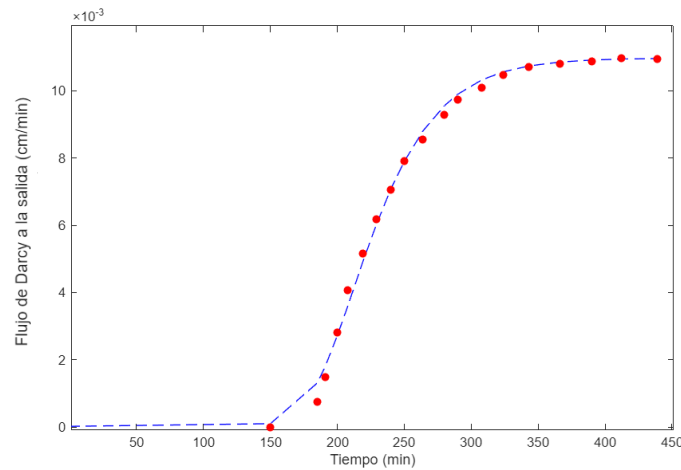


Figura 27. Ajuste de los datos experimentales del diesel en la muestra 1.

7.2.3 Muestra de suelo 1 – Crudo

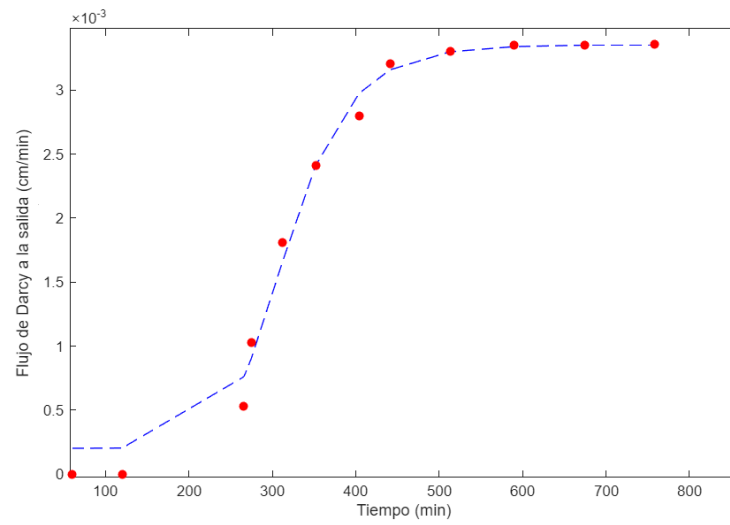


Figura 28. Ajuste de los datos experimentales del crudo en la muestra 1.

7.2.4 Muestra de suelo 2 – Gasolina

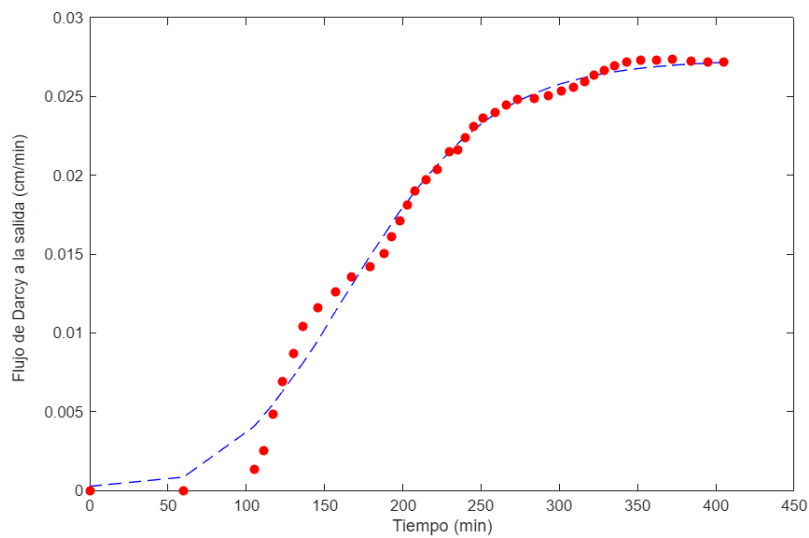


Figura 29. Ajuste de los datos experimentales de la gasolina en la muestra 2.

7.2.5 Muestra de suelo 2 – Diesel

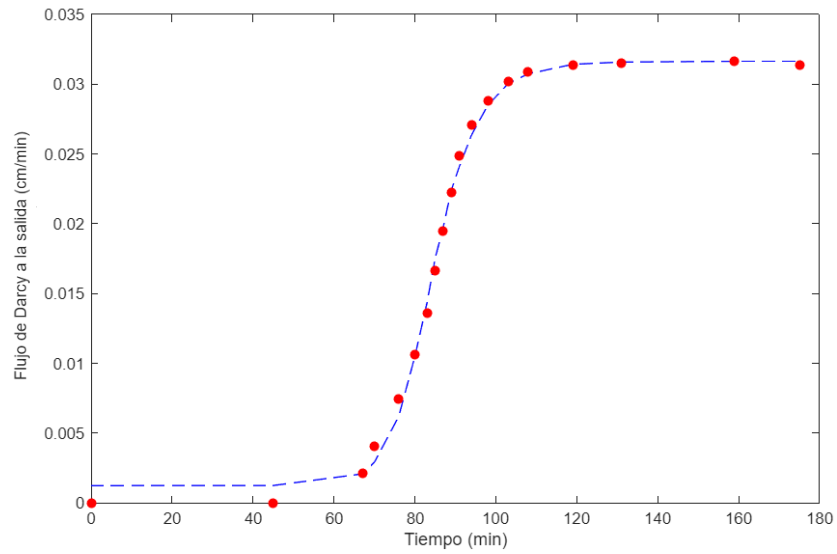


Figura 30. Ajuste de los datos experimentales del diesel en la muestra 2.

7.2.6 Muestra suelo 2 – Crudo

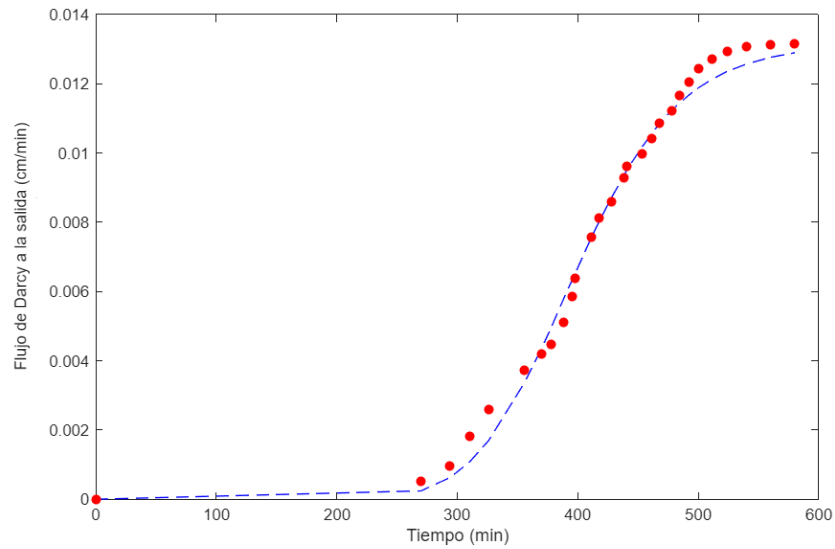


Figura 31. Ajuste de los datos experimentales del crudo en la muestra 2.

7.3 Perfil de combustible del diesel

7.3.1 Descripción del diesel en la muestra de suelo 1

En el caso del diesel, el flujo de salida simulado por el modelo muestra una buena concordancia con los resultados experimentales. En ambos casos, el inicio del goteo se produce en un instante similar, aproximadamente a las 2 hrs. 30 min desde el inicio de la irrigación.

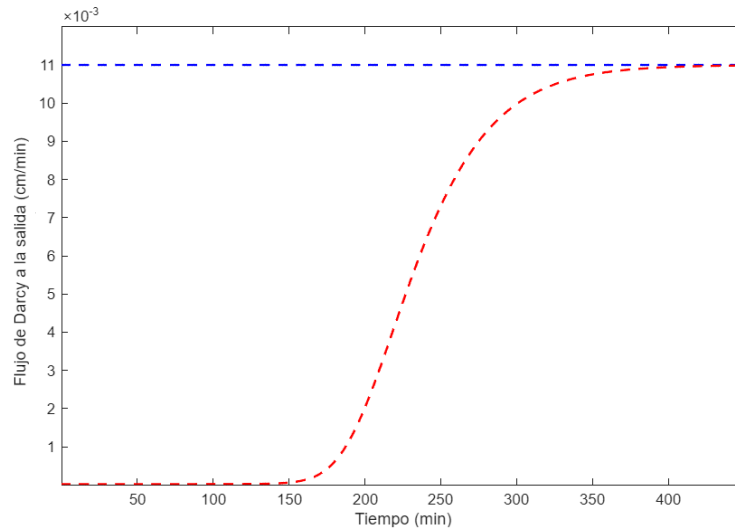


Figura 32. Variación del flujo de Darcy que entrega el modelo. Donde (--) azul es el flujo de salida y (--) rojo es el flujo de entrada.

Posteriormente, el flujo aumenta progresivamente hasta alcanzar el estado estacionario, esto con un valor de flujo de 0.011 cm/min . Esta evolución temporal refleja adecuadamente la transición desde un régimen transitorio hasta uno estable, validando la capacidad del modelo de reproducir el comportamiento observado durante el experimento.

En la figura 33 se presenta la evolución del perfil de contenido de líquido a lo largo de la columna de suelo, esto para distintos tiempos de simulación, correspondiente a la percolación de diesel en la muestra de suelo 1.

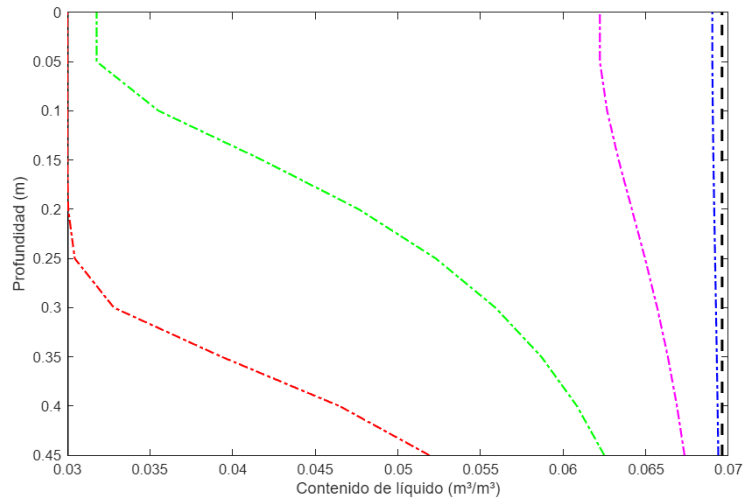


Figura 33. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 1 con diesel. Donde (-.) rojo es el perfil a los 45 min, (-.) verde es el perfil a los 135 min, (-.) morado es el perfil a 225 min y (-.) azul es el perfil a los 315 min desde que comenzó la irrigación, (-) corresponde a la condición inicial (tiempo cero) y (- -) negro es la condición final de humedad pasado 450 min comenzada la irrigación.

Inicialmente, el perfil de humedad se mantiene cercana a su condición inicial, indicando un medio poroso relativamente seco y con baja conductividad hidráulica. En esta etapa el flujo es limitado y su avance también.

A medida que transcurren los primeros 45 minutos bajo un flujo constante de diesel desde la parte superior, se observa que dicha zona se humedece primero formándose un frente de humedad que progresa gradualmente hasta el fondo de la columna. Luego, pasando al siguiente perfil, se observa que aumenta la humedad o contenido de líquido en el suelo, lo que lleva a que la saturación efectiva del medio también aumente, afectando así la conductividad hidráulica, esta secuencia va facilitando el avance del fluido a través del suelo.

Ya hacia el tiempo final de simulación, el perfil comienza a estabilizarse y las curvas correspondientes a los últimos minutos se acercan y casi superpone (en el caso del perfil azul), sobre la condición final de humedad, dando a entender que en ese instante la columna completa ya estaba conectada y en un mismo grado de saturación, permitiendo así que el flujo de salida se iguale con el de entrada.

La forma de los perfiles está directamente relacionada al parámetro n . Dado que se trata de un suelo más arenoso (de poros más grandes), entonces los gradientes de humedad tienden a ser un poco más abruptos, lo cual está asociado a una mayor velocidad de percolación.

7.3.2 Descripción del diesel en la muestra de suelo 2

Para el caso de la muestra 2, el modelo vuelve a predecir un valor de flujo distinto de cero al inicio de la simulación. Este flujo inicial es de magnitud muy baja y no tiene un impacto relevante en la evolución del sistema. Tal como se discutió anteriormente, este comportamiento se asocia a la forma en que el modelo representa la conductividad hidráulica, la cual depende fuertemente de la saturación efectiva y de los parámetros de Van Genuchten.

En esta muestra, los valores bajos del parámetro α indican que el suelo requiere una mayor succión para activar el drenaje de los poros, lo que se asocia a tamaños de poro más pequeños y a una conectividad hidráulica limitada en condiciones iniciales. Sin embargo, una vez que existe una mínima saturación efectiva, el modelo asigna una conductividad hidráulica distinta de cero, lo que se traduce en un flujo inicial muy reducido, pero no nulo.

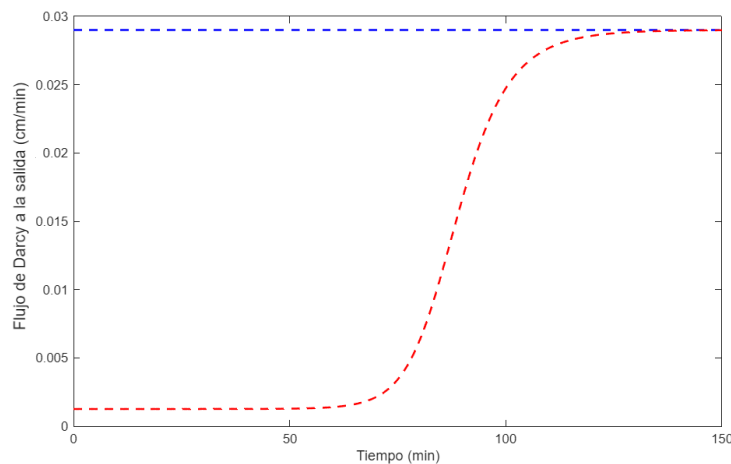


Figura 34. Variación del flujo de Darcy que entrega el modelo. Donde (--) azul es el flujo de salida y (--) rojo es el flujo de entrada.

En cuanto al inicio del goteo y al tiempo que se requiere para que el sistema se estabilice, los resultados del modelo concuerdan adecuadamente con los tiempos observados durante el experimento.

Ahora, en la figura 35 se presenta la evolución del perfil de contenido de líquido a lo largo de la columna de suelo con la muestra 2.

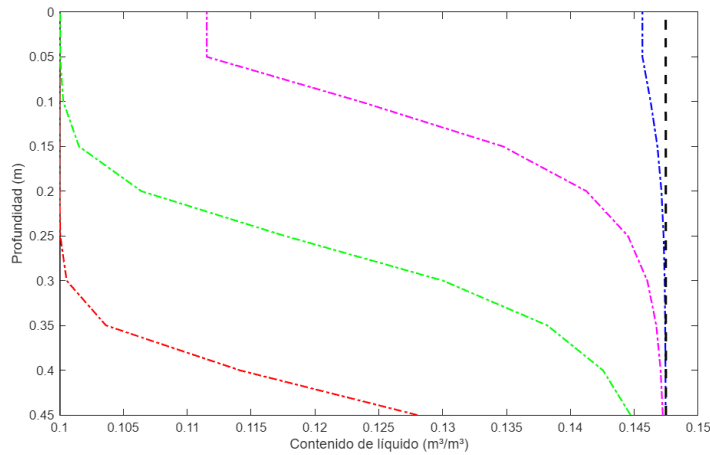


Figura 35. Perfil del contenido de líquido de la muestra de suelo 2 con diesel. Donde (-.) rojo es el perfil a los 15 min, (-.) verde es el perfil a los 45 min, (-.) morado es el perfil a 75 min y (-.) azul es el perfil a los 105 min desde que comenzó la irrigación, (-) corresponde a la condición inicial (tiempo cero) y (- -) negro es la condición final de humedad a los 150 min comenzada la irrigación.

En el perfil inicial, el contenido de líquido se mantiene en $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, lo que indica que el suelo está poco saturado y con baja conductividad hidráulica, limitando el avance del fluido en la profundidad.

A medida que transcurre el tiempo, se comienza a formar un frente de humedad que avanza hacia mayores profundidades. Este incremento en la humedad eleva la saturación efectiva del medio, lo que se traduce en un aumento de la conductividad hidráulica no saturada, permitiendo una mayor conectividad entre los poros y facilitando la percolación del diesel.

Debido a la irrigación constante, la superficie se va humedeciendo progresivamente, alejándose de la condición inicial y formando un gradiente de humedad cada vez más “cerrado”, es decir, cada vez menos curvo y cercano a la condición final de humedad.

7.4 Medición de humedad

7.4.1 Humedad inicial

Para la determinación de este parámetro se utiliza una muestra de suelo sin alterar, con una masa aproximada de 200 gramos. Inicialmente, la muestra se pesa para obtener su masa húmeda (M_h). Posteriormente, se introduce la muestra procurando que alcance una altura equivalente a un quinto del lado menor del recipiente y luego se seca en horno a una temperatura de 105 ± 5 °C durante 12 horas [4]. Una vez seca, se vuelve a pesar la muestra (M_s) y se calcula su humedad gravimétrica mediante la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (15)$$

Como se necesita la fracción volumétrica, esta se puede calcular de la siguiente forma:

$$\theta_i = \frac{V_a}{V_s} \rightarrow \omega * \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (16)$$

Donde V_a es el volumen del sólido húmedo, V_s es el volumen de sólido seco, ρ_s es la densidad aparente del suelo y ρ_w es la densidad del agua.

7.4.2 Humedad de saturación

Por su parte, este procedimiento es similar al anteriormente descrito, sin embargo, en este caso la muestra debe ser previamente humedecida. Para ello, se utilizará la muestra de suelo inicial y posterior a la realización del experimento, pues una vez que este termine el flujo de salida estará en estado estacionario, es decir, el suelo estará saturado de hidrocarburo.

A continuación, se pesa la muestra en su condición inicial, tal como fue extraída. Una vez finalizado el experimento, se retira una masa equivalente de la muestra ya saturada. Luego, aplicando el principio de Arquímedes, se llena una probeta con 100 mL de agua y se introduce primero la muestra seca, registrando el volumen desplazado. Posteriormente, se repite el procedimiento con la muestra saturada. Con ambos valores de volumen se puede calcular la humedad de saturación mediante la siguiente expresión:

$$\theta_s = \frac{V_{sat} - V_s}{V_s} \quad (17)$$

7.5 Características de las muestras de suelo

7.5.1 Propiedades de las muestras de suelo

A continuación, se presenta la tabla 7 que resume las mediciones de masa y densidad de las muestras de suelo estudiadas, además de los resultados de humedad a partir de esta misma información en base a lo anteriormente explicado.

Tabla 3. Mediciones de masa y densidad, y cálculo de humedad para las muestras de suelo 1 (zona de antorchas) y suelo 2 (zona proyecto soterrado eléctrico).

Característica	Suelo 1	Suelo 2
Masa húmeda (g)	200.1	200.1
Masa seca (g)	196.9	188.1
Densidad aparente (kg/m^3)	2894	2883
Humedad inicial (m^3/m^3)	0.03	0.10
Humedad de saturación (m^3/m^3)	0.45	0.55

A continuación, se presentan imágenes de las muestras de cada suelo estudiado.

7.5.2 Imágenes de las muestras de suelo

En esta muestra se aprecia que la muestra 1 es de textura más arenosa, siendo de grano más grande.



Figura 36. Muestra de suelo 1 usada en el experimento.

Por otro lado, la muestra 2 es de textura más suave y se observó la presencia de arcillas y otros tipos de piedras en ella.



Figura 37. Muestra de suelo 2 usada en el experimento.

7.6 Resultados granulometría

Se presentan los resultados obtenidos después de realizar la granulometría de suelo a ambas muestras, para completar el análisis es necesario contar con una tabla de conversión, la cual permitirá entender y profundizar en la caracterización del suelo, esta información se encuentra en la tabla 4.

Tabla 4. Tabla de conversión de medidas en el sedimento.

U.S. Standard Sieve Mesh #		Mullimeters	Microns	Phi	Wentworth Size Class	
				-20		Gravel
		4096		-12		
		1024		-10		
Use Wire Square		256		-8	Boulder (-8 to -12)	
		64		-6	Cobble (-6 to -8)	
		16		-4		
5		4		-2	Pebble (-2 to -6)	
6		3,36		-1,75		
7		2,83		-1,50		
8		2,38		-1,25		
10		2,00		-1,0	Granule	Sand
12		1,68		-0,75		
14		1,41		-0,50		
16		1,19		-0,25		
18		1,00		0,0	Very coarse sand	
20		0,84		0,25		
25		0,71		0,50		
30		0,59		0,75		
35	1/2	0,50	500	1,0	Coarse sand	
40		0,42	420	1,25		
45		0,35	350	1,50		
50		0,30	300	1,75		
60	1/4	0,25	250	2,0	Medium sand	
70		0,210	210	2,25		
80		0,177	177	2,50		
100		0,149	149	2,75		
120	1/8	0,125	125	3,0	Fine sand	
140		0,105	105	3,25		
170		0,088	88	3,50		
200		0,074	74	3,75		
230	1/16	0,0625	62,5	4,0	Very fine sand	
270		0,053	53	4,25		
325		0,044	44	4,50		

		0,037	37	4,75		Mud
	1/32	0,031	31	5,0	Coarse silt	
	1/64	0,0156	15,6	6,0	Medium silt	
	1/128	0,0078	7,8	7,0	Fine silt	
	1/256	0,0039	3,9	8,0	Very fine silt	
		0,0020	2,0	9,0		
		0,00098	0,98	10,0	Clay	
		0,00049	0,49	11,0	(some use 2 o 9 phi)	
		0,00024	0,24	12,0	as the clay boundry	
		0,00012	0,12	13,0		
		0,00006	0,06	14,0		

La tabla 4 fue proporcionada por el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Geología, donde se realizó el análisis granulométrico. Se puede observar las diferentes subclasificaciones que tiene el suelo según la malla en la cual queda retenida la muestra, siguiendo el orden de la tabla:

- Grava, subdividida en: Bloque, canto, grava gruesa y gránulo.
- Arena, subdividida en: Arena muy gruesa, arena gruesa, arena media, arena fina y arena muy fina.
- Finos, subdividida en: Limo grueso, limo medio, limo fino, limo muy fino y arcilla.

A continuación, se presenta el detalle de los resultados obtenidos:

7.6.1 Muestra del suelo 1

Dada las características físicas de la muestra 1 (pocas rocas y gravilla), se trabajó con 398 gramos aproximadamente. Se hizo pasar por los diferentes tamices, donde a modo de resumen, se obtuvo la siguiente caracterización:

Tabla 5. Resumen resultados análisis granulométrico en la muestra 1.

	Peso (g)	Porcentaje (%)
Grava	33,72	8,49
Arena	357,807	90,05
Finos (limos + arcillas)	5,822	1,47

Como se observó, la muestra es principalmente arena, con poca cantidad de partículas finas y grava. Se puede obtener una caracterización más completa al analizar la muestra en cada tamiz:

Tabla 6. Resultados análisis granulométrico en la muestra 1.

Malla	Tamaño (mm)	Peso (g)	Porcentaje (%)
	64		
	16		
5	4,00	8,12	
7	2,83	9,09	2,04
10	2,00	16,51	2,29
14	1,41	8,90	4,16
18	1,00	12,21	9,18
25	0,71	14,52	12,60
35	0,500	17,01	14,98
45	0,35	13,18	17,55
60	0,250	8,36	13,60
80	0,177	5,19	8,63
120	0,125	4,55	5,36
170	0,088	2,22	4,69
230	0,063	1,13	2,29
>230	0,0039	1,42	1,17

En el caso de esta muestra, se puede extraer que está compuesta principalmente por arena gruesa (malla 25 a 35) y arena media (malla 45). Ya desde la malla 60 a 120 es arena más fina y del 170 en adelante es principalmente limos y arcillas, que es una cantidad muy reducida comparado al resto de composiciones. En resumen, la muestra de suelo 1 está compuesta prácticamente por arena de diferente tamaño de grano.

7.6.2 Muestra del suelo 2

Dada las características físicas de la muestra 2 (contiene rocas de un tamaño considerable y gran cantidad de grava), se trabajó con 969 gramos aproximadamente. Se hizo pasar por los diferentes tamices, donde a modo de resumen, se muestra la tabla 7, donde se obtuvo la siguiente caracterización:

Tabla 7. Resumen resultados análisis granulométrico en la muestra 2.

	Peso (g)	Porcentaje (%)
Grava	254,97	26,57
Arena	680,238	70,89
Finos (limos + arcillas)	24,336	2,54

Como se esperaba, dado que la muestra es de la misma zona geográfica (ver anexo 7.11.2), esta va a estar compuesta principalmente por arena, pero también contiene mayor porcentaje de grava y de limos y/o arcillas que la muestra anterior, algo que se apreciaba al tratar la muestra durante los experimentos.

A continuación, se muestra la tabla 8, que contiene el detalle del análisis granulométrico:

Tabla 8. Resultados análisis granulométrico en la muestra 2.

Malla	Tamaño (mm)	Peso (g)	Porcentaje (%)
	64		
	16		
5	4,00	192,86	20,10
7	2,83	33,87	3,53
10	2,00	28,24	2,94
14	1,41	5,74	4,67
18	1,00	6,08	4,94
25	0,71	8,21	6,67
35	0,500	14,63	11,89
45	0,35	17,50	14,23
60	0,250	15,56	12,65
80	0,177	9,20	7,48
120	0,125	5,73	4,66
170	0,088	2,71	2,20
230	0,063	1,85	1,50
>230	0,0039	3,12	2,54

En este caso se observa que la composición de esta muestra está dominada por grava gruesa (malla 5), (malla 35), arena gruesa (malla 45), arena media (malla 60) y arena media/fina (malla 80), contando también con un porcentaje elevado de limos de diferente tamaño (malla 120 a >230).

7.7 Valores parámetros de Van Genuchten

Estos son utilizados como referencia para comenzar el procedimiento iterativo, de esta forma se parte de un buen punto inicial y se encuentran los valores idóneos de estos parámetros según la muestra de suelo con la que se esté trabajando.

Tabla 9. Valores de referencia para los parámetros de Van Genuchten [21].

Material	n	$\alpha (m^{-1})$
Arcilla	1.63	0.0095
Suelo fino	1.65	6.40
Mineral de $dp < 8''$	1.12	8.4

7.8 Valores de permeabilidad

A continuación, se presenta la variación de la permeabilidad intrínseca en razón del tamaño de grano de la respectiva arena. Estas fueron estimadas mediante diferentes modelos, con el fin de estudiar la mecánica de suelos y analizar la vulnerabilidad de este ante desastres naturales y/o casos de contaminación [22].

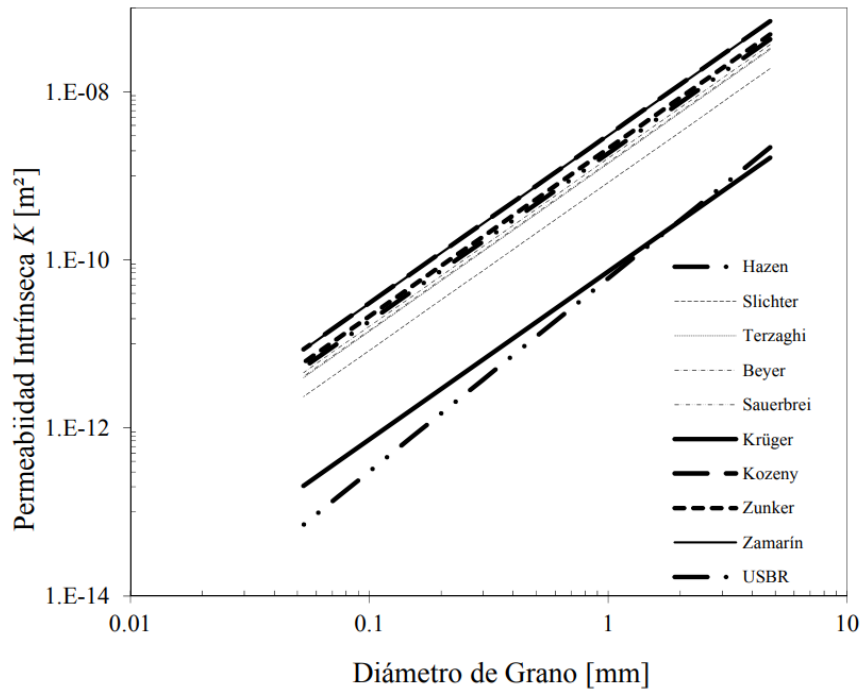


Figura 38. Valor de permeabilidad según las características del suelo [22].

7.9 Efecto de la porosidad

Los poros del suelo se pueden clasificar según su tamaño de la siguiente forma:

Tabla 10. Clasificación de Poros [18].

Tipo	Tamaño de poro (um)	Característica
Macroporos	Grandes: > 30 Pequeños: 30 - 9	Permite mejor la circulación de fluidos.
Mesoporos	Grandes: 9 - 3 Pequeños: 3 – 0,2	Mejor retención, por tanto, el fluido se mueve ms lento.
Microporos	< 0,2	El agua no accede a este tipo de poro, entonces queda atrapado o

		es adsorbido (impide el flujo libre).
--	--	---------------------------------------

A partir de ello, es posible determinar la cantidad de milímetros de fluido que infiltran en un suelo. Así, en suelos con buena macroporosidad la infiltración puede alcanzar valores entre 120 y 150 mm/h, mientras que en suelos con una alta proporción de meso y microporos la tasa de infiltración se reduce a 40 mm/h o menos [24].

7.10 Características del petróleo crudo

7.10.1 Clasificación según grado API

Tabla 11. Clasificación del crudo según el grado API (Instituto Americano del Petróleo) [3]

Tipo de crudo	Gravedad API	Densidad aproximada [kg/m^3]
Ligero	Superior a 31.1°	Menos de 870
Medio	Entre 31.1° y 22.3°	870 a 920
Pesado	Entre 22.3° y 10°	920 a 1000
Extrapesado	Inferior a 10°	Superior a 1000

En base a esto se puede especificar que el crudo con el que se estaba trabajando corresponde a un crudo ligero, siendo su gravedad API de 38.9 y densidad de 830 kg/m^3 .

7.10.2 Correlación para cálculo de viscosidad

Para el crudo se utilizó la correlación empírica Glasø,

$$\mu_{od} = 3.14 * 10^{10} * T(^{\circ}F)^{-3.444} * \log(^{\circ}API)^{[10.313 * \log(T(^{\circ}F)) - 36.447]} \quad (18)$$

Esta correlación tenía algunos requisitos para ser utilizada: (1) grado API entre 20 – 48 y (2) Temperatura del crudo entre 50 – 300 °F [28]. Ambos son cumplidos, pues el grado API es de 38.9 y la temperatura de almacenamiento corresponde a la temperatura ambiente (68 °F). Mediante este cálculo se obtuvo una viscosidad de 4.48 cP (20°C) $\rightarrow 0.0045 \frac{kg}{m*s}$, cuyo valor es consistente con el encontrado en bibliografía, siendo un valor de 4.9 cSt (20°C) [3] $\rightarrow 0.0041 \frac{kg}{m*s}$.

Posteriormente se terminó utilizando un crudo de mayor viscosidad, por lo que usando la misma fórmula (debido a que aplica al caso), temperatura y grado API de 30.2 se llegó al siguiente resultado $0.015 \frac{kg}{m*s}$.

7.11 Estudio de suelo en la octava región

Cuando se hace referencia al suelo, este puede ser caracterizado desde distintos enfoques según la disciplina que lo estudie. No obstante, existe un criterio común ampliamente aceptado: su clasificación textural, la cual permite anticipar el comportamiento del suelo frente al paso de fluidos, entre otras propiedades.

La textura del suelo corresponde a su composición elemental, determinada por las proporciones relativas en masa de las fracciones minerales primarias: arena, limo y arcilla, también conocidas como separados texturales [8]. Esta propiedad es clave para comprender el comportamiento del suelo frente al agua y otros procesos, ya que depende directamente del tamaño de las partículas. Cuando predominan partículas grandes, el suelo tendrá una textura arenosa, mientras que, si predominan partículas finas, será de textura arcillosa.

Los suelos se componen de partículas minerales de distintos tamaños, y su textura determinada por la proporción relativa de arena, limo y arcilla influye directamente en su capacidad para retener y conducir el agua u otros fluidos [10].

Los suelos arcillosos, dominados por partículas muy finas ($< 0,002$ mm), presentan una alta capacidad de retención de agua debido a su gran superficie específica y a la presencia de microporos. Sin embargo, esta retención puede ser tan fuerte que el agua no siempre está fácilmente disponible para las plantas, lo que, sumado a su lenta permeabilidad, puede generar problemas de aireación y compactación. Por otro lado, los suelos limosos, con partículas intermedias en tamaño, también poseen una buena retención hídrica, aunque algo menor que la de los suelos arcillosos. Estos suelos son suaves al tacto y tienden a compactarse con facilidad, lo que puede afectar negativamente la infiltración y el drenaje. Finalmente, los suelos arenosos, formados por partículas gruesas y visibles al tacto, tienen una baja capacidad de retener agua, ya que los poros grandes permiten un drenaje rápido. Aunque ofrecen buena aireación y son fáciles de trabajar, requieren un manejo cuidadoso del riego, ya que el agua se pierde rápidamente y la disponibilidad para las raíces es limitada. Estas propiedades texturales son fundamentales al momento de evaluar la dinámica del agua en el suelo [8].



Figura 39. Comparación de tamaños entre arena, limo y arcilla [10].

7.11.1 Composición del suelo en la costa de la región

En la zona costera objeto de estudio, los suelos presentan una composición dominada por materiales de origen sedimentario, con una importante influencia de procesos marinos y continentales. La textura predominante en superficie corresponde a fracciones arenosas y franco-limosas, mientras que en el subsuelo pueden encontrarse horizontes con mayor proporción de arcilla, generando una estratificación que influye directamente en el comportamiento hidráulico del perfil.

Desde el punto de vista físico, estos suelos muestran una alta porosidad superficial, especialmente por la presencia de macroporos en la fracción arenosa, lo que favorece un rápido drenaje del agua. Sin embargo, esta misma condición limita la capacidad de retención hídrica, lo que puede traducirse en una baja disponibilidad de agua útil para procesos vegetativos o de transporte de solutos. A medida que se profundiza en el perfil, los horizontes arcillosos presentan menor permeabilidad, actuando como barreras que ralentizan o incluso impiden el avance del agua hacia capas inferiores.

En términos generales, el suelo costero de esta región se comporta como un medio heterogéneo y estratificado, donde la combinación de texturas genera zonas de rápida infiltración seguidas por capas de acumulación o flujo lateral. Esta configuración es relevante al momento de analizar el transporte de soluciones líquidas o contaminantes, ya que condiciona tanto la velocidad como la trayectoria de los fluidos en el sistema suelo [20].

Adicionalmente, se cuenta con un mapa geológico (revisar Anexo 7.11.2), el cual permite identificar con mayor precisión el tipo de suelo presente en la zona, así como las formaciones rocosas subyacentes. Esta información es fundamental, ya que las características geológicas influyen

directamente en el comportamiento del suelo frente al movimiento de fluidos, afectando propiedades como la permeabilidad, la retención de agua y la interacción con compuestos presentes en soluciones líquidas.

7.11.2 Mapa geológico del sector costero de la provincia de Concepción

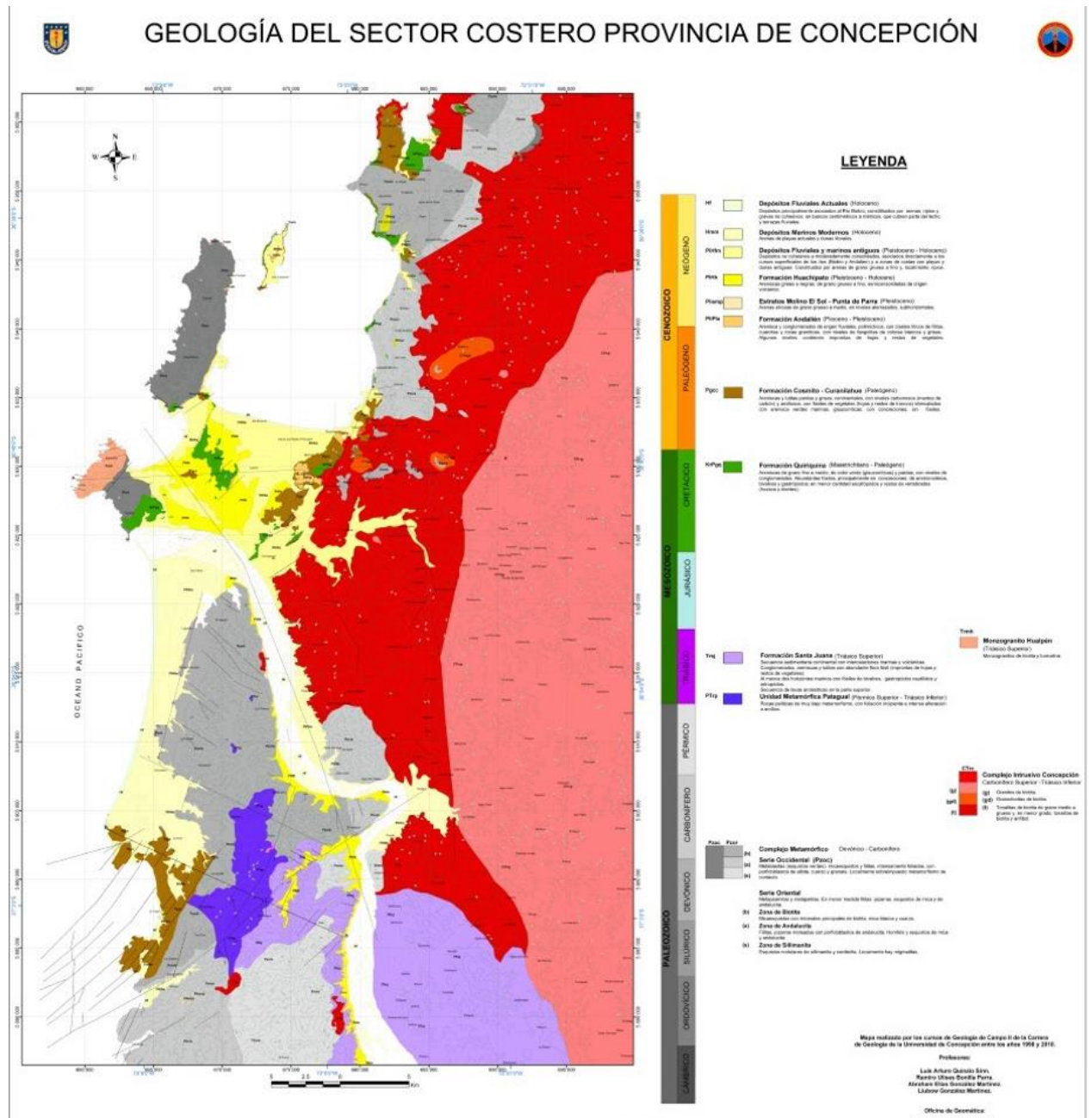


Figura 40. Poster de mapa geológico [26].