UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE MEDIOS CON SATURACIÓN VARIABLE

POR

Benjamín Maximiliano Herbías Vidal

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción

para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía

Dr. Ramón Díaz Noriega

Enero, 2026

Concepción, Chile

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mis padres, por su amor incondicional, por su apoyo en cada etapa de mi vida y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi hermano y a mi prima-hermana, por acompañarme siempre, por las risas, las conversaciones y el apoyo que me han brindado durante toda la vida.

A Chachi, gracias por su paciencia, por la confianza que ha depositado en mí y por creer en este proyecto incluso cuando yo dudaba y me sentía cansado. Su compañía y apoyo emocional fueron fundamentales para que esta memoria llegara a término.

También agradecer a todos mis amigos y amigas que conocí durante la universidad, quienes hicieron este proceso más llevadero y significativo, aportando no solo apoyo académico, sino también amistad, compañerismo y buenos momentos que recordaré siempre.

A mi profesor guía, le agradezco por su orientación, disposición y apoyo en el desarrollo de esta memoria. Sus comentarios, sugerencias y exigencia académica contribuyeron de manera decisiva y significativa a la calidad de este trabajo.

Agradecer a los tíos de los laboratorios que colaboraron en el desarrollo físico del equipo experimental. Su ayuda práctica, disposición y buena voluntad fueron clave para materializar las ideas y hacer posible la realización de esta investigación.

Finalmente, gracias Dios.

Resumen

La lixiviación en pilas exige conocer con precisión el comportamiento hidráulico del material para definir tasas de riego que maximicen la recuperación sin comprometer la estabilidad de la pila. En esta memoria se determinó experimentalmente la relación entre presión y contenido de humedad volumétrico (*volumetric water content, VWC)* de un suelo granular de textura arenosa (regolito o "maicillo"), con el fin de obtener su curva de retención de humedad (SWRC) y la función de conductividad hidráulica no saturada K(h) bajo condiciones de saturación variable.

En primer lugar, se caracterizó el material mediante granulometría y clasificación textural USDA, confirmando su carácter predominantemente arenoso. Posteriormente se realizaron cuatro ensayos de drenaje en un equipo de presión (filtra test), aplicando presiones entre 1 y 500 kPa sobre muestras saturadas, mientras se registraba el contenido de humedad con el sensor MAS-1 conectado a un data logger LogBox BLE. A partir de los datos contenido de humedad y presión se construyó la SWRC y se ajustó mediante el modelo de van Genuchten utilizando RETC; la conductividad hidráulica saturada se obtuvo con un permeámetro de carga constante diseñado según normativa ASTM. Con los parámetros ajustados (θr, θs, α, n, K_s) se estimó la función conductividad en HYDRUS-1D y se transformó en tasas de riego equivalentes, identificando ventanas operativas para condiciones de lixiviación.

Las curvas de retención de humedad muestran el comportamiento típico de suelos arenosos: una zona de saturación efectiva a bajas presiones, una transición pronunciada donde pequeñas variaciones en la presión producen cambios significativos en el contenido de humedad y una zona residual con drenaje lento. La función conductividad permanece prácticamente constante a presiones bajas y luego decrece bruscamente, evidenciando alta porosidad y rápida pérdida de conectividad de poros. Se identificó un tramo sensible ($\log(h) \approx 1 - 2$), en el cual variaciones moderadas de presión sufre cambios importantes en la conductividad, definiendo un límite operativo para evitar encharcamientos, flujos preferenciales y una disminución de la eficiencia de lixiviación. El procedimiento desarrollado demuestra que es posible obtener de forma reproducible la SWRC y K(h) de materiales granulares y proporciona una base cuantitativa para el diseño hidráulico de pilas de lixiviación.

Abstract

Heap leaching operations require an accurate hydraulic characterization of the ore bed to define irrigation rates that maximize metal recovery while preserving heap stability. This thesis experimentally determined the relationship between pression and water content for a granular, sandy saprolite to derive its soil water retention curve (SWRC) and the unsaturated hydraulic conductivity function K(h) under variable saturation.

The material was first characterized by grain-size distribution and USDA textural classification, confirming a predominantly sandy texture. Four controlled-suction drainage tests were then performed in a pressure apparatus (filtra test), applying air pressures between 1 and 500 kPa to saturated samples while recording volumetric water content with a MAS-1 sensor connected to a LogBox BLE datalogger. From the volumetric water content and pressure data, the SWRC was constructed and fitted with the van Genuchten model in RETC, whereas the saturated hydraulic conductivity was obtained using a constant-head permeameter designed according to ASTM guidelines. The fitted parameters (θr, θs, α, n, K_s) were subsequently used in HYDRUS-1D to estimate K(h), which was converted into equivalent irrigation rates to delineate operational windows for heap leach conditions.

The resulting SWRCs exhibit the characteristic behavior of sandy materials, with an effective saturation zone at low suctions, a sharp transition where small changes in pression induce large variations in water content, and a residual zone with slow drainage. The K(h) function remains nearly constant at low pressures and then drops rapidly, indicating high porosity and a fast loss of pore connectivity. A particularly sensitive interval ($\log(h) \approx 1–2$) was identified, in which moderate changes in pression lead to pronounced variations in hydraulic conductivity, thus defining an operational limit beyond which ponding, preferential flow and reduced leaching efficiency are more likely. The developed procedure proves that it is feasible to reproducibly obtain SWRC and K(h) for granular materials and provides a quantitative basis for hydraulic design and optimization of industrial heap leach systems.

Tabla de contenidos

1 Introducción 1

1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Objetivos 4

1.2.1 Objetivo general 4

1.2.2 Objetivos específicos 4

2 Marco Teórico 5

2.1 Lixiviación 5

2.2 Humedad y conductividad hidráulica 7

2.3 Física del flujo en la zona no saturada 9

2.4 Curva de retención de humedad 12

2.5 Función de conductividad hidráulica 14

2.6 Ajuste de la curva de retención de humedad y estimación de la función de conductividad hidráulica 15

2.7 Métodos experimentales de laboratorio 15

2.7.1 Experimentos tradicionales 15

2.7.2 Tendencias experimentales actuales 16

2.7.3 Experimentos con sensores 17

3 Desarrollo experimental 19

3.1 Descripción del material ensayado 19

3.2 Determinación de la granulometría 20

3.3 Determinación de la textura del suelo 20

3.4 Determinación de la humedad en función de la presión de poro 23

3.5 Determinación de la conductividad hidráulica saturada 28

3.6 Construcción y ajuste SWRC 30

3.7 Herramienta informática RETC 32

3.8 Programa HYDRUS-1D 36
4 Resultados y discusión 42
4.1 Resultados de datos del filtra test 42
4.2 Resultados del ajuste de curva de retención de humedad 44
4.3 Resultados estimación función conductividad hidráulica 47
5 Conclusiones y recomendaciones 51
6 Referencias 53
7 Anexos 60
7.1 Anexo A. Resultados prueba de tamizado 60
7.2 Anexo B. Resultados prueba de difracción láser 60
7.3 Anexo C. Interfaz y uso de NXperience 63

Índice de Figuras

Figura 1. Lixiviación en pilas (CML, 2022)..... 5
Figura 2. Esquema de circuito de lixiviación en pilas (Petersen, 2016)..... 7
Figura 3. Curvas características para suelos con diferentes texturas. (Pérez, 2008). 13
Figura 4. Curva característica de un suelo fino (limo) (López & Mendoza, 2016) 13
Figura 5. Material utilizado para estudio..... 19
Figura 6. Curva granulométrica..... 20
Figura 7. Diagrama de flujo para determinar textura. 21
Figura 8. Triángulo de textura: USDA (colores personalizados) (Jiménez, 2019)..... 22
Figura 9. a) peso del material, b) peso del agua, c) riego del material, d) material saturado, e) material saturado en la cámara, f) cámara cerrada, g) valor de presión en el manómetro, h) sensor midiendo humedad en el material. 23
Figura 10. Componentes equipo filtra test. 24
Figura 11. Filtra Test..... 25
Figura 12. Sensor MAS-1..... 26
Figura 13. LogBox BLE (Novus Automation, n.d.). 26
Figura 14. Diagrama de flujo para obtener datos de contenido volumétrico de agua. 27
Figura 15. Diagrama de flujo para obtener conductividad hidráulica 28
Figura 16. a) Boceto permeámetro b) permeámetro en laboratorio (Fuentes, 2025). 30
Figura 17. Diagrama de proceso para construcción de SWRC 31
Figura 18. Diagrama de procesos ajuste SWRC 33
Figura 19. Programa RETC - Tipo de problema 33
Figura 20. Programa RETC - Unidades de tiempo y espacio..... 34
Figura 21. Programa RETC - Tipo de modelo de ajuste. 34
Figura 22. Programa RETC - Parámetros de flujo de agua..... 35
Figura 23. Programa RETC - Datos curva de retención..... 35
Figura 24. Programa RETC – a) Gráfico propiedades hidráulicas del suelo, b) Archivos con datos de salida. 36
Figura 25. Diagrama de proceso para obtención de función conductividad hidráulica. 37
Figura 26. Programa HYDRUS-1D – Procesos principales..... 37
Figura 27. Programa HYDRUS-1D - Información de geometría..... 38

Figura 28. Programa HYDRUS-1D - Información de tiempo. 38
Figura 29. Programa HYDRUS-1D – a) Información de impresión, b) Criterios de iteración. 39
Figura 30. Programa HYDRUS-1D – Modelo hidráulico del suelo. 39
Figura 31. Programa HYDRUS-1D - Parámetros del flujo de agua. 40
Figura 32. Programa HYDRUS-1D - Condiciones de borde para el flujo de agua..... 40
Figura 33. Programa HYDRUS-1D - Propiedades hidráulicas del suelo..... 41
Figura 34. Programa HYDRUS-1D - Variable horizontal..... 41
Figura 35. Programa HYDRUS-1D - Variable vertical..... 41
Figura 36. Curvas de retención de humedad sin ajustar de los experimentos. 44
Figura 37. Curvas retención de humedad ajustadas, a) experimento 1, b) experimento 2, c) experimento 3, d) experimento 4..... 47
Figura 38. Función conductividad hidráulica, a) experimento 1, b) experimento 2, c) experimento 3, d) experimento 4..... 49
Figura 39. Gráfico distribución granulométrica 63
Figura 40. NXperience - Ventana de inicio 63
Figura 41. NXperience - Creación de configuración 1..... 64
Figura 42. NXperience - Creación de configuración 2..... 64
Figura 43. NXperience - Creación de configuración 3..... 65
Figura 44. NXperience - Creación de configuración 4..... 65
Figura 45. NXperience - Creación de configuración 5..... 66
Figura 46. NXperience - Creación de configuración 6..... 66
Figura 47. NXperience - Monitoreo 1 67
Figura 48. NXperience - Monitoreo 2 67
Figura 49. NXperience - Monitoreo 3 68

Índice de Tablas

Tabla 1. Masa en gramos y porcentaje obtenida para cada intervalo de textura. 22
Tabla 2. Clases texturales de suelo del sistema USDA (Jiménez, 2019). 22
Tabla 3. Valores de presión aplicadas 28
Tabla 4. Organización de datos recolectados experimento filtra test 31
Tabla 5. Valores medios parámetros de los suelos (W. J. Rawls et al., 1982). 32
Tabla 6. Datos contenidos de humedad, presiones y tiempos de experimentos. 44
Tabla 7. Parámetros de entrada para ajuste de curva de retención de humedad 46
Tabla 8. Resultados prueba de tamizado completa. P1=prueba 1, P2=prueba 2, P3=prueba 3, PP= promedio de pruebas. 60
Tabla 9. Resultados prueba difracción láser 61

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Chile es un país minero, con una industria que aporta al Producto Interno Bruto (PIB) nacional un 14% aproximadamente y a nivel regional, especialmente Antofagasta y Atacama, representa un 69% y 41% respectivamente. Además, no solo aporta a la economía por su producción, sino que también impulsa el empleo, el desarrollo de servicios y de infraestructura, generando un ecosistema económico vital (Sociedad Nacional de Minería, 2025).

La mayor proporción mundial de reservas de cobre conocidas pertenecen a Chile, con un 21,3% del total y alberga a los tres mayores productores de cobre del mundo, que son BHP, Codelco y Freeport McMoRan. La empresa estatal Codelco opera ocho minas en todo Chile, BHP opera dos minas en Chile, Escondida y Pampa Norte, que abarca las operaciones de Spence y Cerro Colorado. En cuanto a Freeport McMoRan solo tiene una operación minera activa en Chile que corresponde a El Abra. (Global Business Reports, 2024).

La disminución de las leyes de mineral ha contribuido en gran medida al aumento de los costos de producción en las minas de cobre chilenas, con una caída promedio de leyes del 0,72% en 2014 al 0,58% en 2023. Las grandes empresas de cobre están desarrollando nuevas tecnologías de procesamiento para desbloquear el potencial de los recursos. Tradicionalmente, los métodos basados en lixiviación se utilizan para procesar minerales de óxido primario y sulfuro secundario, mientras que el sulfuro primario representa la mayoría de los recursos de cobre identificados (COCHILCO, 2024).

Las tecnologías innovadoras, como el Nuton de Rio Tinto y el Cuprochlor-T de Antofagasta Minerals, podrían abrir el espacio de los sulfuros primarios y ayudar a la industria a producir cobre de manera más eficiente al reducir el consumo de energía. Nuton es una tecnología de lixiviación biológica para extracción de cobre a partir de sulfuros primarios, luego de la lixiviación el proceso produce cobre de alta pureza en el lugar, eliminando los procesos de fundición y refinación convencional (Rio Tinto, 2024). Cuprochlor-T es un proceso de lixiviación en medio cloruro para la extracción de cobre desde sulfuros primarios mediante el uso de soluciones con cloruro que mejoran la disolución del mineral en pilas, alcanzando recuperaciones superiores al 70% (International Mining, 2022; Minera Zaldívar, 2023).Chile como el mayor poseedor de reservas de cobre puede beneficiarse

de esta tecnología para desbloquear los recursos de sulfuro de cobre de baja ley en las próximas décadas (Project Blue, 2023).

La lixiviación de minerales de cobre consiste en una disolución de compuestos de cobre en soluciones ácidas, es un proceso hidrometalúrgico bastante antiguo que se aplicaba originalmente a minerales oxidados. El incentivo para desarrollar los procesos hidrometalúrgicos provenía del hecho que los minerales oxidados de cobre de baja ley no eran susceptibles de ser concentrados por la operación convencional de flotación (Beckel, 2000).

La lixiviación en pilas es uno de los principales métodos de extracción de cobre que se utiliza en Chile. Domic (2012) habla de la importancia que tiene este método en la producción de cobre y, considerando el escenario de desarrollo tecnológico descrito anteriormente, se proyecta un mayor uso de pilas de lixiviación, tanto por su capacidad de incorporar recursos minerales antes considerados marginales, como por su aporte a la sustentabilidad y competitividad futura de la minería del cobre (InduAmbiente, 2024).

La lixiviación en pilas es un proceso para extraer minerales de baja ley mineral, incluido cobre y metales preciosos. El mineral extraído se tritura en trozos pequeños y se aglomera en partículas casi uniformes, y se amontona en una plataforma impermeable revestida de plástico donde se riega con una solución que contiene un agente lixiviante apropiado (Trujillo et al., 2011).

Actualmente existen diversas problemáticas en las pilas de lixiviación, y uno de estos es el riego. Este es un proceso complejo de controlar debito a la gran cantidad de factores que están presentes en la viabilidad del riego, las dimensiones que tienen las pilas y la heterogeneidad del material. Estas condiciones dificultan lograr un distribución homogénea del lixiviante y favorecen la aparición de flujos preferenciales, por lo que es un desafío realizar un riego uniformemente distribuido que optimice el uso de agua y reactivos (Minnovex A.G, 2025).

Para que la lixiviación sea un proceso exitoso se deben cumplir varios requerimientos, el primero de ellos es asegurar la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que el fluido lixiviante pase a través de todo el material para un óptimo contacto agente lixiviante-mineral (Codelco, 2019).

Bárzaga (2023), indica una falta de información de las propiedades y variables físicas críticas, dentro de las pilas. Las variables físicas junto con propiedades como la granulometría del mineral, la densidad de la pila, la permeabilidad de la pila, el flujo y la concentración de la solución de lixiviación,

entre otras, tienen un impacto directo en el proceso de disolución de minerales. Si no se conocen adecuadamente las variables físicas que describen el estado del sistema y los parámetros que describen las propiedades de la pila, se corre el riesgo de obtener una baja recuperación de los minerales y una tasa de disolución lenta lo que se traduce en una disminución de la rentabilidad del proceso.

El principal parámetro que describe el comportamiento hidráulico de una pila es la conductividad hidráulica del material que la conforma y se define como la capacidad del fluido para pasar a través de los poros y las rocas fracturadas (Saravanan et al., 2019), es decir, la facilidad con la que el agua puede moverse a través del material. Dentro de las variables físicas críticas también se encuentra el contenido de humedad, y la presión de poro. El contenido de humedad se define como la cantidad de agua en el suelo, que puede expresarse como contenido gravimétrico (g/g) o contenido volumétrico (cm^3/cm^3), que es adimensional y suele expresarse en porcentaje (Beadle et al., 1985). Por otra parte, la presión de poro se define como la presión ejercida por los fluidos atrapados dentro de los espacios poros de la roca (Abhishek & Partha, 2023), cuando la presión de agua en los poros es negativa se denomina succión matricial (Rahardjo et al., 1997).

En la literatura se reconoce que la curva de retención de humedad del suelo y la función conductividad hidráulica no saturada forman parte de propiedades hidráulicas esenciales para describir el flujo en la zona no saturada. Sin embargo, su caracterización experimental sigue siendo uno de los principales cuellos de botella en el estudio de suelos, debido a la dificultad de obtener relaciones confiables entre succión, contenido de agua y conductividad, a la elevada incertidumbre asociada a los parámetros ajustados y al hecho de que las campañas de laboratorio y campo suelen ser procesos largos y costosos (Angelaki et al., 2023; Baroni et al., 2010; Ghanbarian-Alavijeh et al., 2010; Hohenbrink et al., 2023; Rawls & Brakensiek, 1989). Como consecuencia, muchos estudios recurren a funciones de pedotransferencia o a esquemas de estimación indirecta de las propiedades hidráulicas a partir de información más simple (por ejemplo, textura o densidad aparente), aceptando un aumento en la incertidumbre de las simulaciones y limitando la confiabilidad de los modelos de flujo en la zona no saturada (Loosvelt et al., 2011; Weller et al., 2011).

En base a los antecedentes expuestos, se formula como hipótesis de trabajo que se puede obtener la relación entre la presión de poro y el contenido de humedad de un material granular permitiendo determinar la curva de retención de humedad y la función conductividad hidráulica para su aplicación al diseño de pilas de lixiviación, con el objetivo de mejorar la comprensión del comportamiento del flujo a través de la pila en condiciones de saturación variable.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar experimentalmente la conductividad hidráulica y la curva de retención específica de un material granular.

1.2.2 Objetivos específicos

Recopilar información bibliográfica relacionada con pilas de lixiviación, columnas de lixiviación y la física del flujo en medios con saturación variable.

Identificar las metodologías experimentales de laboratorio utilizadas a nivel internacional para la determinación de los parámetros hidráulicos en materiales granulares con saturación variable.

Desarrollar una metodología experimental de laboratorio basada en las metodologías internacionales identificadas.

Realizar ensayos sistemáticos para obtener los parámetros hidráulicos asociados a un medio granular con saturación variable, con el fin de construir la curva de retención de humedad y estimar la función conductividad hidráulica.

2 Marco Teórico

2.1 Lixiviación

La lixiviación es la operación unitaria fundamental de la hidrometalurgia y su objetivo es disolver en forma parcial o total un sólido con el fin de recuperar algunas especies metálicas contenidas en él (Simpson, 2003).

Los métodos de lixiviación corresponden a la forma en que se contactan soluciones lixiviantes con las menas que tienen contenidos metálicos de interés. Los métodos más conocidos son lixiviación in situ, lixiviación en botaderos (dump leaching), lixiviación en pilas (heap leaching), lixiviación en bateas (vat leachinng), lixiviación por agitación y lixiviación a presión (Simpson, 2003).

La lixiviación en pilas es uno de los métodos más utilizados para extraer el cobre contenido en los minerales y que en los últimos años ha sido implementado en Chile para minerales de baja ley. En la Figura 1 se tiene una fotografía real de una pila de lixiviación.

El método consiste en formar pilas de gran superficie, y en algunos casos de gran altura, con el mineral que contiene cobre. Estas son regadas en su parte superior con soluciones ácidas, cuyo principal compuesto es el ácido sulfúrico, esta solución de ácido se infiltra hasta la base de la pila. En la base, la solución es recogida por el sistema de drenaje y llevada fuera del sector de las pilas mediante el sistema de evacuación (López, 2012).

Figura 1. Lixiviación en pilas (CML, 2022).

Las pilas pueden ser dinámicas (también conocidas como tipo “on-off”), en las que el mineral se remueve, se envía a botadero después de la lixiviación y la base de la pila puede ser reutilizada. Para las pilas dinámicas, se puede elegir cualquier configuración que sea aceptable para la operación

de los equipos de carga y descarga, generalmente se prefiere un rectángulo alargado. Por otro lado, están las permanentes donde las nuevas pilas son cargadas sobre las anteriores, aprovechando la impermeabilización ya existente. La configuración de una pila permanente puede tener cualquier geometría según las disponibilidades de espacio de cada lugar, pero cuando no hay restricciones topográficas, normalmente se usa una configuración rectangular (Codelco, 2019; Domic, 2001)

Las pilas se construyen sobre un revestimiento inferior impermeable, protegido con una membrana de plástico que puede ser de tipo polietileno de alta densidad (HDPE), de baja densidad (LDPE), de muy baja densidad (VLDPE) o de cloruro de polivinilo (PVC), que puede tener desde 0,1 mm a 1,5 mm de espesor equipado con un sistema de recolección de solución. Debajo de la pila se colocan tuberías de aireación (Codelco, 2019; Petersen, 2016).

El material extraído de la mina es fragmentado mediante chancado primario y secundario (eventualmente terciario), con el objeto de obtener un mineral de un tamaño máximo de 1,5 a ¾ de pulgadas, equivalente a 19 a 38 mm. Luego, se crea la pila mediante un cinta transportadora o vertido con camiones, pero generalmente resulta en una compactación indeseable de la superficie de la pila por parte de los camiones. En el trayecto el material es sometido a una primera irrigación con una solución de agua y ácido sulfúrico, conocido como proceso de curado (Petersen, 2016; Zabala, 2013)

Las alturas de la pila suelen ser de 6 a 10 metros, hay excepciones de pilas más altas para reducir la huella de la operación. La pila se riega desde la superficie superior mediante aspersores, pulverizadores o emisores de goteo (Petersen, 2016).

El sistema de riego instalado permite distribuir las soluciones ya sea por medio de un sistema de goteros, que pueden estar instalados bajo la superficie de la pila cuando las condiciones son extremas o por medio de aspersores a una tasa de riego tal que no produzca desmoronamiento de la pila. Estas tasas de riego están en el orden de 5 a 20 [$l/m^2/h$], en un ciclo mínimo de 45 días. La cantidad de días de riego va a depender de la ley de cobre que tenga el mineral y de su calidad física. (Codelco, 2019; Zabala, 2013).

La elección del sistema de riego depende principalmente de las condiciones ambientales, velocidades e intensidades de los vientos, tasa de evaporación solar y temperaturas día-noche del medio ambiente. Una vez finalizado el tiempo de riego, y tras percolar la solución a través de toda la pila, se recolecta en la base una la solución rica en cobre, llamada también PLS (Pregnant Leach Solution) (Zabala, 2013).

La Figura 2 muestra una representación esquemática de un circuito típico de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre; el principio es el mismo para otros procesos de lixiviación en pilas (Petersen, 2016).

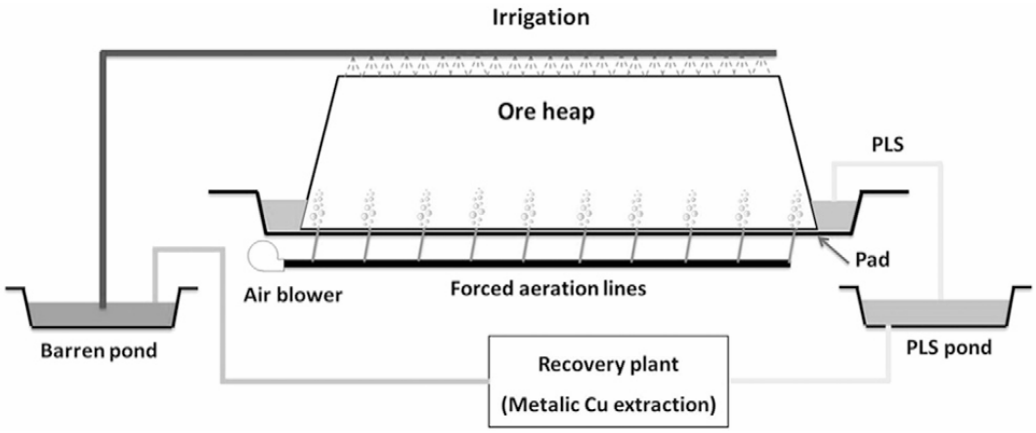

Figura 2. Esquema de circuito de lixiviación en pilas (Petersen, 2016).

La construcción de la pila está precedida por un proceso de trituración y aglomeración que determina las propiedades hidrodinámicas de la pila: estabilidad mecánica, tamaño de partícula, porosidad y permeabilidad (Cariaga et al., 2015).

Existen diversos factores que deben ser considerados en las etapas del proceso y uno de ellos es el tamaño de las partículas. Desde un punto de vista hidrometalúrgico es favorable tener una reducción de tamaños, ya que aumenta la recuperación del cobre. Sin embargo, esto disminuye la permeabilidad del mineral afectando negativamente el drenaje de la pila y la recuperación de las soluciones (López, 2012).

Los análisis matemáticos y mediciones han demostrado que la permeabilidad está determinada principalmente por el área superficial, forma y distribución de los poros en relación con la dirección del flujo. El tamaño de las partículas del suelo y su empaquetamiento determina el tamaño de los poros individuales. La forma y disposición de las partículas determinan la forma de los poros, y el tamaño, la forma y la disposición de los poros en conjunto determinan la porosidad (Terzaghi et al., 1996).

2.2 Humedad y conductividad hidráulica

La humedad se define como la cantidad de agua contenida en un líquido o sólido por adsorción o absorción que pueden eliminarse sin alterar sus propiedades químicas (Fraden, 2016). El agua contenida en el suelo puede ser de tres tipos: agua gravitacional, agua capilar y agua higroscópica. El

agua gravitacional es aquella porción que excede la cantidad que el suelo puede retener bajo las condiciones existentes y, por lo tanto, drena libremente. El agua capilar es la parte que se retendría en los espacios capilares bajo estas condiciones y que es capaz de moverse a través de la acción capilar. El agua higroscópica es la que se encuentra en la superficie de los granos, y que no es capaz de moverse mediante la acción de la gravedad o las fuerzas capilares (Briggs, 1897).

Para determinar el contenido de humedad del suelo los investigadores han empleado varias técnicas, que se puede clasificar en técnicas clásicas y técnicas modernas tanto para mediciones de laboratorio como in situ. Las técnicas clásicas de medición de humedad del suelo incluyen la técnica termogravimétrica y de carburo de calcio, mientras que las técnicas modernas utilizan sensores de resistividad del suelo, tensiómetros, balance de humedad infrarroja, técnicas dieléctricas, es decir, reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) y técnica de capacitancia, sensores de humedad del suelo, sistemas microelectromecánicos y ópticas técnicas. A pesar de la gran cantidad de técnicas, métodos y sensores, tanto las técnicas clásicas como las modernas presentan incertidumbre relacionada a la exactitud, precisión, cobertura y volumen de las mediciones (Lekshmi et al., 2014).

La conductividad hidráulica es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la cual los poros del suelo permiten el flujo del agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua y la conductividad está en su máxima expresión, es representada como K_s (conductividad hidráulica saturada), mientras que en condiciones no saturada se representa como $K(\theta)$ (Reichardt & Timm, 2004). Para determinar la conductividad hidráulica se han desarrollado una serie de métodos de laboratorio y campo; sin embargo, hay que considerar que estos métodos presentan problemas con la variabilidad espacial, la exactitud de los procedimientos y la escala de medición (Gabriels et al., 2006).

Los métodos de laboratorio utilizados para obtener K_s son el método del permeámetro de carga constante y el método del permeámetro de carga variable. Para la conductividad hidráulica no saturada, se emplea el método de evaporación en columna corta y el método del perfil instantáneo. Los métodos de campo se dividen los de zona saturada como el método del pozo y método del piezómetro, y para la zona no saturada se tiene el Infiltrómetro de doble anillo, permeámetro de Guelph, Infiltrómetro de disco e Infiltrómetro de tensión (Gabriels et al., 2006; Šimůnek et al., 1998; Watson, 1966).

2.3 Física del flujo en la zona no saturada

En esta sección se describen los modelos fisicomatemáticos que se adoptarán para estudiar el flujo en la zona no saturadas del suelo.

El flujo de agua en los suelos parcialmente saturados se modela a partir de la ley de conservación de la masa y de la ley de Darcy-Buckingham, que está definida por:

$$\vec{q} = -K\nabla \mathrm{H} \tag{1}$$

Donde q $[L][T]^{-1}$ es el caudal de agua por unidad de superficie en el suelo, K $[L][T]^{-1}$ es la conductividad hidráulica, θ es el contenido de humedad y H es el potencial hidráulico. La ley de Darcy-Buckingham para el flujo de la zona no saturada es:

$$q_i = -K(\theta)\,\frac{\partial H}{\partial x_i} \tag{2}$$

Donde $q_i = q_x$, q_y y q_z para i = 1, 2, 3 respectivamente, y junto a la Ecuación de Continuidad, definida por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla q \tag{3}$$

Donde θ es el contenido de humedad y t es tiempo. La combinación de la Ec. (2) y Ec (3) forman la llamada Ecuación General de Flujo no Saturado.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K(\theta)\,\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K(\theta)\,\frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K(\theta)\,\frac{\partial H}{\partial z}\right) \tag{4}$$

El potencial hidráulico, también se puede escribir:

$$H = \Psi + z \tag{5}$$

Ahora, al reemplazar la Ec. (5) en la Ec. (4) se obtiene la Ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K(\theta)\,\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K(\theta)\,\frac{\partial \Psi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K(\theta)\,\frac{\partial \Psi}{\partial z} + K(\theta)\right) \tag{6}$$

Dado que θ está relacionado a Ψ vía la curva retención de humedad, se puede expresar K(θ) como K(Ψ), a través de la Capacidad Específica de Agua C(Ψ) definida como la pendiente de la curva de retención de humedad (Ritzema, 1994); la Ec. (6) puede ser transformada en una ecuación con una variable dependiente.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial\theta}{\partial\Psi} \cdot \frac{\partial\Psi}{\partial t} = C(\Psi)\frac{\partial\Psi}{\partial t} \tag{7}$$

Reemplazando K(θ) por K(Ψ), y sustituyendo la Ec. (7) en la Ec. (6), se tiene la ecuación de Richards:

$$C(\Psi)\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K(\Psi)\ \frac{\partial\Psi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K(\Psi)\ \frac{\partial\Psi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K(\Psi)\ \frac{\partial\Psi}{\partial z}\right) + \frac{\partial K(\Psi)}{\partial z} \tag{8}$$

Para este trabajo se considera solo el flujo vertical (z positivo hacia abajo), entonces la Ec. (8) se reduce a:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\Psi)\left(\frac{\partial\Psi}{\partial z} + 1\right)\right] \tag{9}$$

Para unificar las variables se reescribe el termino $\frac{\partial\Psi}{\partial z}$:

$$\frac{\partial\Psi}{\partial z} = \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \cdot \frac{\partial\theta}{\partial z} \tag{10}$$

Reemplazando la Ec. (10) en la Ec. (9), se obtiene:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\left(\frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \cdot \frac{\partial\theta}{\partial z} + 1\right)\right] = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \cdot \frac{\partial\theta}{\partial z} + K(\theta)\right] \tag{11}$$

Sabiendo que la difusividad de agua en el suelo está definida por:

$$D(\theta) = K(\theta)\ \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \tag{12}$$

La ecuación 11 queda entonces:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right] + \frac{\partial}{\partial z}K(\theta) \tag{13}$$

Para resolver la Ecuación de Richards presentada en la sección anterior, es necesario proporcionar las características hidráulicas del material: la curva de retención de humedad θ(h) y la función conductividad hidráulica K(h). Estas relaciones constitutivas permiten definir la capacidad específica del agua C(Ψ) y como varía la conductividad hidráulica con el potencial de presión. Sin determinar θ(h) y K(h), la ecuación de Richards queda incompleta y no se puede calcular la presión y el contenido de humedad en tiempo y espacio.

Uno de los modelos más utilizados para representar la curva de retención de humedad es la ecuación de van Genuchten, mostrada en la Ec. (14). En esta expresión, el contenido de humedad θ se describe como una función continua del potencial de presión h.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m} \quad (14)$$

En la Ec. (14), θ_r [-] es el contenido de humedad residual (adimensional); θ_s [-] es el contenido de humedad de saturación (adimensional); α es un parámetro de forma; ψ: es la presión de succión; n es un parámetro de forma adimensional y m = 1 - ⅟n (Marzan, 2013). Los parámetros θ_r, θ_s, α y n se obtienen ajustando la Ec. (14) a los datos experimentales de contenido de humedad medidos a distintas presiones.

Por otro lado, la variación de la conductividad hidráulica no saturada puede describirse mediante distintos modelos. Una de las alternativas es el modelo de Brooks y Corey, presentando en la Ec (15).

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^\eta \quad (15)$$

Donde K_s $[L][T]^{-1}$ es la conductividad hidráulica saturada y η es un parámetro de forma (Mota, 2016).

El modelo de Brooks y Corey describe la curva de retención de humedad mediante una función por tramos, con un cambio marcado en la presión de entrada de aire. Esto tiende a generar una transición más abrupta entre el estado saturado y el no saturado, en cambio la ecuación de van Genuchten entrega una curva suave y continua en todo el rango de presión (Brooks & Corey, 1964; van Genuchten, 1980). Esta diferencia en la forma funcional puede influir en la representación de la zona próxima a la saturación y en el comportamiento numérico de los modelos de flujo no saturado que utilizan estas curvas como entrada, motivo por el cual en muchas aplicaciones prácticas y códigos de simulación se privilegia la parametrización de van Genuchten – Mualem para definir $\theta(h)$ y $K(h)$ (Šimůnek et al., 1998).

La ecuación de van Genuchten – Mualem Ec. (16) se utiliza para describir la conductividad hidráulica no saturada ya que permite obtener una expresión analítica explicita y sin discontinuidades de la conductividad hidráulica no saturada en función de la saturación efectiva $K(S_e)$ a partir de la curva de retención $\theta(h)$, usando un conjunto de parámetros (θ_r, θ_s, α, n, L y K_s). A partir de $\theta(h)$ se calcula primero $S_e(h)$, luego $K(S_e)$ y por composición se tiene $K(h)$.

$$K(S_e) = K_s S_e^L \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}}\right)^{\frac{1}{n-1}}\right]^2 \quad (16)$$

Donde K_s [L][T]$^{-1}$ es la conductividad hidráulica saturada; L [-] la conectividad tortuosa entre los poros que se estima normalmente como 0.5 (adimensional); la saturación relativa, S_e [-] (adimensional) es: (Lozano et al., 2005).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (17)$$

Frente a distintos modelos, como Brooks y Corey o Gardner, el modelo de van Genuchten – Mualem entrega la función de conductividad hidráulica K(h) más suave y numéricamente estable, adecuada para representar flujo en medios granulares.

Para modelar el flujo transitorio se tiene la ecuación de Richards, la cual, con condiciones de frontera y condiciones iniciales apropiadas proporciona los campos de succión en el espacio y tiempo. Se requiere de la curva de retención de humedad y la función de conductividad hidráulica para hacer empleo de esta ecuación (López & Mendoza, 2016).

2.4 Curva de retención de humedad

La curva de retención de humedad, también conocida en inglés como *soil water retention curve* (SWRC) relaciona el contenido de agua en la muestra con la presión de succión. La naturaleza de la curva está directamente asociada a la composición granulométrica y estructura del suelo (Pérez, 2008). La SWRC constituye una relación fundamental para describir el comportamiento de los suelos parcialmente saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993). En la Figura 3 se muestra la relación que existe entre el contenido de agua del suelo y la presión, y como varía en función del tipo de suelo.

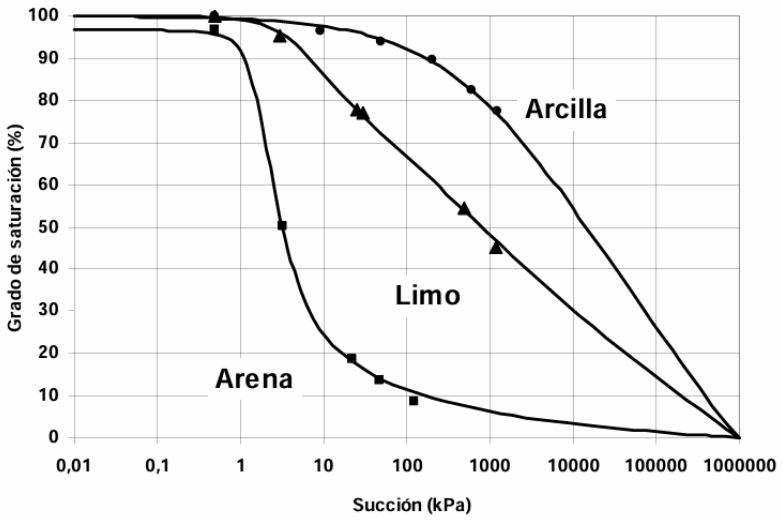

Figura 3. Curvas características para suelos con diferentes texturas. (Pérez, 2008).

La curva característica de retención de humedad está compuesta por tres zonas que describen el proceso de desaturación de un suelo: a) zona capilar, b) zona de transición, y c) zona residual. Además, proporciona el valor de entrada del aire, valor residual, contenido de agua saturado y el contenido de agua residual (Figura 4).

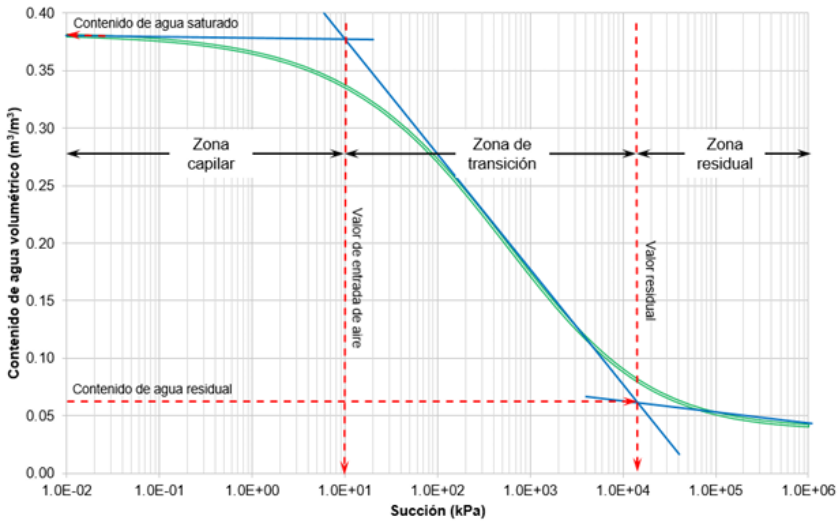

Figura 4. Curva característica de un suelo fino (limo) (López & Mendoza, 2016)

Zona capilar: zona donde el suelo se mantiene en estado saturado, esta termina con el valor de entrada de aire (Fredlund, 1999), que se define como el valor de la succión mátrica antes del ingreso de aire en los macroporos del suelo (López & Mendoza, 2016).

Zona de transición: zona donde el agua es desplazada por aire en los poros. El agua drena de los poros y es desplazada por aire. Esta termina en el contenido de agua residual, donde el agua en los poros se vuelve discontinua y el coeficiente de permeabilidad se reduce (Fredlund, 1999).

Zona residual: zona donde el agua está fuertemente adsorbida a las partículas del suelo y el flujo ocurre en forma de vapor (Fredlund, 1999). En esta zona un incremento de la succión no produce un cambio importante en el contenido de agua (Hosagasi-Fuselier, 2006).

Valor de entrada de aire: representa la succión en la que el aire comienza a desalojar el agua de los poros, iniciando por los de mayor tamaño (López & Mendoza, 2016).

Valor residual: representa el valor de la succión en la que la fase líquida del suelo empieza a ser discontinua y adopta la forma de películas delgadas alrededor de las partículas del suelo (López & Mendoza, 2016).

Contenido de agua residual: contenido de agua donde se requieren valores altos de succión para remover el agua adicional de la masa de suelo (López & Mendoza, 2016).

Contenido de agua saturado: contenido de agua presente en el suelo en estado saturado (López & Mendoza, 2016).

Para ajustar la SWRC se utilizan los modelos de ajustes, que son ecuaciones experimentales o empíricas que ayudan a definir la curva con base en los datos obtenidos de pruebas de laboratorio. Estos se utilizan cuando se tienen datos de laboratorio, pero debido a la dispersión de los valores resulta necesario aplicar modelos de ajustes para obtener una curva representativa del material (López & Mendoza, 2016).

2.5 Función de conductividad hidráulica

La función conductividad hidráulica permite representar la relación que existe entre la conductividad hidráulica y la succión del suelo, pudiendo expresarse en función del grado de saturación o del contenido de agua volumétrico del suelo. Las técnicas de estimación se fundamentan en las propiedades de la masa del suelo, la curva de retención y el coeficiente de conductividad hidráulica (López & Mendoza, 2016). La función conductividad hidráulica no saturada disminuye a medida que aumenta la succión o disminuye el contenido de agua (Gallage et al., 2013).

La conductividad hidráulica es un parámetro importante ya que afecta al entorno controlando la infiltración, tasa de riego, y por consecuencia el flujo del agua a través de una pila de lixiviación.

(Sakellariou-Makrantonaki et al., 2016). El valor de esta disminuye con el contenido de agua en el suelo, a medida que disminuye el contenido de humedad de un suelo, el número total de caminos a lo largo de los cuales el fluido puede viajar disminuye (McCartney et al., 2007).

Para realizar una estimación correcta de la función de conductividad hidráulica, se recomienda primero determinar la curva de retención de humedad, ya que la función conductividad hidráulica hace uso de los parámetros ajustados en dicha curva. (López & Mendoza, 2016).

2.6 Ajuste de la curva de retención de humedad y estimación de la función de conductividad hidráulica

Para realizar el ajuste de la curva de retención de humedad de suelo se usa el modelo de van Genuchten, el cual entrega el ajuste de los parámetros que relacionan el contenido de humedad presente en el suelo y la presión. Resolver este modelo es de gran complejidad por lo que el ajuste puede realizarse con Excel, Python, RStudio u otro software de análisis. Además, existen programas especializados, como Hydrus-1D, RET-C, Rosetta y SWRC-Fit. La mayoría de estos disponen de alguna versión en línea o de prueba que permiten su uso sin costo.

Luego de realizar el ajuste mediante algún software de análisis o programa especializado se obtienen los parámetros: θ_r (contenido de humedad residual); θ_s (contenido de humedad de saturación); α (parámetro de forma) y n (parámetro de forma adimensional). Al tener los parámetros ajustados se puede construir la curva de retención de humedad.

La función conductividad hidráulica se puede estimar mediante el modelo estadístico de van Genuchten-Mualem, el cual hace uso de los parámetros ajustados anteriormente. También, hay otras técnicas de estimación para esta función, como los modelos empíricos, modelos de correlación y modelos de regresión (López & Mendoza, 2016).

2.7 Métodos experimentales de laboratorio

Existen variados métodos experimentales para obtener en el laboratorio los parámetros hidráulicos que permiten caracterizar hidrodinámicamente una pila de lixiviación. Estos métodos se dividen en tradicionales o actuales, y dispositivos no comerciales equipados con sensores de humedad.

2.7.1 Experimentos tradicionales

Los diferentes autores han empleado múltiples métodos de laboratorio para la obtención de parámetros hidráulicos,

Martínez-Fernández (1995), para determinar la relación contenido de humedad (θ) en función de la succión (Ψ), empleó el método del recipiente de tensión hídrica combinado con la membrana a presión. En Edafología frecuentemente se trabaja con el potencial pF definido como el logaritmo decimal de la succión Ψ expresada en centímetros de altura de agua, es decir, $pF = log_{10}(\Psi)$ (Samper, 2014). El recipiente de tensión hídrica permite medir los valores de la curva de retención de humedad, de pF 0 a pF 2,7 y la membrana a presión complementa midiendo hasta pF 4,2. Además, se concluyó que la combinación de estos dispositivos permite obtener experimentalmente un número suficiente de puntos de la curva para calcularla en toda su extensión de manera adecuada y precisa.

Iiyama (2016), midió el potencial mátrico (h) definido como el potencial de presión que surge de la interacción entre el agua y la matriz de partículas sólidas en la que está incrustada el agua (Marshall et al., 1979).. El procedimiento utilizado para obtener valores fue por los métodos de columna de agua colgante y placa de presión, donde el rango de medición del potencial matricial fue de -1000 < h [cm] < 0.

Roy et al. (2018), combinaron la celda Tempe y la placa de presión, los cuales abreviaron como HTP, para obtener la curva de retención de humedad de tres tipos de suelos distintos. Además, compararon las curvas obtenidas con el equipo HYPROP combinado con el potenciómetro de punto de rocío WP4 que abreviaron como HW, de lo cual concluyeron que el método HW construyó una mejor curva de retención de humedad debido a los rangos de medición mejorados para obtener los parámetros de ajuste de van Genuchten. Sin embargo, para ambos métodos obtuvieron valores de R^2 similares, esto indica que el método (HW) y el tradicional (HTP) son adecuados para estimar los parámetros de van Genuchten.

Huang et al. (2021), utilizaron los sensores TensioMark para monitorizar el potencial matricial del suelo en el rango de 0 [hPa] a -100.000 [hPa] los cuales tienen una precisión de medición de ±5% del valor medido. El contenido de agua del suelo (θ) lo monitorearon mediante el método de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR). El θ lo calcularon a partir de la permitividad dieléctrica del suelo. Para los datos obtenidos, las curvas de retención de agua las ajustaron con el modelo de van Genuchten.

2.7.2 Tendencias experimentales actuales

El HYPROP 2 es un equipo utilizado actualmente en laboratorios para la determinación de la curva característica de humedad del suelo y obtener la conductividad hidráulica no saturada de las

muestras de suelo. Otro instrumento es el WP4C que determina la humedad relativa del aire sobre una muestra en una cámara sellada. Combinar los datos obtenidos de estos instrumentos permite generar curvas de liberación de humedad completas en todo el rango de humedad (METER Group, n.d.).

Roy et al. (2018), utilizaron el método HYPROP y WP4 (HW) para medir el potencial mátrico del suelo y el contenido de agua correspondiente para los suelos del estudio. El conjunto de medición HYPROP contiene una unidad de sensor con un anillo de muestreo de suelo de acero inoxidable (250 ml) conectado a un computador instalado con el software de evaluación de datos. Los tensiómetros pertenecientes a la unidad de sensor midieron los potenciales mátricos que oscilaron entre 0 y -100 [kPa] aproximadamente. Los datos del potencial mátrico y cambio de peso de la muestra de suelo los registraron continuamente hasta que el potencial mátrico colapsó (demasiado seco) en ambos tensiómetros. Además, se midió la densidad seca y el contenido final de agua de las muestras de suelo.

El WP4 es un potenciómetro de punto de rocío que determina los potenciales mátricos de agua del suelo y el rango de medición es de 0 a -300.000 [kPa]. Este método es adecuado para medir los potenciales mátricos en el rango seco, importante para construir la curva de retención de humedad del suelo.

Otros autores también han utilizado la combinación de HYPROP y WP4C como lo es el caso de Singh & Verdi (2024), quienes usaron este sistema para evaluar los datos de retención de agua del suelo. Lipovetsky et al. (2020), quienes usaron por primera vez el conjunto HYPROP y WP4C para obtener estimaciones de las funciones de retención de agua y conductividad hidráulica de una muestra de roca.

2.7.3 Experimentos con sensores

Los sensores de humedad y de presión han sido utilizados por algunos autores para caracterizar hidráulicamente el comportamiento del suelo.

Inoue et al. (2000), utilizaron sensores de cuatro electrodos y minitensiómetros para determinar la curva de retención de agua del suelo a partir de la infiltración descendente en estado estacionario. El sensor de cuatro electrodos mide la CE (Conductividad eléctrica) del suelo la cual depende de la temperatura (T), la densidad seca del suelo (ρ), la concentración de sales en la solución del suelo (ECw) y el contenido volumétrico de agua en el suelo (θ). El minitensiómetro usado mide la presión matricial, el grado de humedad del suelo y sus cambios con el tiempo.

Luarte (2016), construyó una columna con el objetivo de poner en marcha un sistema que permitiera el monitoreo y adquisición de datos en línea del contenido de humedad. Esta estaba compuesta de nueve sensores RB-See-186 y cinco sensores MAS-1 ubicados a distintas alturas. El sensor RB-See-186 presentaba problemas para ser conectado al módulo de salida y de estabilidad. Para la solución al problema de alimentación propuso un circuito simple de amplificación de corriente compuesto por el amplificador operacional TL 081, probó el circuito usando una protoboard y obtuvo una respuesta satisfactoria. La solución que propuso al problema de la estabilidad fue evaluar obtener otro sensor, la primera alternativa que propuso fue el sensor de humedad EC-5 de Decagon pero fue descartado debido al bajo rango de salida. Finalmente evaluó el sensor de humedad MAS-1, también de Decagon, el cual fue seleccionado para utilizar ya que es fácil de alimentar y posee una estabilidad sumamente superior a la del sensor RB-See-186.

Martínez (2021), montó una columna con dos sensores los cuales entregaron valores de humedad volumétrica a partir de la medición directa de la conductividad eléctrica del suelo. Los sensores se conectaron a un Arduino que ejecuta un programa en Python donde se registraban los valores medidos por cada sensor en un intervalo de tiempo. Los sensores no captaron correctamente los datos iniciales del ensayo dado que la condición de montaje inicial es seca, sin embargo, el comportamiento mejora a medida que aumenta la humedad, para niveles de saturación superiores al 18% aproximadamente. Por lo tanto, los datos iniciales de los sensores no se consideraron.

3 Desarrollo experimental

En este capítulo se describen los procedimientos necesarios para caracterizar el material y para obtener la curva de retención y la función de conductividad hidráulica. Primero se determina la granulometría y la textura para caracterizar el regolito y contextualizar su comportamiento hidráulico. Luego se mide la conductividad hidráulica saturada mediante un permeámetro de carga constante. En paralelo, se realizan los ensayos para obtener el contenido volumétrico de agua (VWC) en función de la presión aplicada, con lo cual se construye la curva de retención de humedad sin ajuste y se estiman parámetros iniciales. Posteriormente, la curva se ajusta en RETC para obtener los parámetros hidráulicos ajustados del modelo de van Genuchten–Mualem. Finalmente, estos parámetros se ingresan en HYDRUS-1D para estimar la función conductividad. Cabe destacar que los procedimientos descritos corresponden a un único método reproducible, donde los resultados de cada etapa se utilizan como entrada de la etapa siguiente, permitiendo obtener la curva de retención de humedad y la función conductividad.

3.1 Descripción del material ensayado

En la Figura 5 se muestra el suelo utilizado, que consiste en un material granular sin cementación denominado “maicillo” que producto de la meteorización de granitos y cuya denominación geológica es regolito.

Figura 5. Material utilizado para estudio

3.2 Determinación de la granulometría

Para obtener la granulometría del material se utiliza la técnica de tamizado en seco, la cual consiste en separar las partículas de diferente tamaño pasando el material por tamices de distintas aberturas. Las aberturas y número de malla, y los resultados obtenidos de la prueba de tamizado que se aplica al material estudiado se pueden observar en la Tabla 8 del Anexo A.

La Figura 6 presenta las curvas granulométricas acumuladas obtenidas mediante tamizado en seco para tres repeticiones (P1–P3) y su promedio (PP), representando el tamaño de partícula (abertura de tamiz) en escala logarítmica. En el promedio (PP), el material presenta 0,22% de fracción gruesa mayor a 4,75 mm, 93,68% en el rango arena (0,075 – 4,75 mm) y 6,10% de finos (< 0,075 mm), confirmando una composición predominantemente arenosa. A partir de la curva promedio se estimaron tamaños característicos $D_{10} \approx 0{,}088$ mm, $D_{50} \approx 0{,}457$ mm y $D_{60} \approx 0{,}686$ mm, los cuales permiten sintetizar cuantitativamente la distribución de tamaños.

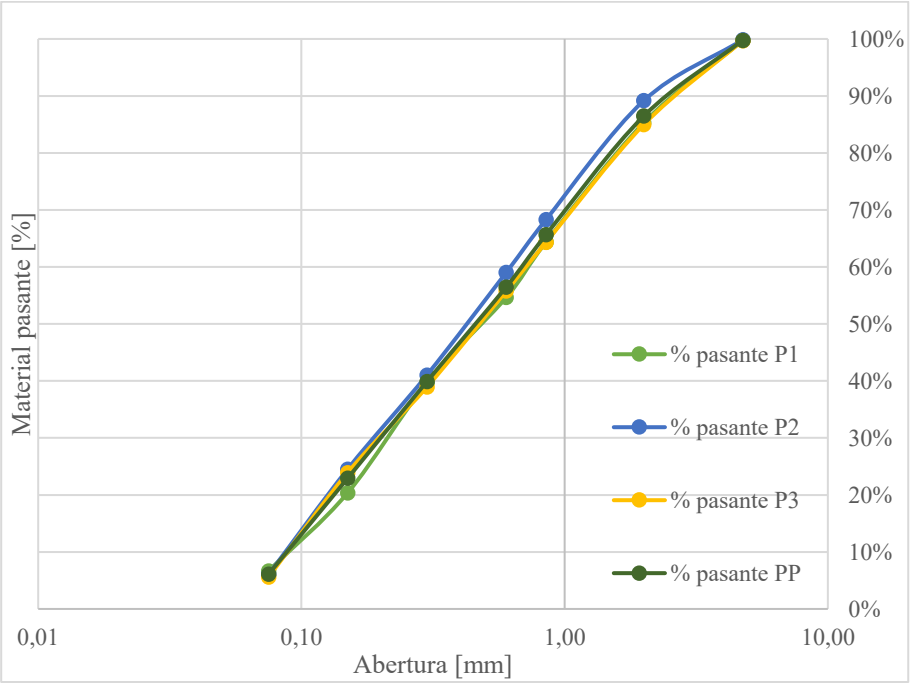

Figura 6. Curva granulométrica

3.3 Determinación de la textura del suelo

Según el triángulo de texturas del sistema USDA (U.S. Department of Agriculture) se determina el tipo de suelo con el que se está trabajando. En la Figura 7 se tiene un diagrama de flujo que detalla el proceso de cómo obtener los porcentajes correspondientes a arcilla, limo y arena. De los 177 g de regolito, 157 g fueron retenidos en el tamiz #200 y el resto fue clasificado mediante

difracción láser, en la cual la fracción fina se dispersa en suspensión y se hace atravesar una haz de láser para obtener la distribución de tamaño de partícula. Esto se realiza con el fin de poder caracterizar la fracción fina que no puede obtenerse adecuadamente por la técnica de tamizado. Finalmente, los resultados de la difracción láser se integraron con la fracción retenida en el tamiz #200, obteniéndose una composición aproximada de 0,34% de arcilla, 9,04% de limo y 90,62% de arena. Los resultados de la prueba de difracción láser se encuentran en el Anexo B.

En la Tabla 1 se tienen los intervalos para arcilla, limo y arena, junto a la masa en gramos y el porcentaje. En la Figura 8 se muestra el triángulo de texturas de USDA que sirve para determinar a qué tipo textura corresponde el regolito y los tipos de texturas se encuentran detallados en la Tabla 2, donde se encuentra la abreviatura, nombre en inglés y en español. Según los porcentajes presentes en la Tabla 1 se tiene que el regolito corresponde a una textura arenosa.

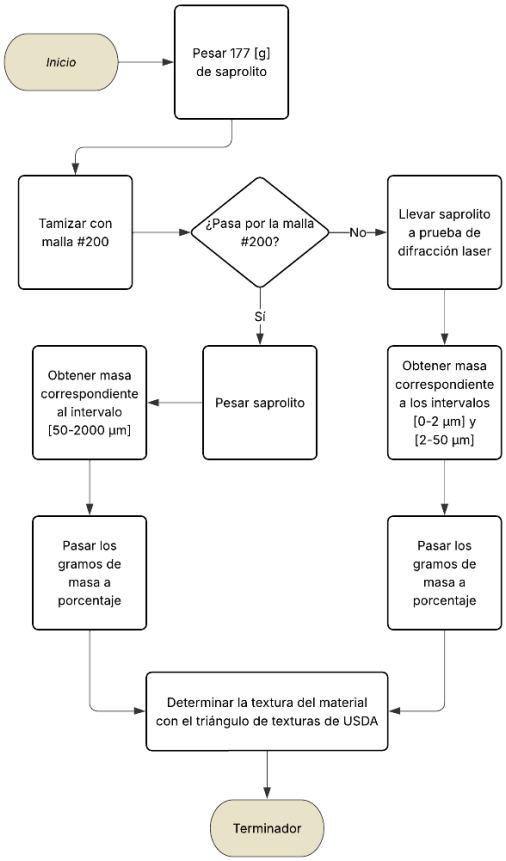

Figura 7. Diagrama de flujo para determinar textura.

Tabla 1. Masa en gramos y porcentaje obtenida para cada intervalo de textura.

Textura	Intervalo [µm]	Masa [%]
Arcilla	[0-2]	0,34%
Limo	[2-50]	9,04%
Arena	[50-2000]	90,62%

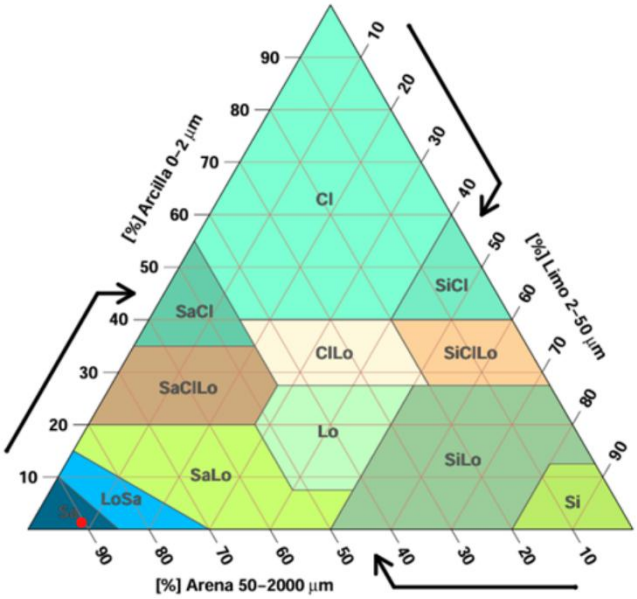

Figura 8. Triángulo de textura: USDA (colores personalizados) (Jiménez, 2019).

Tabla 2. Clases texturales de suelo del sistema USDA (Jiménez, 2019).

Abreviatura	Nombre inglés	Nombre español
Cl	Clay	Arcilla
SiCl	Silty clay	Arcillo limoso
SaCl	Sandy clay	Arcillo arenoso
ClLo	Clay loam	Franco arcilloso
SiClLo	Silty clay loam	Franco arcillo limoso
SaClLo	Sandy clay loam	Franco arcillo arenoso
Lo	Loam	Franco
SiLo	Silty loam	Franco limoso
SaLo	Sandy loam	Franco arenoso
Si	Silt	Limoso
LoSa	Loamy sand	Arenoso limoso
Sa	Sand	Arenoso

3.4 Determinación de la humedad en función de la presión de poro

Se realizan cuatro experimentos, el primer experimento contiene 70% p/p de regolito, el segundo experimento 66,7% p/p, el tercer y cuarto experimento 68,9% p/p. El regolito fue regado con agua de la llave (red potable) y no se registra su temperatura, por lo que se considera la temperatura ambiente correspondiente del agua tal como sale de la llave. Las variaciones de presión aplicadas van desde los 0,1 bar a los 5 bar. El motivo de solo llegar a 5 bar es porque la línea de aire comprimido que alimenta al equipo solo llega a esa presión.

Primero se deben pesar los 400 g de regolito, como se ve en la Figura 9a y también pesar los 200 ml de agua para el riego (Figura 9b). Luego, se riega el regolito con el agua ya pesada (Figura 9c). Cuando ya se encuentre saturado (Figura 9d) se introduce en la cámara del filtra test y se mide el contenido de humedad inicial del regolito (Figura 9e). Posterior a esto se cierra la cámara (Figura 9f) y se abre la llave de paso de aire para comenzar a aplicar presión al regolito (Figura 9g). Después de aplicar la presión por un tiempo determinado en el diseño experimental, se cierra la llave de paso de aire, se abre la cámara para introducir el sensor y obtener el valor del contenido de humedad (Figura 9h).

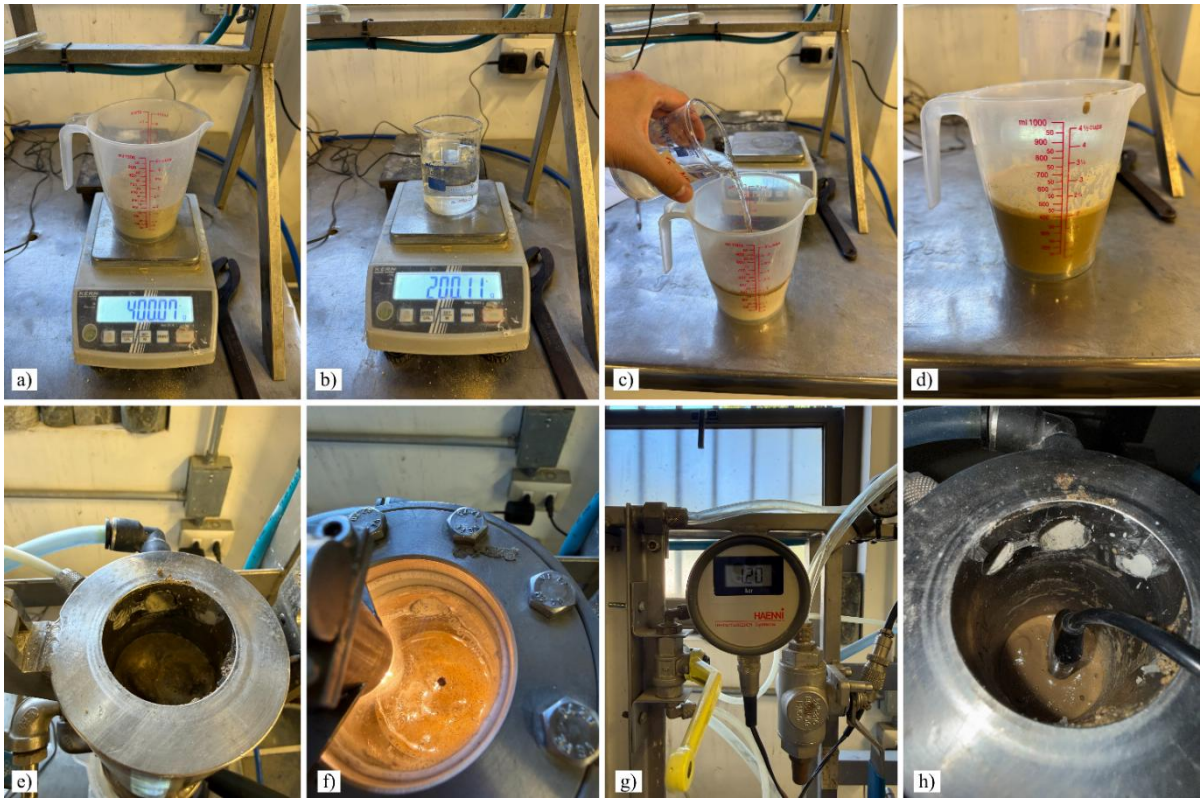

Figura 9. a) peso del material, b) peso del agua, c) riego del material, d) material saturado, e) material saturado en la cámara, f) cámara cerrada, g) valor de presión en el manómetro, h) sensor midiendo humedad en el material.

Para aplicar presión a la muestra ensayada se utiliza el equipo llamado filtra test, el cual permite imponer distintos niveles de presión durante el ensayo. El contenido volumétrico de agua de la muestra se determina mediante sensores de humedad, del tipo MAS-1 de Decagon Devices. En conjunto, ambos instrumentos permiten obtener pares de datos de presión y contenido volumétrico de agua.

El filtra test consta de distintas partes, detalladas en la Figura 10, y está diseñado para aplicar presión de aire a un suelo húmedo en un rango de entre 0,1 y 7 bar.

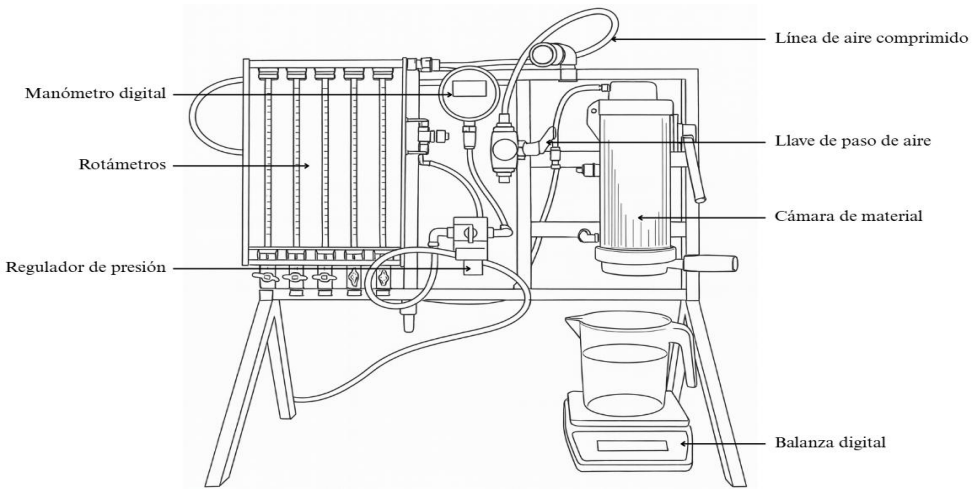

Figura 10. Componentes equipo filtra test.

Las partes del filtra test son:

Manómetro digital: instrumento que mide la presión de un fluido en un espacio cerrado. La ventaja que tiene el digital sobre el manómetro analógico (de aguja) es que el manómetro digital muestra valores numéricos. En este equipo tiene como objetivo medir y mostrar la presión aplicada al suelo.

Balanza digital: aparato que sirve para pesar. En este equipo tienen por objetivo determinar la masa de agua que drena a través del material después de cierta presión aplicada.

Aire comprimido: aire cuyo volumen ha sido reducido y, en consecuencia, aumenta su presión (RAE, n.d.). En este equipo es el aire que entra a cierta presión en la cámara del material.

Regulador de presión: dispositivo que sirve para mantener una presión constante o dentro de ciertos límites, en un sistema o flujo de fluidos. Su función en el filtra test es regular la presión que entra a la cámara del material y determinar una presión fija para aplicar al material.

Cámara del material: cilindro de acero donde se deposita el material húmedo, este cuenta con una tapa superior con un *O-ring* que permite realizar un cierre hermético, y en la parte inferior tiene una abertura por la cual drena el líquido.

Llave de paso de aire: controla el flujo de aire, permitiendo abrir o cerrar el paso de este hacia la cámara del material.

Rotámetros: instrumento para la medida del caudal que pasa por una conducción. Para los experimentos que se realizan en esta investigación, no se utilizan.

En la Figura 11 se muestra el filtra test utilizado para los experimentos realizados.

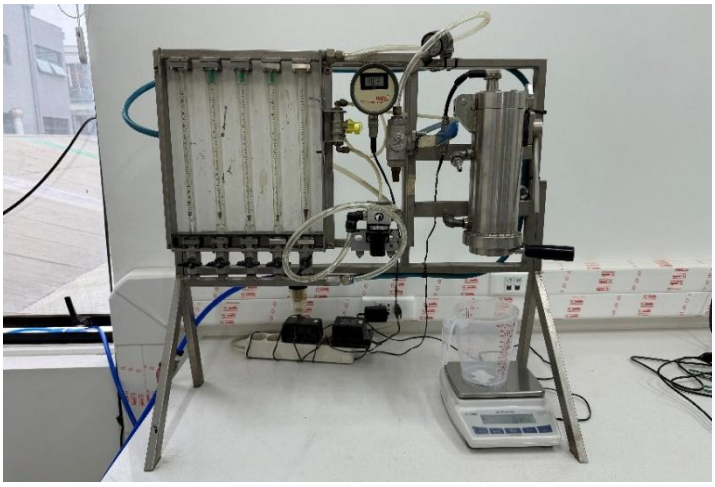

Figura 11. Filtra Test

El MAS-1 corresponde a un sensor de humedad del suelo, ofrece una salida estándar de 4-20 miliamperios. Este sensor determina el contenido volumétrico de agua (VWC) midiendo la constante dieléctrica del medio utilizando tecnología de dominio de capacitancia/frecuencia. Tiene una exactitud de ±6% con calibración genérica de hasta 65% de VWC, por encima de este valor la precisión disminuye. Se puede lograr una precisión mayor con una calibración específica del medio (METER Group, n.d.). En la Figura 12 se muestra el sensor MAS-1 que se utiliza en esta investigación para medir el contenido de humedad (en porcentaje) del material después de haber aplicado una cierta presión. Para leer los valores que mide el sensor de humedad se utiliza un data logger de la marca NOVUS modelo LogBox BLE.

Figura 12. Sensor MAS-1.

El fabricante del sensor MAS-1 proporciona una ecuación de calibración estándar para suelos minerales, la cual convierte la corriente de salida (mA) en contenido volumétrico de agua (VWC):

$$\theta = 0.00328 * I^2 - 0.0244 * I - 0.00565 \quad (18)$$

Donde θ es el contenido volumétrico de agua [m^3/m^3] e I es la corriente de salida del sensor [mA]. Para expresar θ en porcentaje (%) se debe multiplicar θ por 100. La Ec. (18) fue recalibrada para el regolito que se utiliza en esta investigación, resultando:

$$\theta = 0.00328 * I^2 - 0.0244 * I + 0.04512 \quad (19)$$

El LogBox BLE es un data logger bluetooth para hasta tres sensores analógicos y uno digital (Figura 13). Los canales analógicos aceptan conexión directa de sensores de temperatura tipo termocupla o Pt100 y sensores para otras magnitudes con señales de corriente o voltaje. El intervalo entre registros es configurable, y el usuario puede acceder a los parámetros utilizando un desktop o notebook conectado al interfaz USB a través del software NXperience o por comunicación Bluetooth de un smartphone o tablet Android por la aplicación NXperience Mobile en dispositivos móviles Android y iOS. Ambas aplicaciones permiten la configuración, recolección y análisis de los registros (Novus Automation, n.d.). En el Anexo C se muestra la interfaz del software NXperience.

Figura 13. LogBox BLE (Novus Automation, n.d.).

Este dispositivo es fundamental en la investigación ya que permite obtener los valores de contenido de humedad del material. Es importante destacar que se debe realizar una correcta conexión eléctrica para que el dispositivo no entregue lecturas erróneas. Las instrucciones detalladas de las conexiones para cada tipo de entrada se encuentran especificadas en el manual del *data logger*.

Para la toma de datos de contenido volumétrico de agua a diferentes presiones se sigue el procedimiento que se muestra en la Figura 14. En cada punto de medición, se interrumpe la presión aplicada, se abre la cámara del filtra test y se introduce el sensor, y luego se cierra nuevamente para reanudar la aplicación de presión y continuar con el siguiente escalón. Para complementar este diagrama la Tabla 3 recoge los valores de presión aplicados en kPa y bar, el tiempo de aplicación de cada presión se detalla en cada experimento realizado ya que para cada uno se tuvieron tiempos distintos. Cabe destacar que para cada ensayo se aplicaron las presiones en escalones durante distintos tiempos.

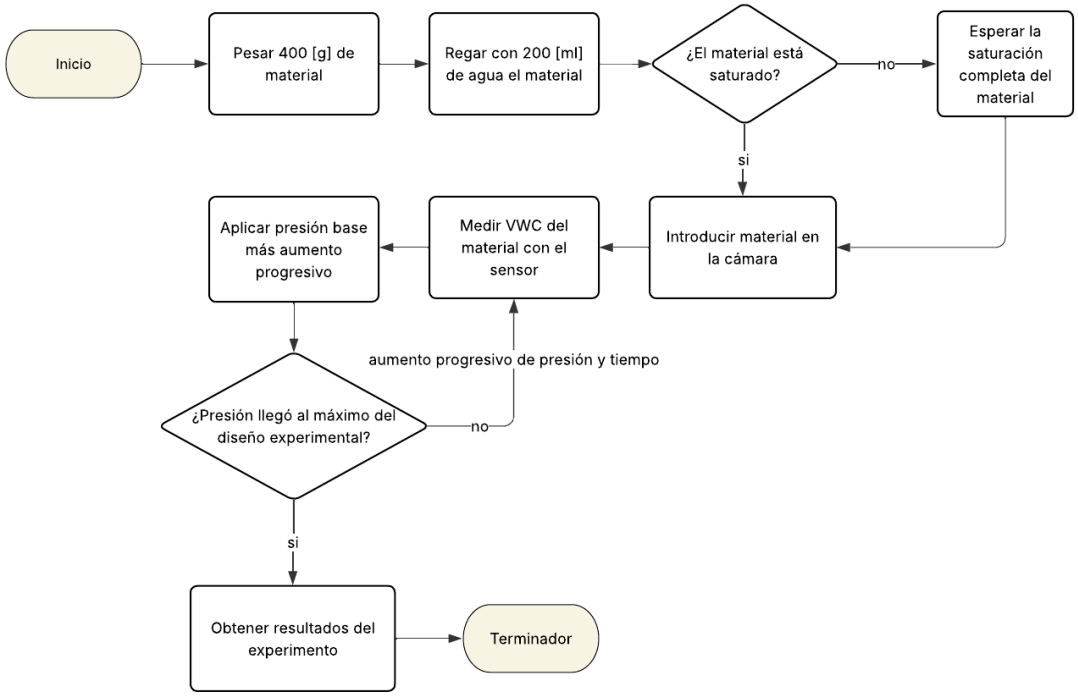

Figura 14. Diagrama de flujo para obtener datos de contenido volumétrico de agua.

Tabla 3. Valores de presión aplicadas

Presión [kPa]	Presión [bar]
1	0,01
2	0,02
4	0,04
8	0,08
15	0,15
30	0,30
60	0,60
120	1,20
250	2,50
500	5,00

3.5 Determinación de la conductividad hidráulica saturada

Para determinar la conductividad hidráulica saturada del material se utiliza un permeámetro diseñado para ensayar materiales granulares mediante carga constante y carga variable. El equipo presenta un diseño automatizado y acorde a la normativa vigente (ASTM E2242-21) (Bustos, 2024). En esta memoria se utiliza el modo de carga constante para obtener la conductividad hidráulica saturada K_s, siguiendo los pasos del diagrama de flujo de la Figura 15.

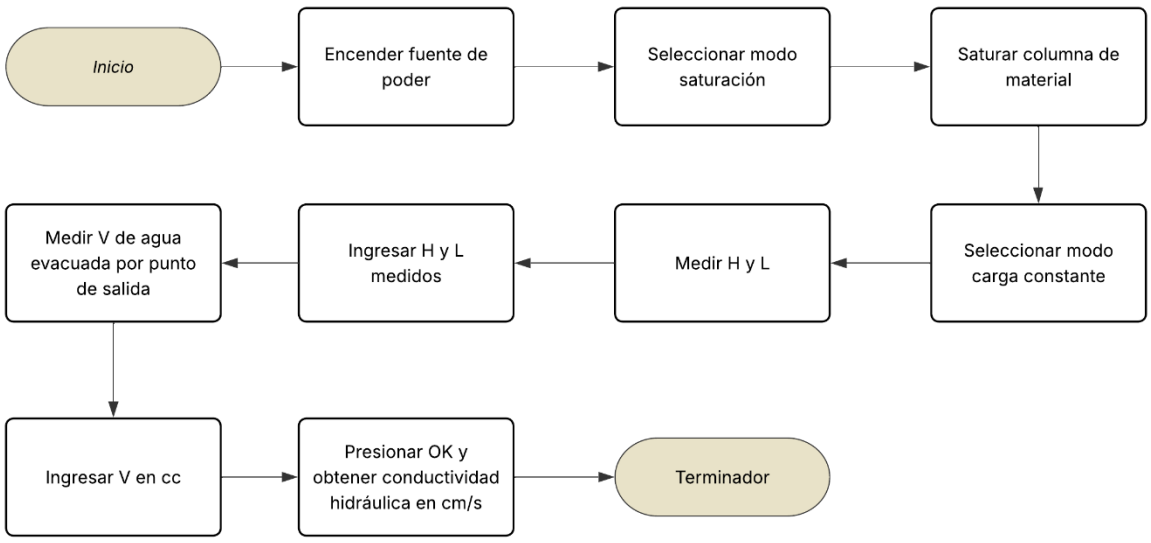

Figura 15. Diagrama de flujo para obtener conductividad hidráulica

En el modo de carga constante el usuario ingresa al equipo tres parámetros: (i) la altura H [cm], que corresponde a la distancia vertical entre el punto de salida de agua y el nivel alcanzado en el recipiente de PVC; (ii) el largo de la columna de material L [cm]; y (iii) el volumen total de agua V [cm³] recolectado durante el ensayo. Una vez definidos H y L, la bomba mantiene el nivel de agua prácticamente constante en el recipiente de PVC, de forma que la diferencia de potencial hidráulico total a lo largo de la columna (expresada como altura de agua H) y, por ende, el gradiente hidráulico H/L se mantienen constantes durante la medición. El agua que atraviesa el material es recogida en un tubo graduado durante un tiempo t [s], tras lo cual se detiene la bomba y se registra el volumen V.

El cálculo de la conductividad hidráulica se basa en la ley de Darcy, donde el caudal que atraviesa el material se define como:

$$Q = K * A * \frac{\Delta H}{L} \tag{20}$$

Donde Q es el caudal [L^3T^{-1}]; K es la conductividad hidráulica [LT^{-1}]; A es el área a través de la cual fluye el agua [L^2], la cual en este caso corresponde a 162,86 cm^2; ΔH es la diferencia de altura entre dos puntos [L]; L es la longitud del camino del flujo [L]. Despejando K y reemplazando Q=V/t, se obtiene la expresión (Ec. 21) implementada en el controlador del permeámetro.

$$K = \frac{Q * L}{A * \Delta H} = \frac{V * L}{A * \Delta H * t} \tag{21}$$

El equipo almacena internamente el valor del área y, a partir de los parámetros ingresados (H, L, V, t), calcula automáticamente la conductividad hidráulica mediante la ecuación anterior, mostrando el resultado en la pantalla LCD y registrándolo en la memoria del modo de datos de carga constante.

En la Figura 16a se tiene un boceto del permeámetro donde se pueden ver las partes que componen el sistema y en la Figura 16b una foto real del permeámetro en el laboratorio con las columnas con material.

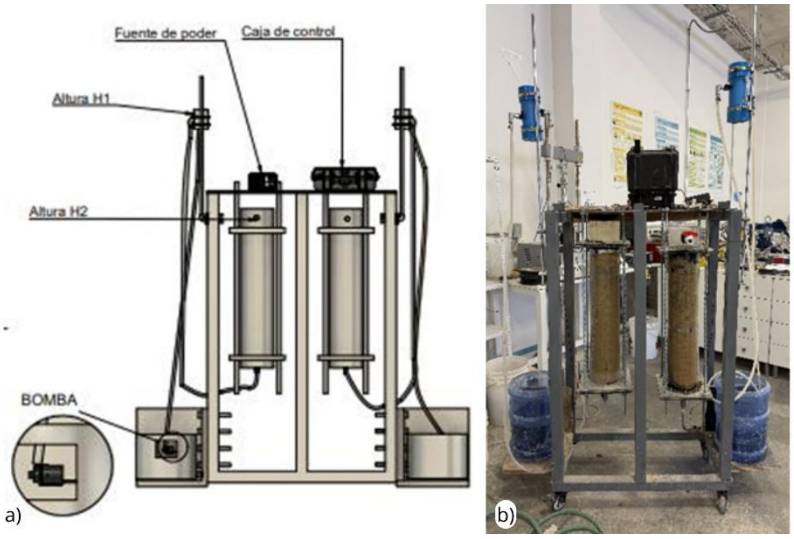

Figura 16. a) Boceto permeámetro b) permeámetro en laboratorio (Fuentes, 2025).

3.6 Construcción y ajuste SWRC

Los datos obtenidos de los experimentos en el filtra test son organizados en una tabla, la cual consta de dos columnas que tienen la presión en kPa y el contenido volumétrico de agua en porcentaje (Tabla 4). Es importante conocer el formato de esta tabla, así se entiende de qué forma se organizan los datos recolectados a medida que se realiza el experimento con el filtra test. De esto se obtiene la primera curva de retención de humedad sin ajustar la cual sirve para obtener de manera visual el contenido de humedad de saturación, el contenido de humedad residual y α, estos parámetros se usan posteriormente en RETC para obtener la curva ajustada. En la Figura 17 se tiene el diagrama de procesos para realizar la construcción de la curva de retención de humedad.

El contenido de humedad de saturación θ_s se identifica como el valor de los primeros puntos medidos a bajas succiones (entre 1–2 kPa), donde la curva se mantiene prácticamente horizontal y el material se encuentra saturado. En el extremo opuesto, el contenido de humedad residual θ_r se obtiene como el valor del contenido de humedad en el tramo de alta presión (entre 250 y 500 kPa), donde la curva vuelve a hacerse casi horizontal. El parámetro α está relacionado de manera inversa con la succión de entrada de aire para el secado o la succión de entrada de agua para la humectación (Benson et al., 2014). Para estimarlo, se identifica gráficamente en la curva el punto de inflexión entre la zona casi saturada y el tramo de drenaje más pronunciado, es decir, el punto a partir del cual el contenido de humedad comienza a disminuir de manera más rápida. La presión asociada a este punto h_a, se interpreta como una aproximación de la presión de entrada de aire, de modo que α se puede estimar como el inverso de dicha presión ($\alpha \approx 1/h_a$).

Tabla 4. Organización de datos recolectados experimento filtra test

Presión [bar]	Presión [kPa]	Contenido de humedad [%]
0,01	1	51,00%
0,02	2	46,02%
0,04	4	44,30%
0,08	8	20,10%
0,15	15	13,99%
0,30	30	7,01%
0,60	60	4,67%
1,20	120	2,19%
2,50	250	1,63%
5,00	500	1,52%

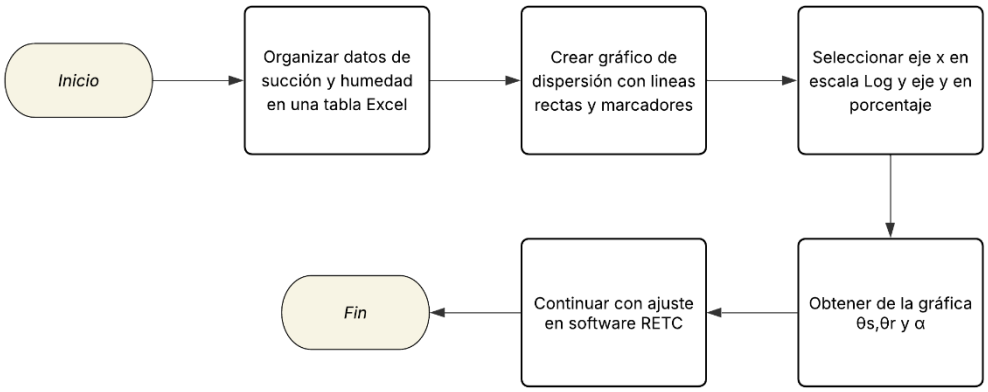

Figura 17. Diagrama de proceso para construcción de SWRC

El parámetro n no se obtiene directamente de la curva, sino que se selecciona en función de la textura del suelo. A partir de la caracterización granulométrica y de textura presentada en secciones anteriores (ver Capítulo 3.1 y 3.2), el material de estudio se clasifica como arena. Para este tipo de suelos, trabajos como los de (Rawls et al., 1982) reportan valores típicos de n. En este estudio se adoptó como valor inicial n=1,592 (véase Tabla 5), medio correspondiente a la clase textural del material.

Tabla 5. Valores medios parámetros de los suelos (Rawls et al., 1982).

Textura	θ_s (cm^3/ cm^3)	θ_r (cm^3/ cm^3)	K_s (cm/d)	α (1/cm)	n (-)
Arcilla	0,385	0,090	1,44	0,027	1,131
Franco arcilloso	0,390	0,075	5,52	0,039	1,194
Suelo franco	0,434	0,027	16,32	0,900	1,220
Franco arenoso	0,401	0,035	146,60	0,115	1,474
Franco limoso	0,486	0,015	31,68	0,048	1,211
Arcilla limosa	0,423	0,056	2,16	0,029	1,127
Franco arcillo-limoso	0,432	0,040	3,60	0,031	1,151
Arena	***0,417***	***0,200***	***504,00***	***0,138***	***1,592***
Arcilla arena	0,321	0,109	2,88	0,034	1,168
Franco arcillo-arenoso	0,330	0,068	10,32	0,036	1,250

La conductividad hidráulica saturada K_s se determina mediante ensayos de permeabilidad independientes, utilizando el permeámetro de carga constante/carga variable descrito en la sección 3.5. El valor de K_s=162,07 [cm/día] obtenido experimentalmente se ingresa en RETC como parámetro fijo para luego obtener la función de conductividad hidráulica no saturada K(h).

En resumen, θ_s, θ_r y α se estiman a partir de la curva de retención de humedad; el parámetro n se obtiene a partir de valores típicos reportados en la literatura para la textura del material, y K_s se determina en un ensayo independiente de permeabilidad. Estos parámetros se utilizan como valores de entrada para ajustar la curva de retención de humedad haciendo uso del modelo de van Genuchten Ec. (14). El ajuste se realiza mediante el software RETC, que es un programa informático que se puede utilizar para analizar las funciones de retención de agua y conductividad hidráulica de suelos no saturados. Estas propiedades hidráulicas son parámetros clave en cualquier descripción cuantitativa del flujo de agua hacia y a través de la zona no saturada (PC-Progress, n.d.).

3.7 Herramienta informática RETC

En este capítulo se describe la interfaz y como hacer uso del software RETC el cual cuenta con cinco ventanas previas al ajuste. En la Figura 18 se tiene el diagrama de procesos para realizar el ajuste de la curva de retención de humedad construida previamente en Excel.

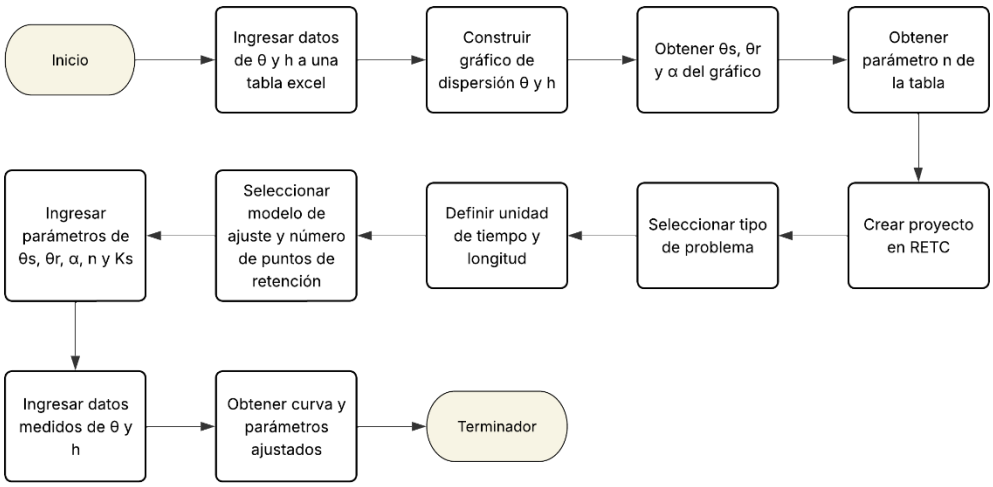

Figura 18. Diagrama de procesos ajuste SWRC

En la primera ventana de programa RETC (Figura 19) se muestra el tipo de problema y se debe seleccionar el ajuste que se desea obtener.

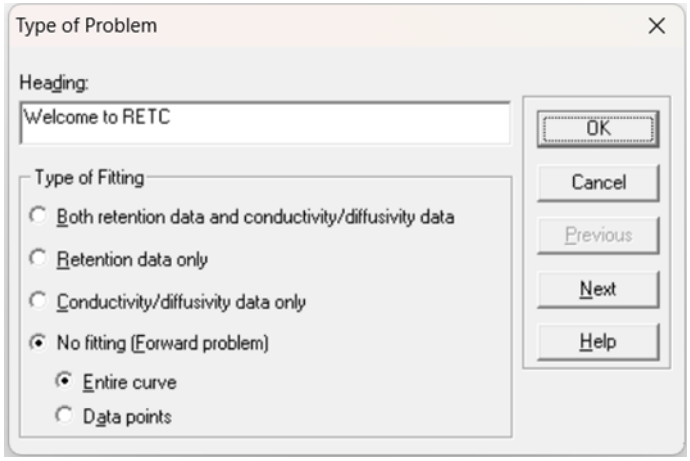

Figura 19. Programa RETC - Tipo de problema

Se pueden realizar cuatro tipos de ajustes :

Datos de retención y datos de conductividad/difusividad: ajusta usando conductividad hidráulica o difusividad y contenido de humedad en función de la presión, se usa cuando se tienen todos los datos.

Datos de retención: ajusta la curva de retención usando datos de contenido de humedad y presión, se usa cuando los datos son obtenidos de ensayos.

Datos de conductividad/difusividad: realiza ajuste usando los datos de conductividad hidráulica o difusividad, se usa cuando no se tiene el contenido de humedad en función de la presión

Sin ajuste (problema directo): calcula las funciones hidráulicas del suelo sin ajustar los parámetros. Se hace uso de este cuando se conocen los parámetros hidráulicos y solo se desea generar la curva (van Genuchten et al., 1991).

Luego, se pasa a la ventana donde se debe seleccionar las unidades de longitud que pueden ser milímetros [mm], centímetros [cm] o metros [m] y las unidades de tiempo que pueden ser segundos, minutos, horas o días (Figura 20).

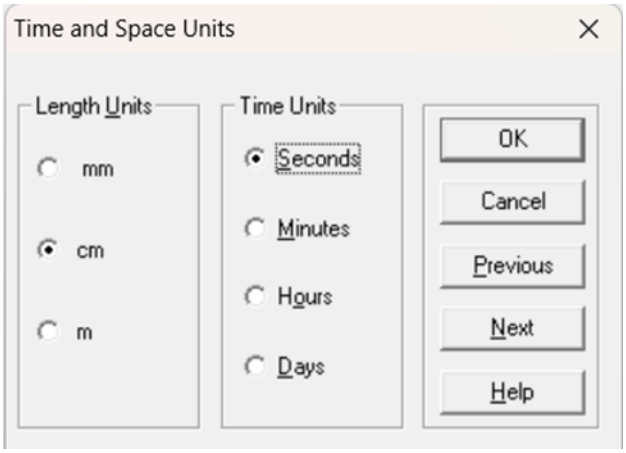

Figura 20. Programa RETC - Unidades de tiempo y espacio

Posterior a la selección de unidades de longitud y tiempo, se debe seleccionar el tipo de modelo con el cual se desea realizar el ajuste de la curva. Este puede ser van Genuchten, Brooks y Corey, distribución log-normal o porosidad dual (Figura 21).

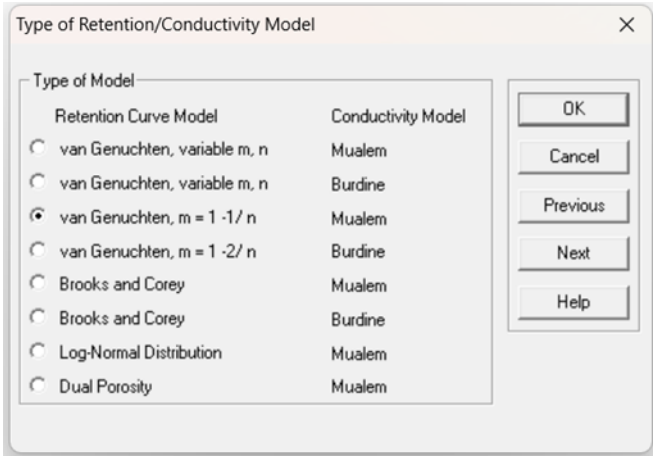

Figura 21. Programa RETC - Tipo de modelo de ajuste.

En la ventana siguiente, se continua con los parámetros de flujo de agua donde se deben ingresar los valores de los parámetros de forma manual o se puede seleccionar un tipo de suelo del catálogo para estimación inicial (Figura 22).

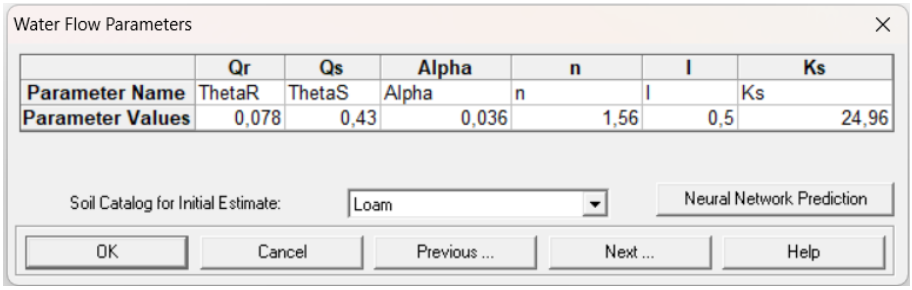

Figura 22. Programa RETC - Parámetros de flujo de agua

Finalmente, se tiene la ventana de datos de la curva de retención donde se deben ingresar los datos que se obtienen de algún experimento realizado (Figura 23), los cuales están organizados en la tabla de Excel mostrada en el Capítulo 3.6.

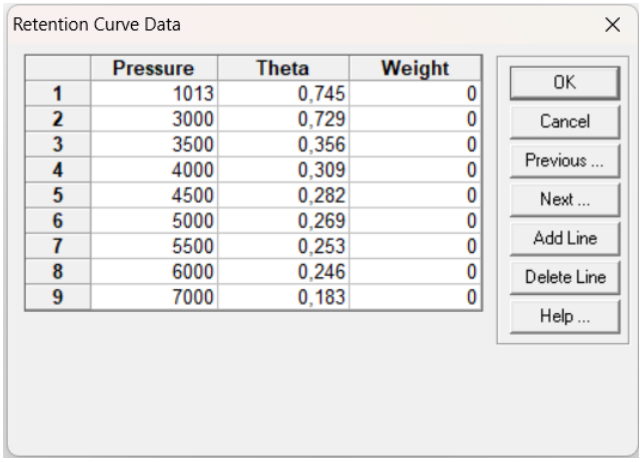

Figura 23. Programa RETC - Datos curva de retención

En la columna de presión (pressure) deben ingresarse los datos que se miden en hectopascales [hPa], en la columna del contenido de humedad (theta) se ingresan los datos, que comúnmente se obtienen en porcentaje [%], en decimales y en la columna de peso (weight) se ingresan los datos de peso en [unidad de medida] del material.

Luego de tener todas las ventanas completas con la información necesaria se puede realizar el ajuste de la curva presionando el botón "*next*" y este desplegará dos opciones en la ventana de posprocesamiento.

Una de estas opciones es la ventana de gráficos de propiedades hidráulicas del suelo la cual muestra un gráfico donde se pueden cambiar las variables horizontales y verticales (Figura 24a). La otra ventana muestra el despegable del archivo ASCII el cual contiene los valores iniciales de los coeficientes, datos observados, datos observados y ajustados, propiedades hidráulicas del suelo, entre otros (Figura 24b).

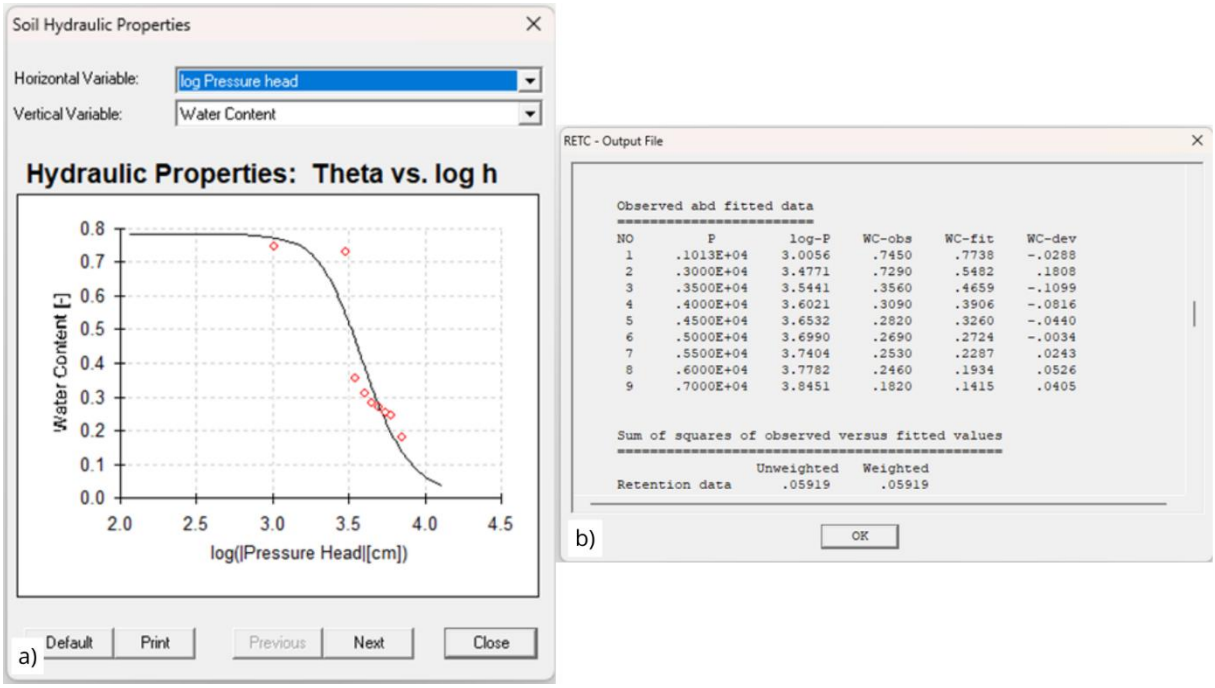

Figura 24. Programa RETC – a) Gráfico propiedades hidráulicas del suelo, b) Archivos con datos de salida.

3.8 Programa HYDRUS-1D

En este apartado se detalla cómo hacer uso del programa HYDRUS-1D para obtener la función conductividad hidráulica no saturada. En la Figura 25 se tiene un diagrama de procesos sobre cómo obtener la función conductividad hidráulica utilizando los parámetros obtenidos anteriormente en el ajuste de la curva de retención de humedad.

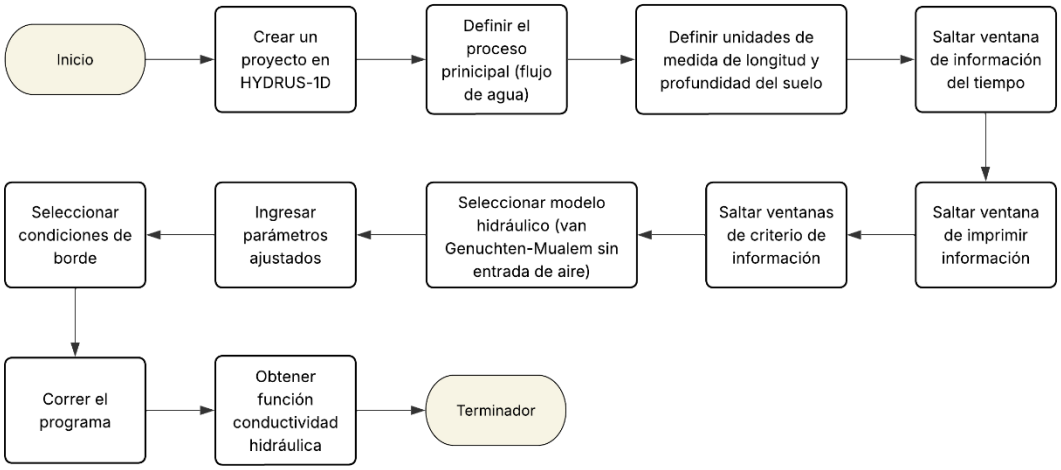

Figura 25. Diagrama de proceso para obtención de función conductividad hidráulica.

El software tiene un apartado de preprocesamiento donde se deben ingresar todos los datos necesarios para realizar una simulación, este cuenta con ocho ventanas siendo la primera la de procesos principales donde se puede elegir entre qué tipo de proceso se desea simular flujo de agua, transporte de solutos, transporte de calor, absorción de agua por raíces, crecimientos de raíces y transporte de CO_2, además da opción de solución inversa (Figura 26).

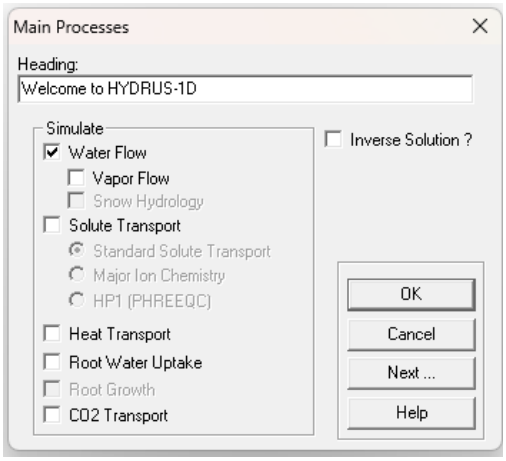

Figura 26. Programa HYDRUS-1D – Procesos principales.

Luego sigue la ventana de información de geometría (Figura 27), donde se debe elegir la unidad de longitud en la que se desea trabajar, puede ser metros [m], centímetros [cm] o milímetros [mm]. También se debe detallar el número de materiales del suelo, el número de capas para balances de masa, la inclinación respecto al eje vertical y la profundidad del suelo en centímetros. Se continúa con la información del tiempo (Figura 28), se elige una unidad de medida de tiempo que puede ser:

segundos, minutos, horas, días o años. Paralelamente, se debe otorgar un valor para tiempo inicial, tiempo final, paso de tiempo inicial, paso de tiempo mínimo y paso de tiempo máximo, todos estos valores deben ir en la unidad de tiempo elegida anteriormente. Además, en este apartado el programa cuenta con una función de condiciones de borde variables en el tiempo que se puede habilitar.

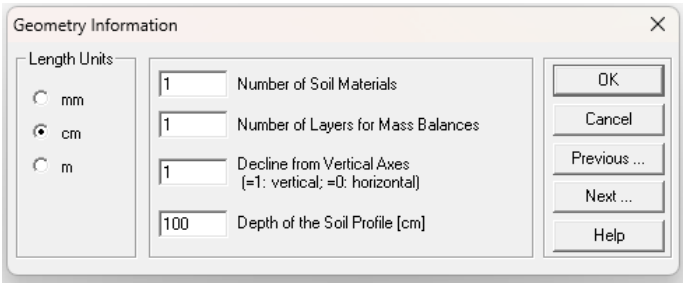

Figura 27. Programa HYDRUS-1D - Información de geometría.

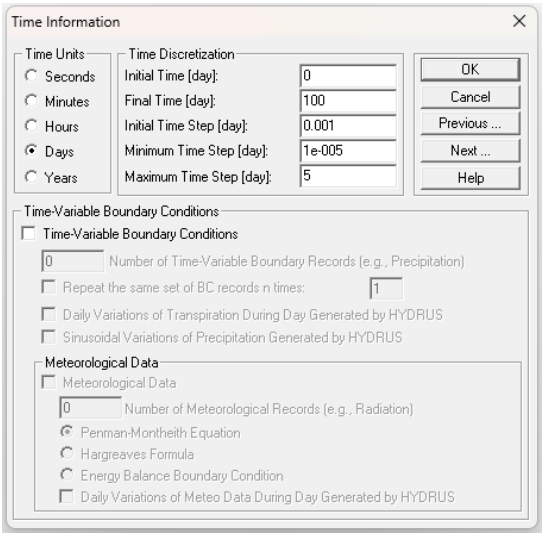

Figura 28. Programa HYDRUS-1D - Información de tiempo.

Posterior al proceso de información de geometría y de tiempo, se define la información de impresión (Figura 29a), las cuales definen cuando y como HYDRUS-1D guardará e imprimirá los resultados durante la simulación. Se tiene la opción de información del nivel de tiempo, imprimir en intervalos de tiempo regulares, salida en pantalla, imprimir flujos (en lugar de temperatura) para los nodos de observación y números de tiempo de impresión donde se debe asignar un valor para los momentos en que se desea obtener resultados. También está la ventana de criterios de iteración (Figura 29b) que tiene como opción definir el número de iteraciones, tolerancias, límites inferiores y limites superiores relacionados al sistema de iteraciones.

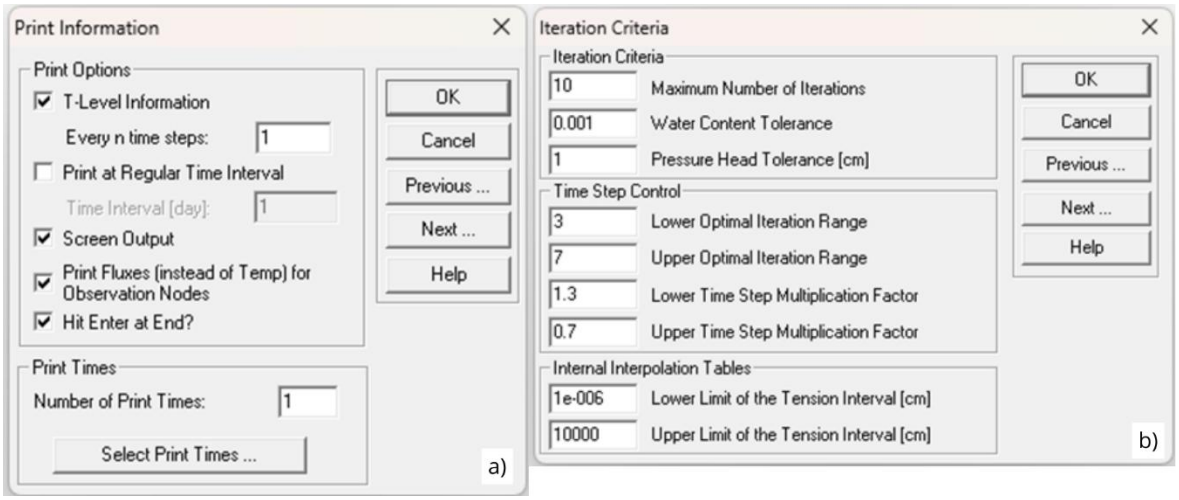

Figura 29. Programa HYDRUS-1D – a) Información de impresión, b) Criterios de iteración.

Siguiendo con el paso a paso de completar información en cada ventana, se tiene que elegir el modelo hidráulico del suelo, donde se puede elegir un modelo de porosidad simple o un modelo de porosidad dual/permeabilidad dual (Figura 30). Además, esta ventana cuenta con un apartado en el cual se puede elegir si se desea un modelo sin histéresis o con histéresis en: la curva de retención o la curva de retención y conductividad.

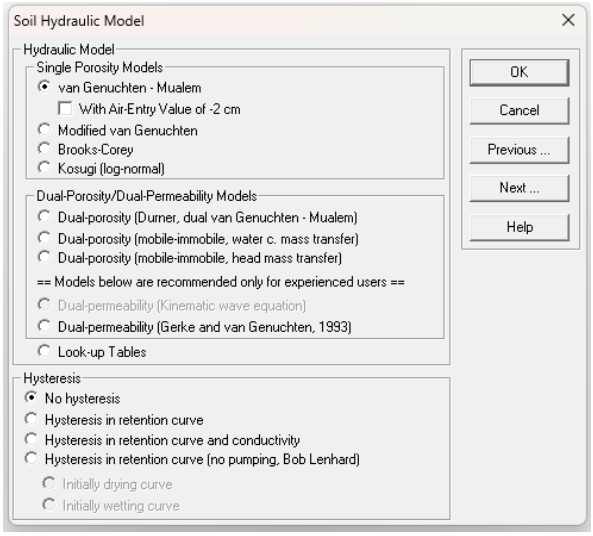

Figura 30. Programa HYDRUS-1D – Modelo hidráulico del suelo.

Como continuación, se tiene la ventana de parámetros del flujo de agua (Figura 31), en la cual se deben ingresar los datos de los parámetros ya ajustados, como: la conductividad hidráulica residual (θ_r), la conductividad hidráulica de saturación (θ_s), el parámetro de forma (α), el parámetro de forma adimensional (n), la conductividad hidráulica saturada (K_s) y la conectividad tortuosa de poros (l) parámetro adimensional con un valor estimado de 0,5 (van Genuchten, 1980).

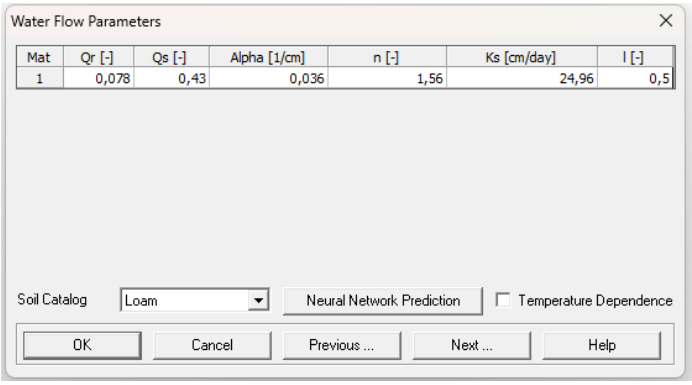

Figura 31. Programa HYDRUS-1D - Parámetros del flujo de agua.

Finalmente se tiene la ventana de las condiciones de borde para el flujo de agua (Figura 32), en esta se debe seleccionar la condición inicial, que puede ser: contenido de humedad o potencial de presión. También se debe seleccionar la condición de borde superior y la condición de borde inferior.

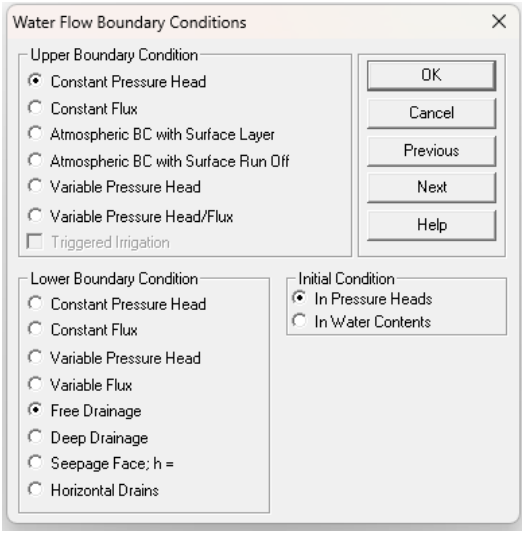

Figura 32. Programa HYDRUS-1D - Condiciones de borde para el flujo de agua.

Cabe destacar que para la estimación de la función conductividad hidráulica solo se debe tener en cuenta las ventanas correspondientes a procesos principales (Figura 26) donde se debe tener activado *water flow* (flujo de agua), información de geometría (Figura 27) para fijar las unidades de medidas en las que se trabaja, modelo hidráulico del suelo (Figura 30) para seleccionar el modelo con el que se estima la función conductividad y parámetros del flujo de agua (Figura 31) que es donde se deben ingresar los parámetros obtenidos del ajuste anterior.

Luego de tener todas las ventanas completas con los datos se ejecuta software y se activa el apartado de posprocesamiento se tienen cinco ventanas en las cuales se encuentra la información del

perfil, flujo de agua – flujos y presiones en los bordes, propiedades hidráulicas del suelo, información del tiempo de ejecución e información del balance de masa.

En esta investigación se usa el programa para obtener la función conductividad hidráulica, por lo que solo es de interés conocer la ventana de las propiedades hidráulicas del suelo (Figura 33). Esta abre un desplegable donde se puede elegir la variable horizontal (Figura 34) y la variable vertical (Figura 35) según los parámetros ingresados, y ver un gráfico según las variables seleccionadas.

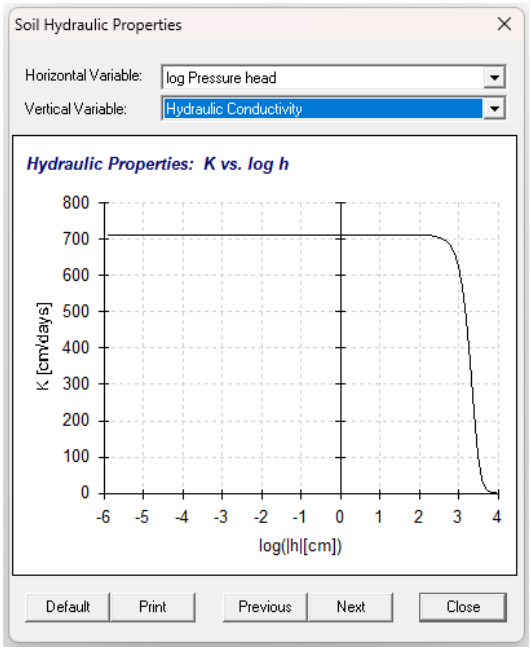

Figura 33. Programa HYDRUS-1D - Propiedades hidráulicas del suelo

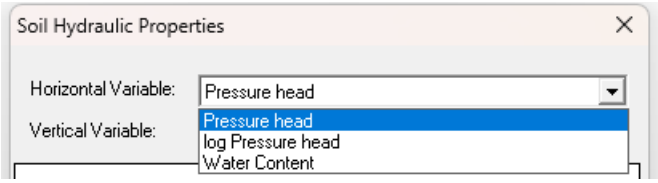

Figura 34. Programa HYDRUS-1D - Variable horizontal

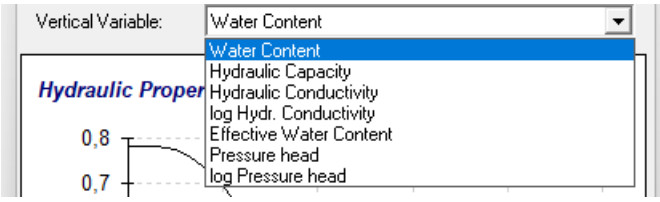

Figura 35. Programa HYDRUS-1D - Variable vertical

4 Resultados y discusión

En este apartado se dan a conocer los resultados obtenidos a partir de los cuatro experimentos realizados en el laboratorio, mediante las cuales se determinó el contenido de humedad del suelo a diferentes presiones bajo condiciones controladas. Además, se construyó la curva de retención de humedad en Excel para luego ser ajustada mediante el programa RETC y se finalizó con la obtención de la función conductividad hidráulica a través de HYDRUS-1D.

4.1 Resultados de datos del filtra test

En el primer experimento se aplicó un volumen de agua equivalente a 53,1% v/v respecto del volumen inicial de la muestra. En la Tabla 6 se pueden ver los datos de contenido de humedad medidos con el sensor para cada presión donde los valores que se tienen son esperados ya que a medida que la presión va aumentando, el contenido de humedad presente en el suelo va disminuyendo. En la Figura 36 (curva azul) se puede ver la curva de retención de humedad obtenida de los datos de la Tabla 6. Las mediciones comenzaron desde 1 [kPa] y fueron aumentando progresivamente hasta llegar a 500 [kPa] y el tiempo de aplicar presión iba en aumento a medida que la presión era mayor.

El segundo experimento se realizó de la misma manera que el experimento 1, pero con un 59,9% v/v. Este aumento se hizo con el objetivo de ver si el material tenía un comportamiento distinto durante el experimento. En la Tabla 6 se pueden ver los datos obtenidos en, y con respecto al aumento se evidencia que hubo un mayor contenido de humedad inicial comparado con el experimento 1. Además, este experimento tuvo una retención de agua un poco mayor en las presiones más altas (120 [kPa], 250 [kPa] y 500 [kPa]). En la Figura 36 (curva anaranjada), se puede ver la curva de retención de humedad sin ajustar para los datos obtenidos. Destacar, que los tiempos de aplicar cada valor de presión se realizaron de la misma forma que en el experimento 1, este aumentaba a medida que la presión tenía un valor mayor.

Para el tercer experimento se realizó el mismo procedimiento de los experimentos anteriores, pero ahora se cambió el tiempo de presión aplicado al material. Para este caso, se tenía que para valores de presión menores el tiempo en el que se aplicaba era mayor y para las presiones más altas se tenía un tiempo de presión menor, es decir, que a medida que la presión aumentaba el tiempo disminuía. Este cambio se realizó debido a que en presiones bajas el agua drena mucho más lento, ya que la fuerza ejercida es leve. Para esta prueba se utilizó un 53,9% v/v, la disminución es debido a que con ese porcentaje ya se alcanzaba un punto de saturación del material. En la Tabla 6 se pueden ver

los valores del contenido de humedad obtenido para cada presión aplicada, de esta se puede observar que el contenido de humedad para la presión más alta no disminuyó tanto en comparación a los experimentos anteriores, esto debido a que el tiempo de duración de esas presiones fue considerablemente menor a los otros. En la Figura 36 (curva gris) se tiene la curva de retención de humedad sin ajustar, donde se puede ver que la curva no llega tan abajo por lo que el contenido de humedad residual aún es alto comparado con experimentos anteriores.

En el cuarto experimento se realizó el mismo procedimiento que en el experimento 3, el material se tuvo más tiempo en presiones bajas y presiones altas se tuvo menos tiempo, es decir a medida que aumentaba la presión el tiempo en el que esta se aplicaba era menor. Pero a diferencia de los otros experimentos, este se tuvo funcionando día y noche desde lunes a viernes evitando que el material estuviera horas sin aplicársele alguna presión. En este experimento se utilizó el mismo porcentaje que el experimento anterior, 53,9% v/v. En la Tabla 6 se muestran los valores de contenido de humedad obtenidos para cada presión, se puede ver que a diferencia del experimento anterior los valores de contenido de humedad residual disminuyeron casi en la mitad, esto indica que el tiempo de aplicar presión es un factor importante en este tipo de experimentos. En la Figura 36 (curva amarilla) se tiene la curva de retención de humedad sin ajustar en la cual se puede ver que a diferencia del experimento anterior la curva baja más en su parte final, donde se representa el contenido residual del material.

La elección de los valores iniciales de masa de material y volumen de agua en cada experimento se justifican de la siguiente manera. En el experimento 1 se trabajó con una masa de 280 g de material y 120 ml de agua, ya que en ese momento no se tenía certeza de que la cámara del filtra test permitiera una muestra de mayor volumen, por lo que se decidió usar una muestra pequeña para verificar el correcto funcionamiento del equipo. Una vez confirmado que el equipo pudo operar de forma correcta y que era posible ocupar un mayor volumen de la cámara, por lo que en el experimento 2 se aumentó la masa de material a 400 g y el volumen de agua a 200 ml, con el objetivo de aprovechar mejor la capacidad de la cámara. Posteriormente, en los experimentos 3 y 4 se mantuvo la masa de 400 g, pero se redujo el volumen de agua a 180 ml, ya que se observó que con este volumen la muestra igual alcanzaba un estado cercano a la saturación, mientras que con 200 ml el material quedaba muy líquido y parte del agua drenaba del filtra test únicamente por efecto de la gravedad, sin necesidad de aplicar presión. De este modo, la combinación de 400 g de material y 180 ml de agua se consideró

como la condición más adecuada para asegurar la saturación inicial sin generar drenajes gravitacionales no controlados.

Tabla 6. Datos contenidos de humedad, presiones y tiempos de experimentos.

	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3		Experimento 4	
Presión [kPa]	**VWC [%]**	**Tiempo [min]**	**VWC [%]**	**Tiempo [min]**	**VWC [%]**	**Tiempo [min]**	**VWC [%]**	**Tiempo [min]**
1	49,96%	-	52,32%	-	49,05%	-	50,22%	-
2	46,15%	60	48,93%	91	45,40%	285	46,27%	1560
4	45,03%	90	46,52%	137	35,84%	210	27,79%	1530
8	19,61%	90	38,18%	137	17,55%	180	16,42%	1470
15	14,40%	135	25,61%	205	14,75%	135	11,25%	1200
30	7,66%	165	15,54%	251	13,11%	105	3,28%	180
60	4,79%	180	4,79%	274	9,65%	90	2,22%	150
120	2,25%	180	2,71%	274	8,28%	75	2,01%	105
250	1,73%	210	2,19%	320	6,82%	60	1,66%	75
500	1,36%	210	1,68%	320	5,63%	45	1,49%	60

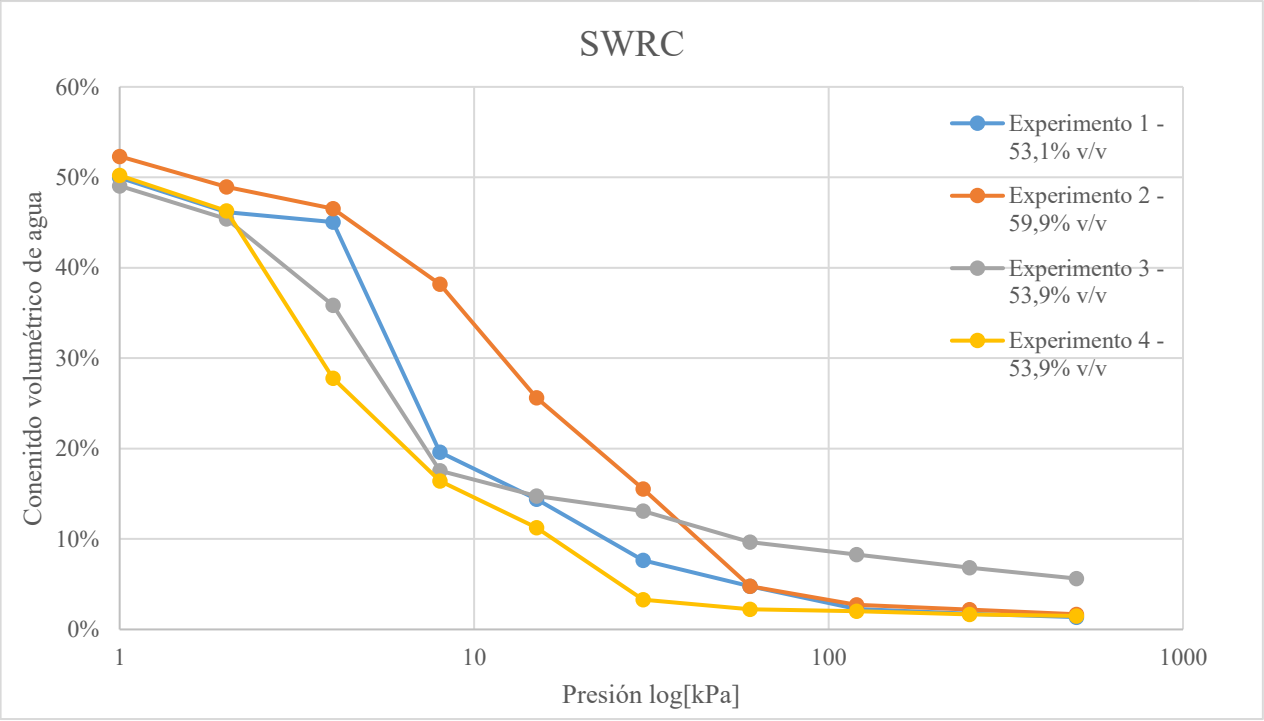

Figura 36. Curvas de retención de humedad sin ajustar de los experimentos.

4.2 Resultados del ajuste de curva de retención de humedad

Para el ajuste de la curva de retención de humedad de los cuatro experimentos se utilizó el programa RETC mediante el modelo de van Genuchten, el cual corresponde a la Ec. (14) introducida en el marco teórico. El programa requiere como parámetros de entrada θr, θs, α, n y Ks. Los tres

primeros se asociaron directamente a las curvas de retención obtenidas en el filtra test, mientras que n y K_s se tomaron de los resultados del Capítulo 3 (n=1,592 y K_s=162,07 cm/día).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m} \quad (14)$$

Para asegurar una comparabilidad entre los cuatros ensayos, se fijaron ciertos parámetros iguales en todos los casos. Estos corresponden a un rango de presión entre 1 y 500 kPa, el parámetro de forma n=1,592 y la conductividad hidráulica saturada K_s=162,07 cm/día, determinada experimentalmente con el permeámetro. Además, la forma general de las curvas ajustadas es la misma en los cuatros experimentos: una zona saturada casi horizontal a bajas presiones, una zona de transición donde el contenido de humedad disminuye con mayor pendiente y una zona residual casi horizontal a altas presiones.

Los parámetros que si cambiaron entre experimento son θ_r, θ_s y α, y se obtuvieron de manera sistemática a partir de los datos del filtra test. Para cada experimento se tomó como θ_s el contenido de humedad medido en el tramo casi horizontal a bajas presiones (1 – 2 kPa). Los valores de la Tabla 6 muestran que las humedades iniciales se encuentran entre 49,1 % y 52,3 %, muy cercanas a los valores de θ_s utilizados en RETC (0,49 – 0,52). Esto confirma cuantitativamente que la cantidad de agua utilizada en cada ensayo fue suficiente para alcanzar un estado de saturación, sin necesidad de aumentar más el volumen de riego. El parámetro θ_r se definió a partir del tramo casi horizontal a altas presiones, en torno a 500 kPa, donde el agua está fuertemente retenida en los poros. Los contenidos de humedad a esa presión de la Tabla 6 (1,36 %, 1,68 %, 5,63 % y 1,49 % para los Experimentos 1 a 4, respectivamente) se usaron como referencia para definir θ_r en cada ajuste. El parámetro α se asoció al punto donde la curva comienza el descenso pronunciado (inicio de la zona de transición). La presión correspondiente a ese punto se consideró como h_a, y α se obtuvo de la relación $\alpha \approx 1/h_a$. Así, un α mayor indica que la desaturación comienza a menores valores de presión. Los valores de θ_r, θ_s y α de cada experimento se encuentran en la Tabla 7.

En la Figura 37 se muestran las curvas ajustadas para cada experimento, donde los círculos rojos representan los datos experimentales medidos de contenido de humedad a diferentes presiones y la línea negra es la curva de ajuste de van Genuchten generada por RETC. El experimento 1 es el que presenta un contenido de humedad residual más bajo ($\theta_r \approx 0{,}013$), lo que indica que el material drena una parte importante del agua en el rango de presión aplicado. La zona de transición se extiende entre log(h)≈ 1 y 2,7, que es el tramo donde se observa la mayor pendiente de la curva. El experimento

2 muestra un θ_s levemente mayor al resto de los experimentos y un θ_r superior al del experimento 1. La zona de transición es levemente más suave en comparación a los otros experimentos, lo que refleja un proceso de drenaje más gradual. La diferencia de θ_r respecto al experimento 1 se relaciona con las condiciones iniciales de humedad y al mayor contenido de agua disponible al inicio del ensayo, manteniendo tiempos de presiones similares. El experimento 3 es el con el mayor contenido de humedad residual ($\theta_r \approx 0{,}056$), esto indica que bajo los tiempos de presión aplicada una parte importante del agua permanece retenida en los poros incluso a 500 kPa. La zona de transición se encuentra ubicada entre log(h)≈1,1 y 2,3, lo que es similar al experimento 1. El valor alto del contenido de humedad residual concuerda con los resultados del filtra test, donde la reducción de tiempos a altas presiones limitó el drenaje del agua. El experimento 4 mantiene un valor de θ_s similar al del experimento 1, pero con un α mayor (0,5), lo que indica que la desaturación del material comienza a menores presiones. El valor del θ_r es bajo, aproximadamente 0,015, similar a los experimentos 1 y 2, lo que es coherente con los tiempos de aplicación presión continua, que favorece un drenaje mayor aun cuando se utilizó el mismo volumen de agua que en el experimento 3. Esto demuestra que, una vez alcanzado un contenido inicial cercano a la saturación del material, el factor importante para favorecer un buen drenaje y reducir la humedad residual es el tiempo de presión y no el aumento del volumen de agua.

Como se introdujo en la sección 2.3 la Capacidad Específica de Agua dada por la pendiente de la curva de retención de humedad (*SWRC*) nos indica cuanto cambia el contenido de agua del suelo cuando varía el potencial de presión. Para los cuatro experimentos realizados, se observan pendientes pronunciadas, por lo que el material tiene una gran capacidad para absorber o liberar agua.

Tabla 7. Parámetros de entrada para ajuste de curva de retención de humedad

	Experimento 1	**Experimento 2**	**Experimento 3**	**Experimento 4**
θ_r	0,013	0,017	0,056	0,015
θ_s	0,50	0,52	0,49	0,50
α	0,25	0,25	0,50	0,50
n	1,592	1,592	1,592	1,592
Ks [cm/día]	162,07	162,07	162,07	162,07

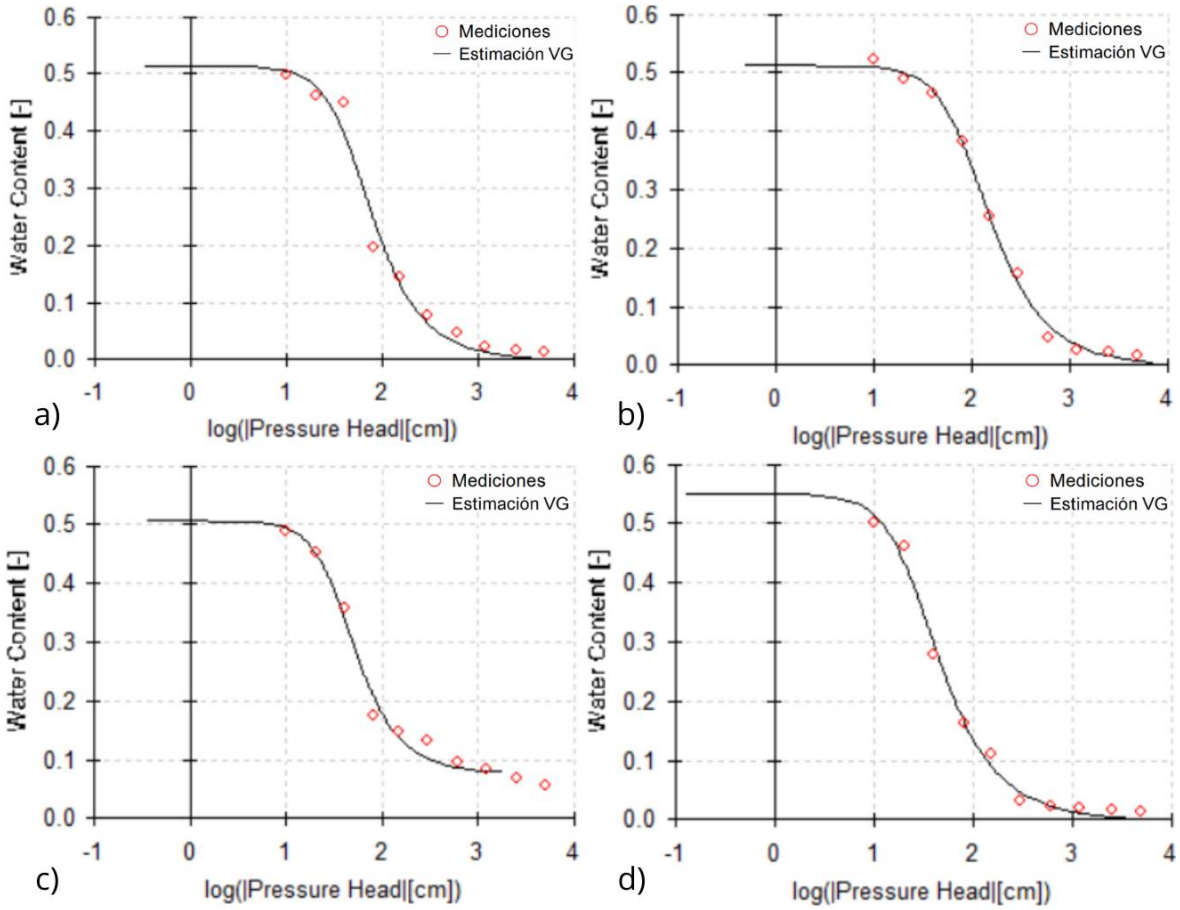

Figura 37. Curvas retención de humedad ajustadas, a) experimento 1, b) experimento 2, c) experimento 3, d) experimento 4.

4.3 Resultados estimación función conductividad hidráulica

La estimación de la función conductividad hidráulica K(h) de los cuatro experimentos se realizó con el programa HYDRUS-1D. En la Figura 38a se tiene la función conductividad hidráulica del experimento 1 y los parámetros utilizados fueron los obtenidos del ajuste de la curva de retención de humedad. Estos parámetros fueron: $\theta_r = 0$, $\theta_s = 0{,}51401$, $\alpha = 0{,}02026$ y $n = 2{,}15451$. Para el experimento 2 la estimación de la función conductividad hidráulica se tiene en la Figura 38b, los parámetros utilizados fueron: $\theta_r = 0$, $\theta_s = 0{,}51221$, $\alpha = 0{,}01104$ y $n = 2{,}05530$. En la Figura 38c se muestra la estimación de la función conductividad hidráulica del experimento 3, los parámetros utilizados fueron: $\theta_r = 0{,}07745$, $\theta_s = 0{,}50616$, $\alpha = 0{,}02806$ y $n= 2{,}36153$. La función conductividad hidráulica obtenida para el experimento 4 se puede ver en la Figura 38d y se utilizaron como parámetros de entrada los obtenidos del ajuste anterior, que fueron: $\theta_r = 0$, $\theta_s = 0{,}55086$, $\alpha = 0{,}03847$ y $n = 2{,}01255$.

Los valores obtenidos muestran diferencias de los parámetros ajustados (θ_r, θ_s, α y n) de los cuatro experimentos. Estas diferencias no implican un cambio de material ni de procedimiento, sino que son una respuesta a la incertidumbre experimental y a la propia naturaleza del ajuste numérico. Aunque se usó el mismo material, las diferencias de compactación, distribución de tamaños de poros y humedad inicial producen cambios en la forma de la curva de retención de humedad, especialmente en la zona de saturación y en la parte final de la curva donde se encuentran las presiones altas, donde está definido θ_r. Además, si bien todos los experimentos abarcan el mismo rango de presión (1 – 500 kPa), en la zona de humedades bajas la curva no presenta un tramo horizontal de contenido de humedad constante, por lo que la parte final de la curva y el valor de θr se determinan por la forma impuesta por el modelo de van Genuchten.

El valor de θ_r obtenido en el experimento 1, 2 y 4 ($\theta_r \approx 0$) es físicamente anómalo, pues implica un contenido de humedad residual casi nulo, incompatible con el comportamiento esperado del material. En el modelo de van Genuchten se sabe, por estudios de sensibilidad y antecedentes de la literatura, que θ_r, α y n presentan una fuerte correlación, de modo que cambios en α y n pueden compensarse llevando θ_r a valores casi cero sin perjudicar el ajuste en el rango de presiones. Por lo que, este valor se interpreta como un resultado del procedimiento de ajuste en RETC y no como una propiedad real del material.

En los cuatro experimentos se trabajó con la misma conductividad hidráulica saturada, Ks = 162,07 cm/día, de modo que las diferencias entre las curvas K(h) se deben a los parámetros de la curva de retención (θ_r, θ_s, α y n) ajustados en RETC. De esta forma, con HYDRUS-1D se estima la función K(h) a partir de la combinación de la curva de retención de humedad con K_s de acuerdo con la ecuación de van Genuchten – Mualem.

En los gráficos de la Figura 38 se observa que la conductividad hidráulica saturada del material es de 162,07 cm/día, lo que es equivalente a 69 $L/m^2/h$ constante en condiciones de saturación. Al aumentar la presión sobre log(h) ≈ 0,6 – 1 se observa una disminución abrupta de la conductividad, reduciéndose a valores de entre 30 – 40 cm/día para log(h) = 1,3 y de hasta 1 – 5 cm/día a log(h) = 2. Esta rápida disminución de la conductividad indica que pequeñas variaciones de presión en el rango log(h) ≈ 1 – 2 genera cambios muy significativos en la capacidad de flujo del material, lo que define una ventana operativa del punto de vista hidráulico muy sensible para la lixiviación.

A pesar de que las condiciones experimentales no fueron estrictamente idénticas entre los ensayos (variaciones en compactación, humedad inicial, distribución local de tamaños de poro, etc.), las curvas de conductividad hidráulica obtenidas presentan una consistencia en su forma y magnitud, lo que es comparable en el rango de presiones relevante para la operación. Esta similitud respalda la confiabilidad de los resultados y demuestra que el material mantiene un comportamiento estable frente a cambios en la presión dentro del intervalo de interés crítico para el riego en pilas de lixiviación.

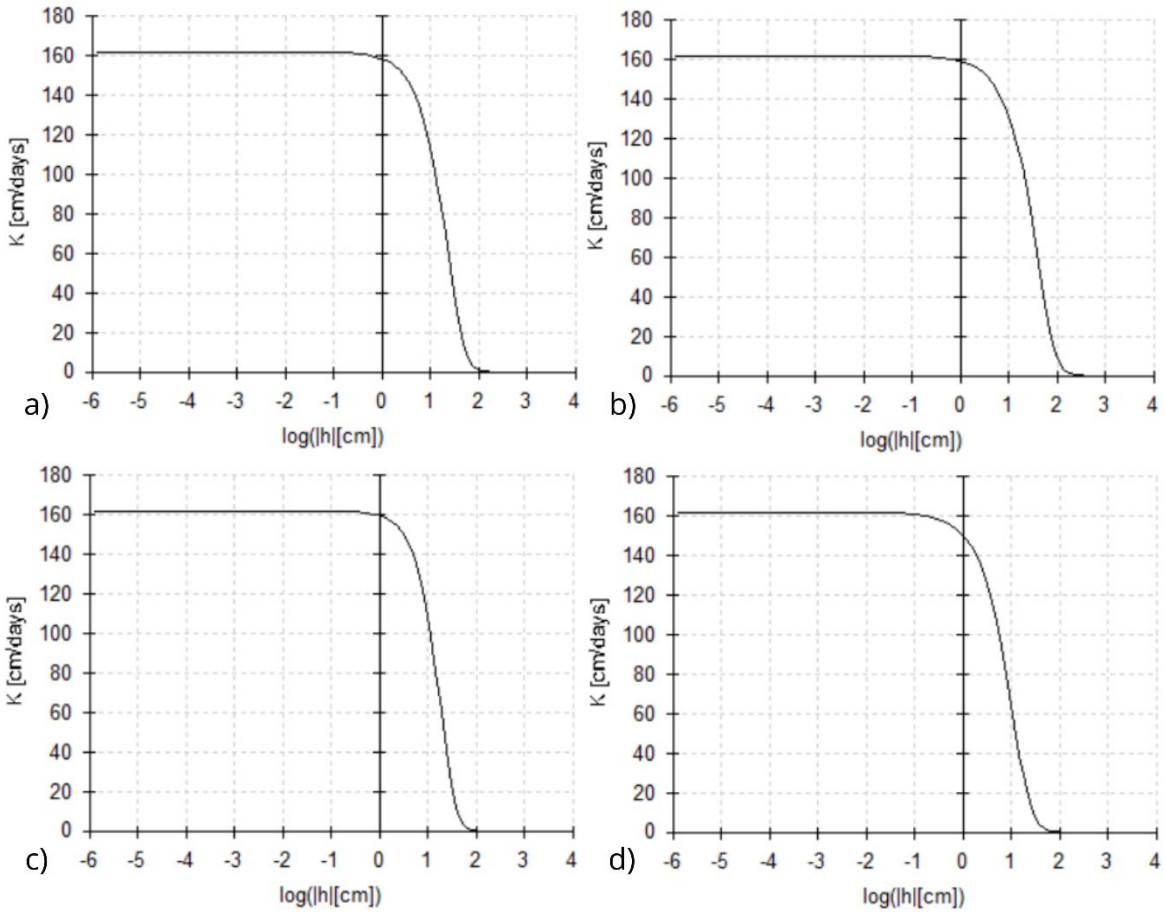

Figura 38. Función conductividad hidráulica, a) experimento 1, b) experimento 2, c) experimento 3, d) experimento 4.

Para la conversión de conductividad hidráulica (en cm/día) a tasa de riego (L/m^2/h) se realizaron los siguientes pasos:

$$1\ \left[\frac{cm}{día}\right] = 0{,}01\ \left[\frac{m}{día}\right] \tag{22}$$

Realizando la conversión de día a hora se tiene:

$$0{,}01\ \left[\frac{m}{día}\right] = \frac{0{,}01}{24}\left[\frac{m}{h}\right] \approx 4{,}167 * 10^{-4}\ \left[\frac{m}{h}\right] \tag{23}$$

Suponiendo lo anterior Ec. (23) como altura de agua sobre 1 m^2 por hora, se tiene que:

$$4{,}167 * 10^{-4} \left[\frac{m^3}{m^2 * h}\right] \tag{24}$$

Pasando de m^3 a litros, se tiene:

$$4{,}167 * 10^{-4} \left[\frac{m^3}{m^2 * h}\right] * (\frac{1000}{1})[\frac{L}{m^3}] \tag{25}$$

Finalmente, se tiene que la relación entre la conductividad hidráulica y la tasa de riego es:

$$1 \left[\frac{cm}{día}\right] = 0{,}4167 \, [\frac{\frac{L}{m^2}}{h}] \tag{26}$$

De esta forma se obtiene la relación entre la conductividad hidráulica (expresada en cm/día) y la tasa de riego equivalente (expresada en L/m²/h) indicada en la ecuación (26). Esta conversión permite comparar directamente los resultados obtenidos con las tasas de riego típicamente utilizadas en pilas de lixiviación y evaluar cuán cercano se encuentra el flujo en la pila a la conductividad hidráulica saturada del material.

5 Conclusiones y recomendaciones

Se determinó experimentalmente la relación entre la presión de poro y el contenido de humedad volumétrico en un suelo granular, con el fin de obtener su curva de retención de humedad y la función de conductividad hidráulica. A partir de cuatro ensayos de laboratorio se caracterizó el contenido de humedad θ y la conductividad hidráulica saturada K_s del material, bajo condiciones de saturación variable, ajustando la curva de retención de humedad (SWRC) a mediante el programa RETC y estimando la función conductividad con HYDRUS-1D. Estos resultados entregan un conjunto de parámetros hidráulicos para describir el comportamiento del material en condiciones de lixiviación de pilas.

Se recopiló y revisó literatura técnica sobre pilas y columnas de lixiviación, así como sobre la física del flujo en medios con saturación variable, priorizando fuentes que aportaran a la caracterización hidráulica del material. La revisión evidenció que el ajuste de la curva de retención se realiza mayoritariamente mediante el modelo de van Genuchten, debido a su amplia aceptación, formulación flexible y compatibilidad con modelos de flujo no saturado y herramientas numéricas. Asimismo, se observó que la mayor parte de los estudios sobre curva de retención de humedad y conductividad hidráulica proviene del ámbito agronómico, mientras que en minería la literatura se enfoca principalmente en la química del proceso, existiendo una brecha en el tratamiento del transporte y la hidráulica. En este contexto, la presente establece una base para futuras aplicaciones hidráulicas en el diseño y operación de pilas.

Se identificaron metodologías de laboratorio empleadas internacionalmente para determinar parámetros hidráulicos en materiales granulares bajo saturación variable, abarcando enfoques tradicionales, técnicas recientes basadas en instrumentación especializada de alto costo y configuraciones no comerciales que integran sensores. Basándose en lo anterior, se desarrolló un protocolo experimental adaptado a las condiciones de laboratorio disponibles, que combina un sensor de humedad con control de presión por escalones para obtener pares presión–contenido volumétrico de agua, de propósito comparable al HYPROP, y permite realizar ensayos reproducibles para la caracterización hidráulica del material.

Las curvas de retención de humedad indican un drenaje lento a bajas presiones, evidenciando que el material retiene una fracción significativa de agua aún bajo incrementos de presión. En condiciones de riego continuo, este comportamiento puede favorecer la formación de zonas con alto

contenido de agua y encharcamiento, lo que promueve la ineficiencia del proceso de lixiviación. Asimismo, pese a emplearse el mismo material, se observaron diferencias entre ensayos, lo que sugiere sensibilidad a variaciones en la distribución de tamaños de poros y en el grado de compactación. En la curva ajustada se identifica que la capacidad específica de agua alcanza máximos en la zona de transición, indicando alta sensibilidad del contenido de humedad frente a cambios en las condiciones de borde y potenciales redistribuciones rápidas de humedad dentro del lecho.

Las funciones de conductividad hidráulica muestran que el intervalo $\log(h) \approx 1 - 2$ corresponde al tramo de mayor sensibilidad, donde pequeñas variaciones de presión producen cambios significativos en la conductividad hidráulica. Este rango define una ventana operativa crítica en la que es posible mantener una conductividad suficiente para el avance de la solución sin inducir incrementos excesivos de presiones de poro; desviaciones significativas pueden promover flujos preferenciales, zonas cercanas a saturación, inestabilidad del lecho y menor recuperación. En conjunto, los parámetros obtenidos aportan a la caracterización hidráulica de materiales granulares y pueden incorporarse directamente en modelos numéricos basados en la ecuación de Richards para evaluar la evolución espacial y temporal de contenido volumétrico de agua y presión dentro de una pila.

Sobre la base de los resultados y conclusiones, se proponen las siguientes recomendaciones:

El control de la operación no debiera basarse únicamente en el caudal aplicado, sino en mantener al material dentro de un rango de presión que asegure simultáneamente una adecuada permeabilidad y la ausencia de saturación prolongada.

Incorporar ensayos que permitan estudiar la histéresis entre los procesos de humedecimiento y drenaje, de modo de representar con mayor fidelidad los ciclos de operación típicos de una pila de lixiviación.

Integrar los parámetros $\theta(h)$ y $K(h)$ determinados experimentalmente en simulaciones numéricas a escala de pila, evaluando distintos escenarios de riego y analizando su impacto en la distribución de humedad, la eficiencia de extracción de cobre y la estabilidad del macizo granular.

En conjunto, estas conclusiones y recomendaciones muestran que la caracterización experimental de la curva de retención de humedad y de la función de conductividad hidráulica no solo permite describir el comportamiento hidráulico del material en laboratorio, sino que también entrega criterios prácticos para el diseño y la operación de pilas de lixiviación más eficientes y controladas.

6 Referencias

Abhishek, G., & Partha, P. (2023). *Role of critical data for geomechanical modeling and characterization of future CO2 storage sites* (pp. 377–416). https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99593-1.00012-4

Angelaki, A., Bota, V., & Chalkidis, I. (2023). Estimation of Hydraulic Parameters from the Soil Water Characteristic Curve. *Sustainability*, *15*(8), 6714. https://doi.org/10.3390/su15086714

Baroni, G., Facchi, A., Gandolfi, C., Ortuani, B., Horeschi, D., & van Dam, J. C. (2010). Uncertainty in the determination of soil hydraulic parameters and its influence on the performance of two hydrological models of different complexity. *Hydrology and Earth System Sciences*, *14*(2), 251–270. https://doi.org/10.5194/hess-14-251-2010

Beadle, C., Ludlow, M., & Honeysett, J. (1985). Water Relations. In *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis* (pp. 50–61). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-031999-5.50015-7

Beckel, J. (2000). El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile (Serie Desarrollo Productivo No. 79). . *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL).*

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. *From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering*, 410–427. https://doi.org/10.1061/9780784413265.033

Briggs, L. James. (1897). *The mechanics of soil moisture / By Lyman J. Briggs.* Gov't print. off.,. https://doi.org/10.5962/bhl.title.43273

Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). *Hydraulic Properties of Porous Media*.

Bustos, D. (2024). *Diseño y construcción de un dispositivo de laboratorio para la evaluación de la conductividad hidráulica en materiales granulares*. Universidad de Concepción.

Cariaga, E., Martínez, R., & Sepúlveda, M. (2015). Estimation of hydraulic parameters under unsaturated flow conditions in heap leaching. *Mathematics and Computers in Simulation*, *109*, 20–31. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2014.07.006

CML. (2022, August 5). Pads de lixiviación: Cuando la minería y la ingeniería se unen. *CML Latin*.

COCHILCO. (2024). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales*.

Codelco. (2019). *Lixiviación: El riego. Codelco Educa*.

Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones* (1st ed.).

Domic, E. (2012). *Historia del Proceso Actual de Lixviación en Pilas y la Producción de Cátodos en Chile. Portal Minero.*

Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470172759

Fredlund, M. (1999). *The Role of Unsaturated Soil Property Functions in the Practice of Unsaturated Soil Mechanics*. University of Saskatchewan.

Gabriels, D., Lobo, D., & Pulido, M. (2006). *Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos*.

Gallage, C., Kodikara, J., & Uchimura, T. (2013). Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes. *Soils and Foundations*, *53*(3), 417–430. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.04.004

Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang, G.-H., & van Genuchten, M. Th. (2010). Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data. *Pedosphere*, *20*(4), 456–465. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60035-5

Global Business Reports. (2024). *Chilean copper production and development*.

Hohenbrink, T. L., Jackisch, C., Durner, W., Germer, K., Iden, S. C., Kreiselmeier, J., Leuther, F., Metzger, J. C., Naseri, M., & Peters, A. (2023). Soil water retention and hydraulic conductivity measured in a wide saturation range. *Earth System Science Data*, *15*(10), 4417–4432. https://doi.org/10.5194/essd-15-4417-2023

Hosagasi-Fuselier, T. (2006). *Evaluation of soil water characteristic curves and permeability functions for modelling of seepage in unsaturated soils*. Tufts University.

Huang, X., Wang, H., Zhang, M., Horn, R., & Ren, T. (2021). Soil water retention dynamics in a Mollisol during a maize growing season under contrasting tillage systems. *Soil and Tillage Research*, *209*, 104953. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104953

Iiyama, I. (2016). Differences between field-monitored and laboratory-measured soil moisture characteristics. *Soil Science and Plant Nutrition*, *62*(5–6), 416–422. https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1242367

InduAmbiente. (2024). Lixiviación con menos agua. *InduAmbiente*, (186), 78–80.

Inoue, M., Šimůnek, J., Shiozawa, S., & Hopmans, J. W. (2000). Simultaneous estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient infiltration experiments. *Advances in Water Resources*, *23*(7), 677–688. https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00011-7

International Mining. (2022). *Antofagasta Minerals widens potential of Cuprochlor process after primary copper sulphide leaching success at Centinela*. https://im-mining.com/2022/01/31/antofagasta-minerals-widens-potential-cuprochlor-process-primary-copper-sulphide-leaching-success-centinela/

Jiménez, J. (2019). *Funciones de R para graficar, clasificar y explorar los datos de textura del suelo*.

Lekshmi, S., Singh, D. N., & Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, *54*, 92–105. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007

Lipovetsky, T., Zhuang, L., Teixeira, W. G., Boyd, A., May Pontedeiro, E., Moriconi, L., Alves, J. L. D., Couto, P., & van Genuchten, M. Th. (2020). HYPROP measurements of the unsaturated hydraulic properties of a carbonate rock sample. *Journal of Hydrology*, *591*, 125706. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125706

Loosvelt, L., Pauwels, V. R. N., Cornelis, W. M., De Lannoy, G. J. M., & Verhoest, N. E. C. (2011). Impact of soil hydraulic parameter uncertainty on soil moisture modeling. *Water Resources Research*, *47*(3). https://doi.org/10.1029/2010WR009204

López, E. (2012). *Estudio experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación (Tesis de magíster)*. Universidad de Chile.

López, N., & Mendoza, J. (2016a). *Flujo de agua en suelos parcialmente saturados y su aplicación a la ingeniería geotécnica* (Primera edición). Serie Investigación y Desarrollo.

López, N., & Mendoza, J. (2016b). *Flujo de agua en suelos parcialmente saturados y su aplicación a la ingeniería geotécnica* (Primera edición). Serie Investigación y Desarrollo.

Lozano, J., Madero, E., Tafur, H., Herrera, O., & Amézquita, E. (2005). *La conductividad hidráulica del suelo estudiada en el Valle del Cauca con el nuevo indicador del USDA* (Vol. 5). Universidad Nacional de Colombia.

Luarte, D. (2016). *Puesta en marcha de un sistema de medición de humedad en línea para un lecho poroso*. Universidad de Concepción.

Marshall, T., Holmes, J., & Rose, C. (1979). *Soil Physics*. Cambridge University Press.

Martínez, R. (2021). *Modelación física y numérica del flujo parcialmente saturado en una columna de ripios de lixiviación*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Martínez-Fernández, J. (1995). Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. *Avances En La Investigación En Zona No Saturada*, 193–201.

Marzan, H. (2013). *Soluciones numéricas y aproximaciones para la ecuación de Richards*.

McCartney, J., Villar, L., & Zornberg, J. (2007). Estimation of the Hydraulic Conductivity Function of Unsaturated Clays using Infiltration Column Tests. *Proceedings of the Sixth Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*, *1*, 321–328.

METER Group. (n.d.). *METER Group*. Retrieved January 27, 2026, from https://metergroup.com/es/products/mas-1/

Minera Zaldívar. (2023). *Cuprochlor: Innovación para la lixiviación de sulfuros primarios*.

Minnovex A.G. (2025, March 3). *BFS/Mining Systems: Disminución de variabilidad en el riego de pilas de lixiviación mediante monitoreo y control*. Minnovex.

Mota, J. (2016). Modelación de la infiltración del riego por gravedad utilizando la Ecuación de Richards en 3D. *En II Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII, México.*

Novus Automation. (n.d.). *Novus Automation*. Retrieved January 27, 2026, from https://www.novusautomation.com/es/producto/data-loggers/logbox-ble

PC-Progress. (n.d.). *PC-Progress Engineering software developer*. Retrieved January 27, 2026, from https://www.pc-progress.com/en/

Pérez, N. (2008). Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión. *Secretarías de Comunicaciones y Transportes*, *313*.

Petersen, J. (2016). Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview. *Hydrometallurgy*, *165*, 206–212. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.001

Project Blue. (2023). *Is Chile losing its dominance in copper mining?* .

RAE. (n.d.). *Diccionario de la lengua española*.

Rahardjo, H., Leong, E., & Choa, V. (1997). *Characterization of residual soil properties for analyses of rainfall-induced slope instability*.

Rawls, W. J., & Brakensiek, D. L. (1989). Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties. In *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling* (pp. 275–300). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2352-2_10

Reichardt, K., & Timm, L. C. (2004). *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Manole.

Rio Tinto. (2024). *Nuton: A better way to produce copper*.

Ritzema, H. P. (1994). Water in the Unsaturated Zone. In *Drainage Principles and Applications* (2nd ed., Vol. 16, pp. 406–418).

Roy, D., Jia, X., Steele, D. D., & Lin, D. (2018). Development and Comparison of Soil Water Release Curves for Three Soils in the Red River Valley. *Soil Science Society of America Journal*, *82*(3), 568–577. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.09.0324

Sakellariou-Makrantonaki, M., Angelaki, A., Evangelides, C., Bota, V., Tsianou, E., & Floros, N. (2016). Experimental Determination of Hydraulic Conductivity at Unsaturated Soil Column. *Procedia Engineering*, *162*, 83–90. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.019

Samper, J. (2014). *Zona No Saturada, Hidrología del Subsuelo*.

Saravanan, S., Parthasarathy, K. S. S., & Sivaranjani, S. (2019). Assessing Coastal Aquifer to Seawater Intrusion: Application of the GALDIT Method to the Cuddalore Aquifer, India. In

Coastal Zone Management (pp. 233–250). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814350-6.00010-0

Simpson, J. (2003). Hidrometalurgia. In *Introducción a la Metalurgia* (pp. 188–201). Universidad de Santiago de Chile.

Šimůnek, J., Šejna, M., & van Genuchten, M. Th. (1998). *The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media (Version 1.0)*.

Šimůnek, Jiří, van Genuchten, M. Th., & Wendroth, O. (1998). Parameter Estimation Analysis of the Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties. *Soil Science Society of America Journal*, *62*(4), 894–905. https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200040007x

Singh, A., & Verdi, A. (2024). Estimating the soil water retention curve by the HYPROP-WP4C system, HYPROP-based PCNN-PTF and inverse modeling using HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology*, *639*, 131657. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131657

Sociedad Nacional de Minería. (2025). *Distritos productivos para el desarrollo de la minería chilena.*

Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Trujillo, J. Y., Mellado, M. E., Gálvez, E. D., & Cisternas, L. A. (2011). *A method for the design and planning operations of heap leaching circuits* (pp. 306–310). https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53711-9.50062-6

van Genuchten, M., Leji, F., & Yates, S. (1991). *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*.

van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, *44*(5), 892–898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

W. J. Rawls, D. L. Brakensiek, & K. E. Saxtonn. (1982). Estimation of Soil Water Properties. *Transactions of the ASAE*, *25*(5), 1316–1320. https://doi.org/10.13031/2013.33720

Watson, K. K. (1966). An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Water Resources Research*, *2*(4), 709–715. https://doi.org/10.1029/WR002i004p00709

Weller, U., Ippisch, O., Köhne, M., & Vogel, H.-J. (2011). Direct Measurement of Unsaturated Conductivity including Hydraulic Nonequilibrium and Hysteresis. *Vadose Zone Journal*, *10*(2), 654–661. https://doi.org/10.2136/vzj2010.0074

Zabala, M. (2013). *Comportamiento de la recuperación de cobre en una pila de lixiviación a condiciones ambientales extremas (Proyecto de título de Ingeniero Civil Químico).* . Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

7 Anexos

7.1 Anexo A. Resultados prueba de tamizado

En este anexo se muestra la Tabla 8, en la cual se pueden ver los resultados de la prueba de tamizado que se realizó al material estudiado. En esta se encuentra el número de malla, abertura, masa obtenida en cada prueba para cada número de tamiz, porcentaje de material retenido, acumulado y pasante de cada prueba.

Tabla 8. Resultados prueba de tamizado completa. P1=prueba 1, P2=prueba 2, P3=prueba 3, PP= promedio de pruebas.

Malla (N°)	4	10	20	30	50	100	200	>200
Abertura [mm]	4,750	2,000	0,850	0,600	0,300	0,150	0,075	<0,075
Prueba 1 [g]	1,21	71,86	104,19	48,27	74,25	96,14	68,23	33,21
Prueba 2 [g]	0,74	52,83	103,45	45,88	89,07	81,75	91,67	29,94
Prueba 3 [g]	1,39	73,30	102,91	42,46	83,79	74,78	91,32	27,82
Promedio pruebas [g]	1,11	66,00	103,52	45,54	82,37	84,22	83,74	30,32
% retenido P1	0,24%	14,45%	20,95%	9,71%	14,93%	19,33%	13,72%	6,68%
% acumulado P1	0,24%	14,69%	35,64%	45,35%	60,27%	79,60%	93,32%	100,00%
% pasante P1	99,76%	85,31%	64,36%	54,65%	39,73%	20,40%	6,68%	0,00%
% retenido P2	0,15%	10,67%	20,89%	9,26%	17,98%	16,50%	18,51%	6,04%
% acumulado P2	0,15%	10,82%	31,70%	40,96%	58,94%	75,45%	93,96%	100,00%
% pasante P2	99,85%	89,18%	68,30%	59,04%	41,06%	24,55%	6,04%	0,00%
% retenido P3	0,28%	14,73%	20,67%	8,53%	16,83%	15,02%	18,35%	5,59%
% acumulado P3	0,28%	15,00%	35,68%	44,21%	61,04%	76,07%	94,41%	100,00%
% pasante P3	99,72%	85,00%	64,32%	55,79%	38,96%	23,93%	5,59%	0,00%
% retenido PP	0,22%	13,28%	20,84%	9,17%	16,58%	16,95%	16,86%	6,10%
% acumulado PP	0,22%	13,51%	34,34%	43,51%	60,09%	77,04%	93,90%	100,00%
% pasante PP	99,78%	86,49%	65,66%	56,49%	39,91%	22,96%	6,10%	0,00%

7.2 Anexo B. Resultados prueba de difracción láser

En este anexo se presenta la Tabla 9, la cual contiene los resultados de la prueba de difracción láser. En esta se tiene el diámetro de partícula en micrones y la distribución de tamaños en porcentaje. En la Figura 39, se muestra el gráfico de la distribución granulométrica del material.

Tabla 9. Resultados prueba difracción láser

Particle diameter [µm]	Size distribution Volume weighted [%]	Undersize Volume weighted [%]
0,1	0	0
0,2	0,141034489	0,942
0,3	0,169691437	1,605
0,4	0,113991947	1,921
0,5	0	1,921
0,6	0	1,921
0,7	0	1,921
0,8	0,027978151	1,957
0,9	0,069605609	2,036
1	0,122135998	2,16
1,1	0,189456647	2,334
1,2	0,258811505	2,551
1,3	0,330611758	2,806
1,4	0,406099968	3,096
1,6	0,527699014	3,775
1,8	0,690769583	4,559
2	0,8391925	5,411
2,2	0,985392329	6,316
2,4	1,106806806	7,244
2,6	1,212243114	8,179
3	1,335092883	10,02
3,2	1,426279029	10,907
3,6	1,489912455	12,598
4	1,539504551	14,161
4,3	1,558358311	15,247
4,6	1,575701809	16,271
5	1,599310333	17,556
5,6	1,638213032	19,345
6	1,690682187	20,469
6,5	1,734739344	21,807
7	1,827449854	23,112
8	2,012872526	25,702
9	2,330466259	28,347
10	2,619029175	31,006
11	2,872336975	33,644
12	3,071150351	36,219
13	3,229623099	38,71
14	3,328619389	41,087
15	3,378356044	43,333
17	3,391147924	47,423
20	3,364527885	52,692

22	3,371021712	55,788
25	3,459944151	60,05
28	3,672014678	64,06
32	4,049837349	69,271
36	4,50674288	74,386
40	4,882485002	79,343
45	4,864462842	84,864
50	4,408715528	89,34
56	3,726041826	93,409
63	2,824754188	96,615
66	2,141565035	97,575
71	1,6143803	98,711
75	1,030037314	99,255
80	0,668920041	99,671
85	0,381729486	99,894
90	0,192453398	100
100	0	100
112	0	100
140	0	100
160	0	100
180	0	100
200	0	100
224	0	100
250	0	100
280	0	100
315	0	100
355	0	100
400	0	100
450	0	100
500	0	100

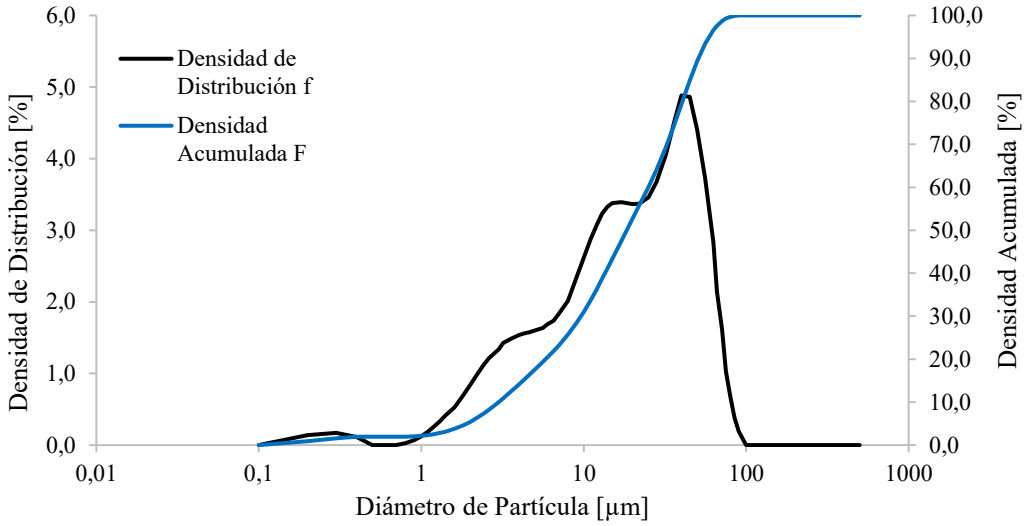

Figura 39. Gráfico distribución granulométrica

7.3 Anexo C. Interfaz y uso de NXperience

En este Anexo se presentan como configurar el datalogger LogBox BLE para poder realizar mediciones con el sensor MAS-1. Además, se muestra como medir los datos en tiempo real y poder realizar un registro de estos. En la Figura 40 se tiene la ventana principal del software al momento de abrirlo.

Figura 40. NXperience - Ventana de inicio

En la Figura 41 se debe ingresar en crear configuración para poder realizar una configuración nueva, si ya se tiene una configuración previamente guardada se puede abrir desde el archivo de configuración. En la Figura 42 se tiene la ventana siguiente al momento de selección crear

configuración y en esta se debe seleccionar el tipo de datalogger que se esté utilizando, en este caso se hace uso del LogBox BLE.

Figura 41. NXperience - Creación de configuración 1

Figura 42. NXperience - Creación de configuración 2

En la Figura 43 se tienen los parámetros generales que se pueden configurar del datalogger como son el nombre, habilitar o deshabilitar el bluetooth y todo lo relacionado a este. Además, se puede elegir cada cuanto tiempo se van a visualizar los cambios en la pantalla digital del LogBox. En la Figura 44 se configuran las entradas del datalogger, es decir, donde van conectados los sensores; para este caso se tiene que los sensores utilizados son analógicos por lo que se deben configurar en esos canales (este LogBox soporta hasta tres sensores analógicos).

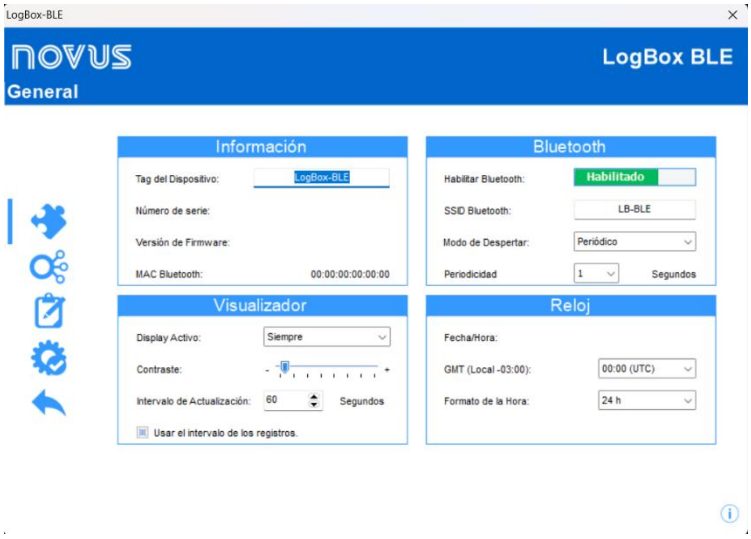

Figura 43. NXperience - Creación de configuración 3

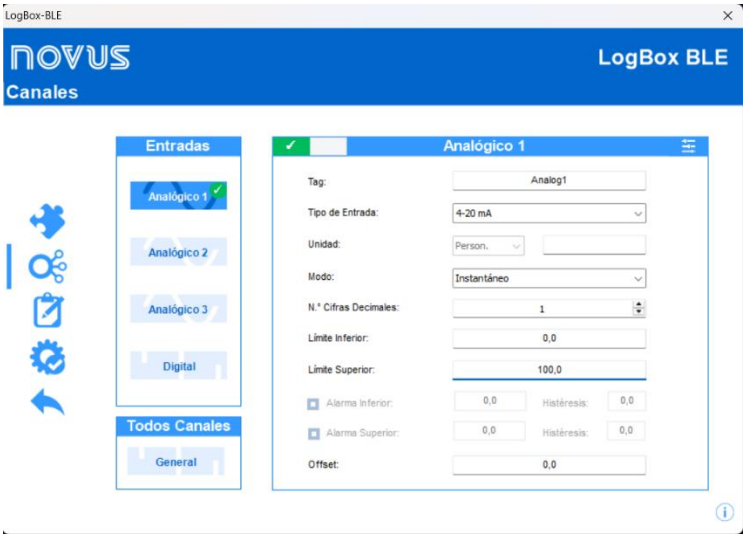

Figura 44. NXperience - Creación de configuración 4

En la Figura 45 se configura el registro de datos del datalogger, donde este se puede habilitar o deshabilitar y determinar un intervalo para el registro, también se puede determinar el modo de memoria de registro donde memoria circular se utiliza para cuando cada vez que se inicie un nuevo registro se elimine el anterior y memoria llena para registrar todas las mediciones posibles en la memoria del datalogger. En la Figura 46 es donde se finaliza la configuración y se debe enviar lo creado al LogBox seleccionado el apartado de enviar configuración.

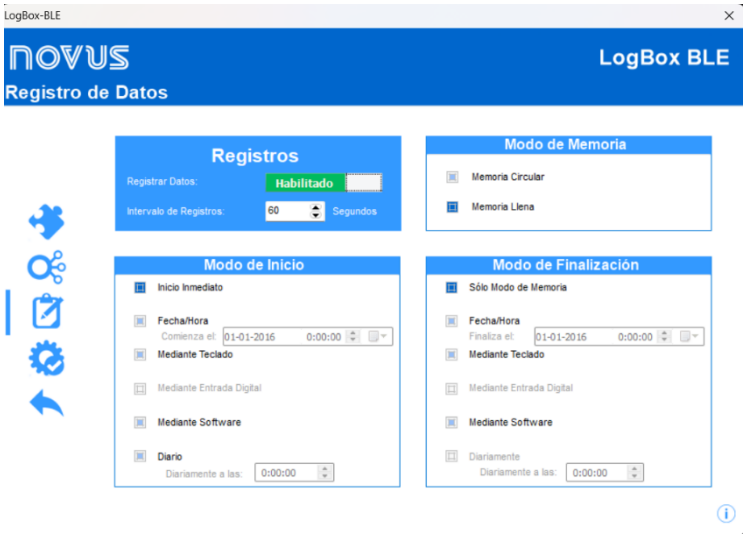

Figura 45. NXperience - Creación de configuración 5

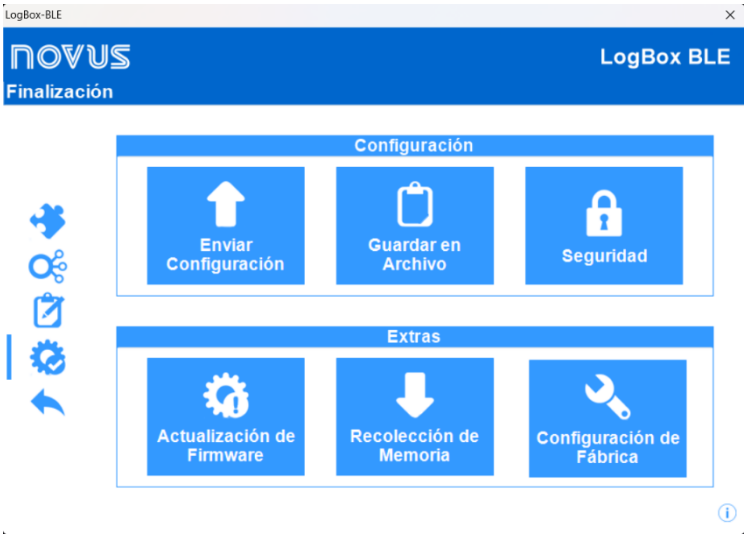

Figura 46. NXperience - Creación de configuración 6

En la Figura 47 se tiene la ventana para comenzar con el monitoreo donde se debe seleccionar el icono que se encuentra encerrado en rojo y luego seleccionar el LogBox. En la Figura 48 se puede seleccionar el intervalo de tiempo de monitoreo y en la Figura 49 se tiene la ventana donde se muestran los datos, la cual en la esquina inferior derecha tiene los símbolos para reiniciar o pausar el monitoreo, imprimir los datos monitoreados y cancelar este.

Figura 47. NXperience - Monitoreo 1

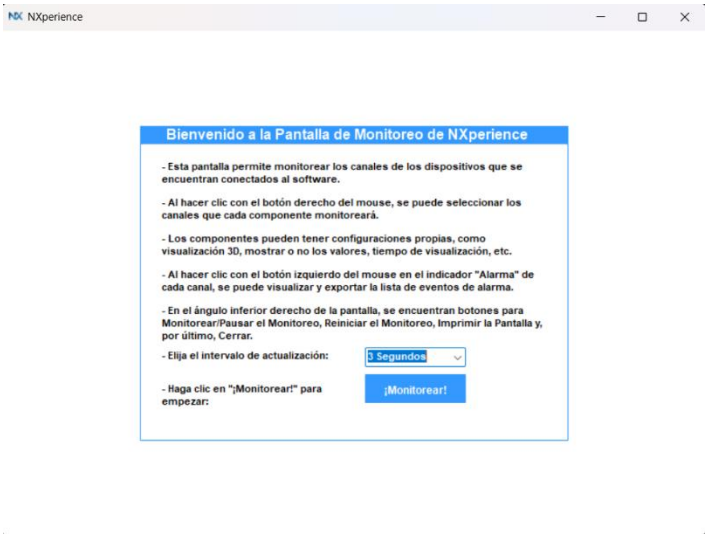

Figura 48. NXperience - Monitoreo 2

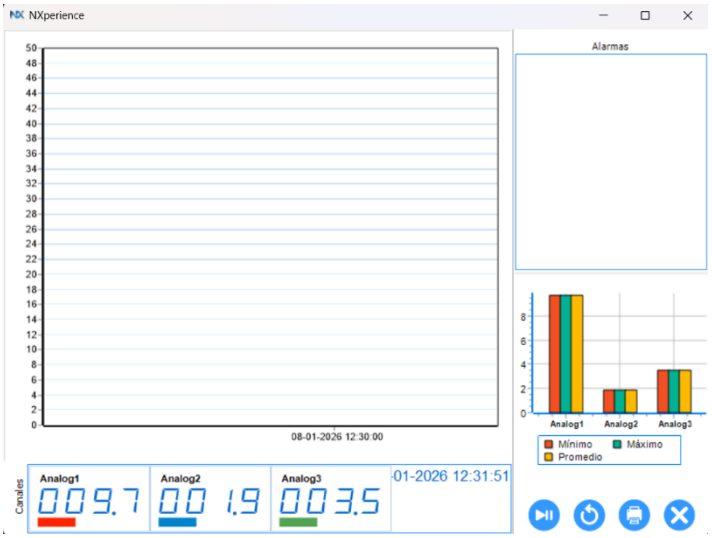

Figura 49. NXperience - Monitoreo 3

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Determinación experimental del comportamiento hidráulico de medios con saturación variable.

Nombre Memorista: Benjamin Maximiliano Herbias Vidal

Modalidad	Investigación
Concepto	EXCELENTE
Calificación	6.8
Fecha	30.01.2026

Prof. Ramón Díaz N.

Profesor (es) Patrocinante (s)

Prof. Ramón Díaz N.

Ingeniero Supervisor:

Institución:

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Roberto Gómez E.

Prof. Andrés Ramírez M.

Resumen

La lixiviación en pilas requiere caracterizar con precisión el comportamiento hidráulico del material para definir tasas de riego que maximicen la recuperación sin comprometer la estabilidad. En esta memoria se determinó experimentalmente la relación presión–contenido volumétrico de agua (VWC) de un suelo granular arenoso (regolito/"maicillo") para obtener su curva de retención de humedad (SWRC) y la función de conductividad hidráulica no saturada K(h) bajo saturación variable.

El material se caracterizó mediante granulometría y clasificación textural USDA; luego se ejecutaron cuatro ensayos de drenaje en equipo de presión (1–500 kPa) sobre muestras saturadas, registrando VWC con un sensor MAS-1 y un data logger LogBox BLE. La SWRC se ajustó con van Genuchten en RETC y la conductividad hidráulica saturada se midió con un permeámetro de carga constante (ASTM); con los parámetros (θr, θs, α, n, Ks) se estimó K(h) en HYDRUS-1D y se convirtió en tasas de riego equivalentes para delimitar ventanas operativas. Los resultados muestran el patrón típico de suelos arenosos (saturación efectiva, transición marcada y zona residual) y una K(h) casi constante

a bajas presiones que decrece bruscamente al aumentar la succión, con un tramo especialmente sensible en log(h) ≈ 1–2 que define un límite operativo para reducir riesgo de encharcamiento, flujos preferenciales y pérdidas de eficiencia.