

Evaluación de la conductividad hidráulica saturada a diferentes profundidades en Suelos utilizados para cultivo de cebolla en el Páramo de Berlín

Lizeth Mariana Mosquera Pardo Y Jesús José Costa Ramírez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniería Civil

Director

John Jairo Márquez Molina

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de ingeniería civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A Dios, por ser nuestra guía, fortaleza y fuente inagotable de sabiduría, iluminando nuestro camino y dándonos la paciencia y el coraje para superar cada desafío. A nuestros padres, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional nos han dado la fuerza para llegar hasta aquí, y a nuestros familiares, por su constante aliento y por estar siempre a nuestro lado, brindándonos su cariño y comprensión. Sin su apoyo, este logro no hubiera sido posible. Con gratitud y amor, les dedicamos este logro.

### **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado, por su invaluable orientación, apoyo y dedicación durante todo el proceso. Su paciencia, conocimientos y constante motivación fueron esenciales para alcanzar este logro. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al personal de laboratorio por prestarnos todas las máquinas y equipos necesarios para la construcción de nuestro permeámetro. También agradecemos al grupo de maestría por facilitarnos las muestras necesarias para llevar a cabo el estudio. Finalmente, queremos agradecer a la escuela por brindarnos el espacio adecuado y los recursos necesarios para desarrollar nuestra pasantía. Sin su apoyo, este trabajo no habría sido posible.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	12
1. OBJETIVOS .....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. CUERPO DEL TRABAJO.....	17
2.1 Marco Referencial.....	17
2.1.1 Método. ....	17
2.1.1.1 Localización de la zona de estudio .....	17
2.1.1.2 Construcción permeámetro de carga constante.....	20
2.1.1.3 Preparación de muestras de suelo .....	24
2.1.1.4 Medición de Ksat .....	25
2.1.1.5 Análisis estadístico.....	27
2.1.2 Resultados.....	29
2.1.2.1 Análisis de resultados .....	32
2.1.2.2 Ksat con respecto a valores estándares de cultivo de cebolla en rama .....	38
2.1.2.3 Discusión.....	38
CONCLUSIONES.....	41
RECOMENDACIONES .....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43

APÉNDICES..... 48

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Estadísticos descriptivos de la conductividad hidráulica saturada (Ksat) por zona, profundidad y muestra, incluyendo media, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, rango, cuartiles (Q1, Q3) e intervalo intercuartilico (IQR).</i> .....	29
Tabla 2. <i>Mediana - conductividad hidráulica saturada (Ksat), % arena, % limo y %arcilla, densidad aparente, conductividad eléctrica, porosidad del suelo, humedad gravimétrica y pH.</i> .....	33
Tabla 3. <i>Resultados pruebas no paramétricas datos agrupados (comparación entre zonas). Kruskal-Wallis</i> .....	34
Tabla 4. <i>Análisis post hoc - Resultados de pares de zonas que diferían específicamente.</i>	35
Tabla 5. <i>Coficiente de Pearson - Matriz zona alta</i> .....	35
Tabla 6. <i>Coficiente de Pearson - Matriz zona media.</i> .....	36
Tabla 7. <i>Coficiente de Pearson - Matriz zona Baja.</i> .....	37

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Mapa de Colombia destacando la ubicación del páramo de Berlín</i> .....	18
Figura 2. <i>Esquema de lote, diferenciación de zonas, y puntos de obtención.</i> .....	19
Figura 3. <i>Sistema permeámetro de carga constante.</i> .....	21
Figura 4. <i>Permeámetro múltiple de carga constante.</i> .....	23
Figura 5. <i>Saturación de muestras.</i> .....	24
Figura 6. <i>Orificios para sistema de desagüe del permeámetro.</i> .....	25
Figura 7. <i>Medición de volúmenes (V) de agua para cada carga hidráulica.</i> .....	26
Figura 8. <i>gráfica de box-plot, variación de los valores de Ksat, mediana, datos máximos, mínimos y rango intercuartílico (IQR)</i> .....	31
Figura 9. <i>Ksat por muestra (Tabla1), Profundidad del suelo (cm), Maximo y minimo estandar cultivo de cebolla en rama (1-10 m/dia).</i> .....	38

## **Lista de Apéndices**

**Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional.**

*Apéndice A. Código para análisis estadísticos en Python y Google Colab*

*Apéndice B. Hoja de cálculo para la determinación de  $K_{sat}$*

*Apéndice C. Documentación del permeámetro de carga constante*

*Apéndice D. Fotografías del procedimiento experimental*

*Apéndice E. Archivos adjuntos*

### Glosario

1. **Compactación del Suelo:** proceso de reducción de los espacios porosos del suelo, generalmente debido al paso de maquinaria pesada, que afecta la infiltración del agua.
2. **Conductividad Hidráulica Saturada (Ksat):** medida que describe la capacidad de un suelo para permitir el paso del agua cuando está completamente saturado.
3. **Coefficiente de Correlación de Pearson:** medida estadística que indica la relación lineal entre dos variables, con valores cercanos a 1 o -1 mostrando una fuerte correlación.
4. **Densidad Aparente:** relación entre la masa de un volumen de suelo y su volumen total, importante para evaluar la compactación y la porosidad del suelo.
5. **Gradiente Hidráulico:** variación de la carga hidráulica a lo largo de una columna de agua, utilizado para calcular el flujo de agua a través de un medio poroso.
6. **Hidromecánica:** rama de la ingeniería que estudia la interacción entre el agua y los suelos, esencial para el diseño de infraestructuras hidráulicas.
7. **Humedad Gravimétrica:** medida de la cantidad de agua contenida en el suelo, calculada en función de su peso antes y después de un proceso de secado.
8. **Infiltración:** proceso en el que el agua penetra en el suelo, influenciando la recarga de acuíferos y el diseño de sistemas de riego.
9. **Muestra de Suelo:** porción de suelo recolectada para analizar sus propiedades físicas y químicas en laboratorio.
10. **pH del Suelo:** medida de la acidez o alcalinidad del suelo, que afecta la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica.

- 11. Permeabilidad:** capacidad de un material para permitir el paso de líquidos o gases a través de él, fundamental en la gestión del agua del suelo.
- 12. Permeámetro de Carga Constante:** dispositivo utilizado para medir la conductividad hidráulica saturada de los suelos, manteniendo una carga hidráulica constante durante el ensayo.
- 13. Porosidad del Suelo:** cantidad de espacio vacío dentro de un volumen de suelo, que influye en la retención de agua y aire.
- 14. Prueba de Kruskal-Wallis:** análisis estadístico no paramétrico utilizado para comparar más de dos grupos independientes, especialmente cuando los datos no siguen una distribución normal.
- 15. Recarga de Acuíferos:** proceso por el cual el agua subterránea se repone debido a la infiltración de agua desde la superficie, vital para mantener los recursos hídricos.
- 16. Rango Intercuartílico (IQR):** medida estadística que describe la dispersión de los datos en un conjunto, entre el primer y tercer cuartil.
- 17. Saturación:** estado en el que un suelo contiene la máxima cantidad de agua que puede retener, sin que haya exceso de agua libre en su superficie.
- 18. Sistema de Riego:** conjunto de métodos y dispositivos utilizados para distribuir agua de manera controlada en terrenos agrícolas para optimizar el crecimiento de las plantas.
- 19. Zona Topográfica:** área específica dentro de un terreno que presenta características similares de elevación y exposición al agua.
- 20. Zonas de Muestreo:** áreas delimitadas dentro de un terreno donde se recolectan muestras de suelo para su análisis, generalmente basadas en variaciones de profundidad o ubicación.

## Resumen

**Título:** Evaluación de la conductividad hidráulica saturada a diferentes profundidades en Suelos utilizados para cultivo de cebolla en el Páramo de Berlín\*

**Autor:** Lizeth Mariana Mosquera Pardo, Jesús José Costa Ramírez\*\*

**Palabras Clave:** conductividad hidráulica; Ksat; suelos del páramo; gestión hídrica; sistemas de riego; sostenibilidad agrícola; permeámetro carga constante; cebolla de rama.

### Descripción:

Este estudio se enfoca en la evaluación de la conductividad hidráulica saturada (Ksat) en suelos del páramo de Berlín, utilizados para el cultivo de cebolla de rama. La creciente actividad agrícola intensiva en la región ha puesto en riesgo la integridad ecológica del ecosistema de páramo, lo que resalta la necesidad urgente de estudiar sus propiedades hidráulicas para promover su conservación. Se empleó un permeámetro de carga constante para determinar Ksat en 27 muestras recolectadas a diferentes profundidades (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm). Los resultados mostraron una variabilidad significativa de Ksat, con valores que oscilan entre 0.1143 m/día y 13.461 m/día, indicando una amplia diversidad en la textura, compactación y capacidad de infiltración de los suelos analizados. Esta variabilidad destaca la importancia de comprender las propiedades hidromecánicas del suelo para optimizar el diseño de sistemas de riego, la gestión sostenible del agua y contribuir a la preservación de los ecosistemas de alta montaña. Los datos obtenidos tienen aplicaciones prácticas en la planificación de infraestructuras hidráulicas y la conservación del suelo en el páramo.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: John Jairo Marquez. Doctor en ciencias agropecuarias.

### Abstract

**Title:** Evaluation of Saturated Hydraulic Conductivity at Different Depths in Soils Used for Onion Cultivation in the Berlin Páramo\*

**Author:** Lizeth Mariana Mosquera Pardo, Jesús José Costa Ramírez\*\*

**Key Words:** hydraulic conductivity; Ksat; paramo soils; water management; irrigation systems; agricultural sustainability; constant head permeameter; spring onion.

### Description:

This study focuses on the evaluation of saturated hydraulic conductivity (Ksat) in soils of the Berlín páramo, used for the cultivation of green onion. The increasing intensive agricultural activity in the region has put the ecological integrity of the páramo ecosystem at risk, highlighting the urgent need to study its hydraulic properties to promote its conservation. A constant head permeameter was used to determine Ksat in 27 samples collected at different depths (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm). The results showed significant variability in Ksat, with values ranging from 0.1143 m/day to 13.461 m/day, indicating a wide diversity in texture, compaction, and infiltration capacity of the analyzed soils. This variability underscores the importance of understanding the hydro-mechanical properties of the soil to optimize irrigation system design, sustainable water management, and contribute to the preservation of high-mountain ecosystems. The data obtained has practical applications in the planning of hydraulic infrastructures and soil conservation in the paramo

---

\*Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Sciences. School of Civil Engineering. Director: John Jairo Márquez. Doctor in Agricultural Sciences.

## Introducción

La conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) es un parámetro clave en la ingeniería civil e hidrogeología, dado que determina la capacidad de un material o suelo para permitir el paso del agua cuando este está completamente saturado [1]. Este parámetro es esencial para comprender la dinámica del flujo de agua tanto en la zona no saturada como saturada (agua subterránea), siendo crucial para la predicción del comportamiento hidrológico en diversas situaciones. La medición de la  $K_{sat}$  del suelo, es fundamental para distintos ámbitos de la ingeniería y ciencias ambientales, pues su correcta evaluación permite diseñar de manera adecuada sistemas de riego y drenaje agrícola [2], permite reducir el grado de incertidumbre respecto a esta propiedad del suelo en la implementación de modelos hidrológicos tendientes a gestionar los recursos hídricos por su relación directa en importantes procesos hidrológicos fundamentales como la infiltración del agua en suelo y la recarga de acuíferos superficiales [2]. Por otro lado, su correcta estimación basada en muestras de campo permite realizar estimaciones más precisas de los fenómenos de flujo y transporte de contaminantes a lo largo del perfil del suelo, contribuyendo así a una mejor comprensión y gestión de los procesos que afectarían la calidad ambiental especialmente en regiones agrícolas y en ecosistemas, altamente sensibles como los páramos.

El páramo de Berlín, localizado en el departamento de Santander, Colombia, representa un ecosistema de alta montaña de gran relevancia ambiental. Este ecosistema se destaca por sus suelos ricos en materia orgánica y su alta capacidad de retención de agua [3], características que lo hacen particularmente vulnerable a los efectos de la actividad humana. En las últimas décadas, las prácticas agrícolas intensivas, como el cultivo de cebolla de rama, han puesto en riesgo la integridad ecológica de la zona [4], lo que ha resaltado la urgente necesidad de estudiar sus

propiedades hidráulicas para promover su conservación y uso sostenible. Si bien existen investigaciones sobre conductividad hidráulica en otras áreas, el páramo de Berlín carece de datos específicos sobre este parámetro medidos insitu, lo cual dificulta la construcción de modelos predictivos y la adecuada planificación de los recursos hídricos en la región.

A partir de estas problemáticas, este estudio se enfoca en dos preguntas centrales: ¿Cómo varía la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) en los suelos del páramo de Berlín a diferentes profundidades (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm), bajo cultivo de cebolla de rama? y ¿Cuáles son las relaciones con otras propiedades físicas del suelo en ambientes donde se llevan a cabo actividades de cultivo? Para dar respuesta a estas preguntas y con el fin de profundizar en la comprensión de los procesos de flujo y transporte de agua en el suelo, este estudio tiene como objetivo general evaluar la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) en un suelo utilizado para el cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*) en el páramo de Berlín, Santander. Para lograr este objetivo, se construyó un permeámetro de carga constante para determinar la conductividad hidráulica saturada a nivel de laboratorio. Adicionalmente, se llevaron a cabo ensayos de  $K_{sat}$  en muestras de suelo obtenidas a tres diferentes profundidades (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm) en una zona de páramo sometida a dicha actividad agrícola. Finalmente, se analizó cómo los valores obtenidos de conductividad hidráulica saturada influyen en la capacidad del suelo para permitir el flujo de agua, y su relación con otras propiedades físicas medidas en el lote de estudio.

Para el desarrollo de este proyecto, se seleccionó en un predio donde se lleva a cabo la actividad del cultivo de cebolla de rama y se dispuso de 27 muestras de suelo obtenidas a distintas profundidades y posiciones topográficas del predio (zona alta, media y baja), los resultados obtenidos de este estudio contribuirán significativamente a la comprensión de las

características hidráulicas del suelo en el páramo de Berlín, permitiendo desarrollar modelos más precisos para la gestión de los recursos hídricos en la región. Además, se espera que los datos obtenidos sirvan como base para la implementación de prácticas agrícolas más sostenibles, que no solo optimicen el uso del agua, sino que también ayuden a conservar la integridad de este ecosistema tan importante para la biodiversidad y el ciclo hidrológico de la región.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Evaluar la conductividad hidráulica saturada a distintas profundidades en un suelo utilizado para el cultivo de cebolla de rama (*allium fistulosum*), en el páramo de Berlín – Santander.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Construir un permeámetro de carga constante para la determinación de la conductividad hidráulica saturada a nivel de laboratorio.
- Realizar ensayos de conductividad hidráulica saturada en muestras de suelo obtenidas a tres profundidades diferentes (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm) en una zona de páramo, bajo la actividad del cultivo de la cebolla de rama.
- Analizar como influyen los valores obtenidos de la conductividad hidráulica saturada del suelo en la capacidad para permitir el flujo de agua, teniendo en cuenta otras propiedades físicas medidas en el lote de estudio.

## **2. Cuerpo del Trabajo**

### **2.1 Marco Referencial**

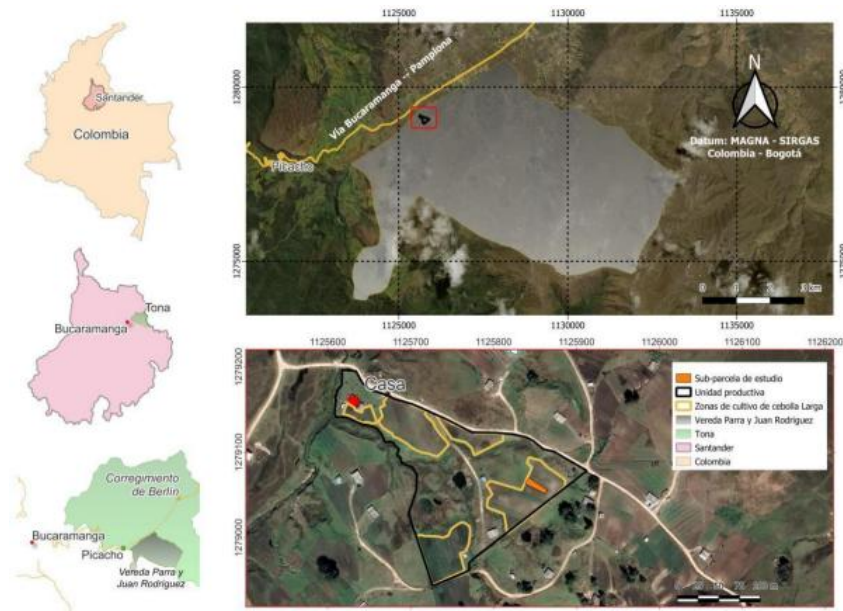
(Incluye todos los aspectos que permiten fundamentar la investigación que realizo, por ello debe recordar incluir lo relacionado con a) marco teórico, b) marco conceptual, c) marco legal. Debe contener en un texto articulado todos aquellos elementos que dan soporte teórico y analítico a la investigación, relacionado con antecedentes (Evolución histórica, normatividad Si es necesaria), estado del arte [Estado del conocimiento, teorías, investigaciones, tesis, etc.], igualmente debe hacer las respectivas citaciones de las fuentes que consulto para redactarlo.

#### **2.1.1 Método.**

A continuación, se hace una descripción de los procedimientos desarrollados en esta investigación:

##### **2.1.1.1 Localización de la zona de estudio**

El páramo de Berlín se encuentra ubicado en el departamento de Santander, en Colombia, y es un ecosistema de alta montaña que forma parte de los páramos andinos, los cuales son fundamentales para la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. Este páramo se caracteriza por su clima frío, con temperaturas promedio que oscilan entre los 8 °C y los 12 °C [5], y su vegetación, que incluye frailejones, musgos y arbustos, adaptados a las condiciones extremas de humedad y frío (ver figura 1).

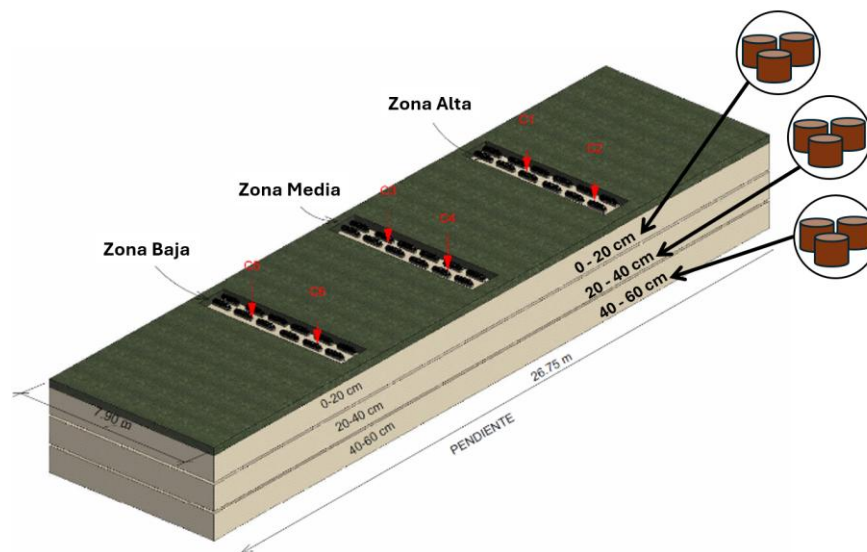
**Figura 1. Mapa de Colombia destacando la ubicación del páramo de Berlín**

*Nota: Naranjo, (2025)*

En el trabajo de maestría de Juan David Naranjo (2025), localizó el predio donde se llevó a cabo el estudio (ver figura 1). En dicha investigación, se realizaron muestreos en el área y se obtuvieron las muestras de suelos utilizadas en los ensayos de  $K_{sat}$  en este trabajo. La zona de estudio corresponde a una unidad productiva de cebolla de rama situada en la vereda Parra y Juan Rodríguez, en el corregimiento de Berlín, municipio de Tona, Santander ( $7^{\circ}07'08.1''$  N,  $72^{\circ}56'23.0''$  W), a una altitud de 3,380 metros sobre el nivel del mar, en el kilómetro 58 de la vía nacional que conecta Bucaramanga (Santander) con Pamplona (Norte de Santander). Además, esta zona se encuentra dentro del complejo de páramos Jurisdicciones Santurbán – Berlín (Figura 1), área que actualmente se encuentra dentro de una figura de proyección denominada Distrito de Manejo Integrado (DMI) de los Recursos Naturales Renovables del Páramo de Berlín [21].

Dentro de esta área de estudio, se seleccionó un predio donde se lleva a cabo la actividad del cultivo de cebolla de rama. Para los fines de este trabajo, el lote fue sectorizado en tres zonas: alta, media y baja. En cada una de estas zonas, se tomaron un total de 9 muestras de suelo, distribuidas en 3 repeticiones para las tres profundidades analizadas. Esto resultó en un total de 27 muestras de suelo provenientes de las distintas zonas y profundidades. La figura 2 ilustra un esquema representativo del lote experimental, destacando la ubicación de las zonas y las profundidades de suelo evaluadas para la determinación de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ). Para la comparación entre la  $K_{sat}$  y las diferentes propiedades del suelo, se utilizaron las determinaciones realizadas por Naranjo (2025), de la densidad y la conductividad eléctrica del suelo realizadas durante 7 campañas con un lapso de 1.5 meses entre muestras. Por otro lado, las otras variables como la porosidad del suelo, la humedad gravimétrica y el pH del suelo fueron estudiadas durante un periodo de 5 meses.

Figura 2. Esquema de lote, diferenciación de zonas, y puntos de obtención.



### **2.1.1.2 Construcción permeámetro de carga constante.**

Un permeámetro de carga constante es un dispositivo utilizado a nivel de laboratorio, que permite medir la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) de un material poroso, como el suelo. Este equipo permite mantener una diferencia de carga hidráulica constante a lo largo de la muestra suelo, lo que facilita la movilidad del flujo del agua a través de la muestra previamente saturada, generando un flujo constante a través de ella. El permeámetro consta de un recipiente que contiene la muestra de suelo saturada, un sistema de suministro de agua que mantiene una carga constante, y un sistema de medición para cuantificar el volumen de agua que atraviesa la muestra en un determinado tiempo [6].

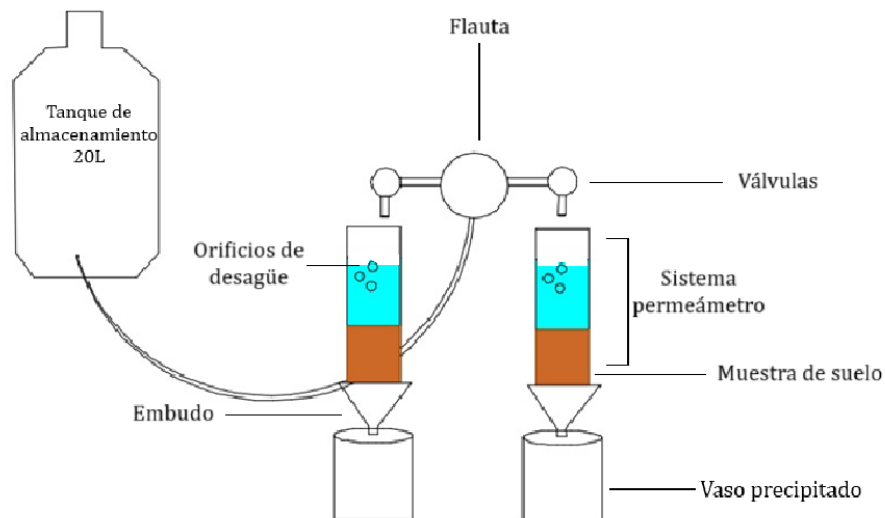
El funcionamiento del permeámetro de carga constante se basa en la aplicación de la Ley de Darcy, que describe el flujo de agua a través de medios porosos. El agua fluye a través de la muestra debido a la diferencia de carga hidráulica entre la entrada (parte superior de muestra) y la salida del permeámetro (base de la muestra). Una vez que el flujo se estabiliza, se mide un volumen de agua drenado y el tiempo en cual se obtuvo. Estos datos básicos son utilizados para calcular la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) mediante un método de ajuste gráfico en donde en función de la densidad de flujo ( $q$ ) y el gradiente hidráulico ( $i$ ) se determina la  $K_{sat}$  como la pendiente de la relación de estos dos parámetros.

Dado el número de muestras que se disponían a analizar (27 muestras) y considerando que el desarrollo de cada una de las estimaciones de  $K_{sat}$  requiere una importante cantidad de tiempo, fue necesario para optimizar el tiempo en los plazos de la pasantía de investigación

construir un permeámetro, en donde se pudieran realizar varias mediciones de forma simultánea, con lo cual no solo se logró agilizar el desarrollo experimental, sino que también permitió el control adecuado del ensayo en cada una de las repeticiones por profundidad que se tenían, de esta forma se logró optimizar los tiempos del desarrollo de los ensayos en el laboratorio.

El permeámetro de carga constante se construyó utilizando una botella con una capacidad de 20 litros, en la que se instaló una válvula en la parte inferior, conectada a una manguera que permite el flujo de agua hacia el sistema de distribución de agua hacia las muestras de suelos. Este sistema constaba de una flauta con seis orificios, cada uno con una válvula conectada con la cual realizaba la regulación del agua hacia la muestra de suelo. En la figura 3, se puede observar el esquema general del permeámetro diseñado. Para su construcción se utilizaron tubos de PVC, las muestras de suelo fueron dispuestas en cilindros de 7.5 cm de diámetro y una altura de 6 cm.

**Figura 3. Sistema permeámetro de carga constante.**



A continuación, se hace una descripción general de cada una de las partes que integran el sistema del permeámetro diseñado y construido para el desarrollo del estudio.

- **Botella de 20 litros:** Actúa como el reservorio principal de agua para el permeámetro. Su función es suministrar una cantidad suficiente de agua para mantener la carga constante durante el ensayo. La botella es el punto de entrada del agua al sistema y su tamaño permite una presión constante en el flujo.
- **Válvula y manguera en la parte inferior de la botella:** La válvula ubicada en la parte inferior de la botella regula el flujo de agua hacia la manguera, asegurando que el agua salga a un ritmo controlado. La manguera conecta la botella con el sistema de flauta, permitiendo que el agua se transfiera de manera continua y controlada.
- **Sistema de flauta con seis orificios y válvulas:** Este sistema distribuye el agua hacia el permeámetro. Cada orificio tiene una válvula que se puede abrir o cerrar, permitiendo que el agua fluya hacia el permeámetro de manera controlada. El propósito de las válvulas es ajustar el flujo de agua y mantener la presión constante durante el ensayo, abriendo o cerrando los orificios según sea necesario.
- **Tuberías de PVC con orificios a diferentes alturas:** El permeámetro está construido con tubos de PVC, que contienen tres orificios a diferentes alturas dentro del tubo. Estos orificios permiten que el agua fluya y se mantenga a una altura constante, lo que es crucial para el funcionamiento del sistema de carga constante. Cuando el agua fluye y el nivel disminuye en un orificio, ese orificio se cierra y se abre el siguiente, lo que permite que el nivel de agua se mantenga estable a lo largo del ensayo.

- **Ciclo de apertura y cierre de orificios:** La función de los orificios es mantener la carga de agua constante. A medida que el agua fluye a través de uno de los orificios, el nivel del agua disminuye y, una vez alcanzado un umbral, se cierra el primer orificio y se abre el siguiente. Este ciclo de apertura y cierre de orificios permite que el nivel del agua suba nuevamente, asegurando que el permeámetro mantenga una presión constante durante todo el ensayo.

En la figura 4, se observa en detalle el sistema de distribución de agua el cual permitía realizar 6 ensayos de forma simultánea y controlada en el permeámetro construido. En la parte superior de cada una de las muestras de suelos se instaló una tubería para mantener la carga hidráulica constante de agua sobre la muestra saturada y mediante la apertura de tres orificios de salida se podía modificar la altura de agua sobre las muestras, en la figura 6, se observa la posición de los tres orificios de desagüe que permitían configurar 3 distintas cargas hidráulicas.

**Figura 4. Permeámetro múltiple de carga constante.**



### 2.1.1.3 Preparación de muestras de suelo

Para dar inicio al procedimiento experimental las muestras de suelo fueron saturadas en agua durante 24 horas, antes de realizar las mediciones para garantizar condiciones de saturación completas, luego se midieron el diámetro y la altura de cada muestra para calcular el área transversal utilizada en los cálculos. En la figura 5, se observa las muestras de suelo sumergidas en agua para facilitar su saturación.

Figura 5. Saturación de muestras.



Una vez se lograba la saturación de las muestras, sus bases eran puesta en los embudos en donde se producía la circulación continua de agua por drenaje, una vez se alcanzaba un goteo constante, el cual era verificado visualmente se iniciaba la medición de volumen de agua drenado (V) mediante una probeta graduada y el tiempo de drenaje (t) medido por medio de un cronometro. Estas mediciones se realizaban para las alturas de agua sobre la superficie de la muestra saturada ( $h_s$ ) de 1.7 cm, 2.7 cm, y 3.7 cm respectivamente.

**Figura 6. Orificios para sistema de desagüe del permeámetro.**

#### 2.1.1.4 Medición de $K_{sat}$

Con cada altura de agua constante sobre la muestra de suelo, se calcula el caudal drenado por el dispositivo como  $(Q = V/t)$ , de modo que, una vez se estabiliza el caudal, se asume que se establece un régimen de flujo permanente, con lo cual se puede aplicar la ecuación de Darcy (ecuación 1):

$$Q = -K_{sat} \times A \times \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

Donde,  $Q$ : es el caudal drenado ( $m^3/día$ ),  $K_{sat}$ : es la conductividad hidráulica ( $m/día$ ),  $A$ : es el área de la muestra de suelo ( $m^2$ ),  $\Delta h$ : es la diferencia de carga hidráulica entre la base o salida del permeámetro ( $h_b$ ) (m) y parte superior de la muestra de suelo ( $h_s$ ) (m) y  $L$ : es la longitud de la muestra (m).

Si de la ecuación 1, se despeja el término del área de la muestra ( $A$ ), entonces se obtiene la ecuación (2):

$$\frac{Q}{A} = -K_{sat} \times \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

En donde el termino  $(Q/A)$  se define como densidad de flujo ( $q$ ) (m/s) y el termino  $(\Delta h/L)$  como el gradiente hidráulico ( $i$ ), el signo negativo se cancela dado que  $\Delta h$  es igual a  $(h_b - h_s)$  y como  $h_s = 0$  cm, entonces la ecuación (2) queda como:

$$q = K_{sat} \times i \quad (3)$$

De modo que, si se representa gráficamente los datos experimentales  $(q, i)$ , los puntos correspondientes a cada uno de los ensayos deben alinearse a lo largo de una línea recta, que pasa por el origen de coordenadas y cuya pendiente  $(\Delta y/\Delta x)$  es la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) de la muestra. En la figura 7, se presenta la forma de obtención de los diferentes volúmenes drenados.

**Figura 7. Medición de volúmenes ( $V$ ) de agua para cada carga hidráulica.**



### 2.1.1.5 Análisis estadístico

El estudio empleó un conjunto de estadísticos básicos para caracterizar los datos obtenidos. Inicialmente, se calcularon medidas de tendencia central como la media y la mediana para cada una de las zonas topográficas (alta, media y baja) y profundidades de muestreo (0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm), con el fin de establecer valores representativos y facilitar comparaciones entre los diferentes estratos del terreno.

Asimismo, se aplicaron medidas de dispersión como la desviación estándar, el rango y el coeficiente de variación (CV), permitiendo evaluar la variabilidad de los datos obtenidos. Estas estadísticas se calcularon para todas las variables edáficas medidas, incluyendo la textura del suelo (porcentaje de arena, limo y arcilla), densidad aparente, porosidad, humedad gravimétrica, pH y conductividad eléctrica.

Dado que los datos no presentan una distribución normal se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para analizar las diferencias en la  $K_{sat}$  y otras propiedades físicas y químicas del suelo entre zonas y profundidades. En los casos donde se detectaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), se aplicó una prueba post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni, con el fin de identificar los pares específicos de grupos que presentaban diferencias significativas.

Eventualmente, se emplearon coeficientes de correlación de Pearson para evaluar la relación entre la  $K_{sat}$  y las demás propiedades del suelo. Estas correlaciones permitieron

identificar patrones de comportamiento hidráulicos asociados con la textura, estructura y características fisicoquímicas del suelo.

Para el análisis y presentación de los resultados, se implementó un sistema integral de representación gráfica que combinó tablas, gráficos de tendencia y diagramas de caja. En primer lugar, se elaboraron tablas organizadas por zona topográfica y profundidad de muestreo, en las cuales se consignaron los valores promedio de  $K_{sat}$ , junto con los parámetros edáficos asociados, facilitando la comparación directa entre los diferentes estratos. Adicionalmente, se desarrollaron diferentes tipos de gráficos, siendo estos de barras, dispersión y boxplot para visualizar la variación de  $K_{sat}$  con la profundidad en cada zona y su relación con otras variables, lo que permitió identificar patrones de comportamiento hidráulico a lo largo del perfil del suelo.

Como complemento al análisis univariado, se implementaron matrices de correlación para evaluar sistemáticamente las relaciones bivariadas entre las propiedades edáficas medidas. Esta herramienta estadística permitió identificar asociaciones significativas entre la  $K_{sat}$  y variables como la textura, estructura y características fisicoquímicas del suelo, estableciendo jerarquías de influencia entre los distintos factores analizados.

Para finalizar el análisis de datos, se realizó una comparación crítica de los resultados obtenidos con los reportados por diversos autores en estudios similares, lo que permitió contextualizar los hallazgos dentro del conocimiento existente sobre la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) y su relación con las propiedades edáficas. Este contraste permitió evidenciar



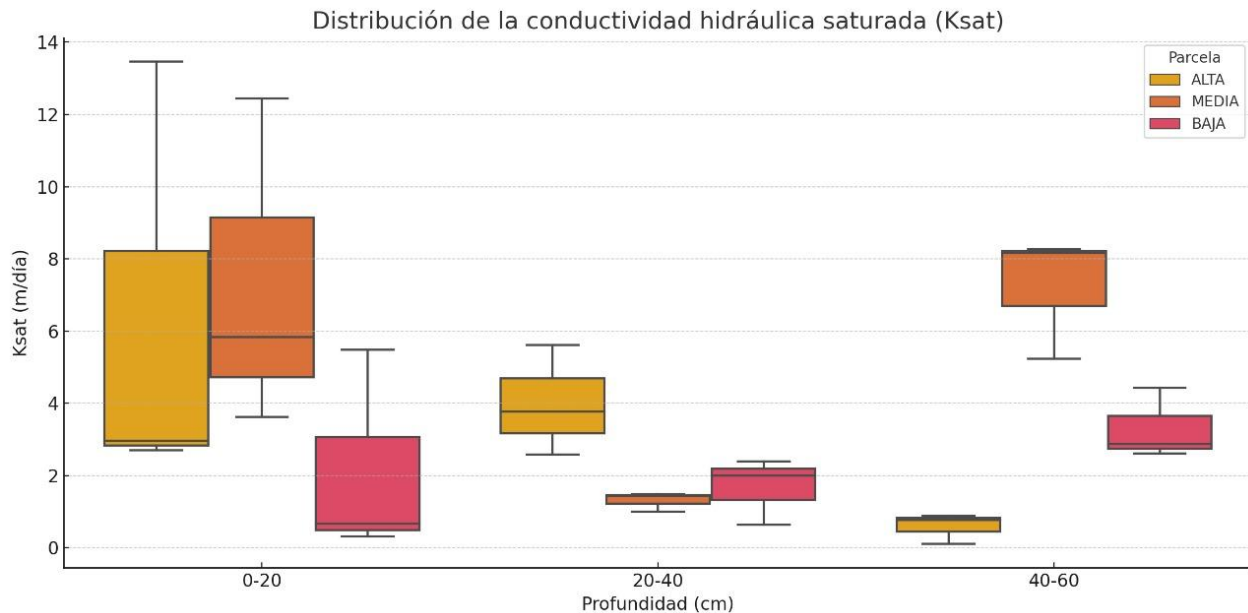
Los resultados revelaron una alta variabilidad en los valores de conductividad hidráulica ( $K_{sat}$ ), particularmente en los primeros 20 cm de profundidad, donde la diferencia entre el promedio y la mediana indicó una distribución asimétrica con posibles valores extremos. Por esta razón, el estudio utilizó la mediana como medida representativa, ya que es más robusta ante datos atípicos y refleja mejor el comportamiento típico en estos casos.

Se identificaron tres patrones distintos según la zona analizada: En la zona alta, la  $K_{sat}$  disminuyó progresivamente con la profundidad, pasando de 2.97 m/día (0-20 cm) a 0.76 m/día (40-60 cm).

La zona media mostró un comportamiento más complejo, con valores altos en superficie (5.83 m/día), una notable reducción en la capa intermedia (1.44 m/día) y un nuevo incremento en profundidad (8.17 m/día), lo que sugiere la presencia de capas con diferente permeabilidad. Por el contrario, en la zona baja se observó una tendencia opuesta a la zona alta, con un aumento progresivo de la  $K_{sat}$  desde 0.66 m/día (0-20 cm) hasta 2.88 m/día (40-60 cm).

Estos resultados se presentaron gráficamente mediante diagrama de caja como se puede ver en la figura 8 en donde se observan las medianas, los valores extremos y la dispersión de los datos para cada zona y profundidad, confirmando las diferencias significativas en el comportamiento hidráulico del suelo según su ubicación y profundidad.

**Figura 8.** gráfica de box-plot, variación de los valores de  $K_{sat}$ , mediana, datos máximos, mínimos y rango intercuartílico (IQR)



Para el análisis de la dispersión de los datos, se utilizó el Rango Intercuartílico (IQR), el cual es una medida de dispersión robusta, con una baja sensibilidad a los valores atípicos en comparación de a la desviación estándar. En la zona alta, la dispersión de los datos (IQR) es mayor en la capa superficial (5.38 m/día) y disminuye considerablemente con la profundidad (0.39 m/día en la capa de 40-60 cm). Esto indica que la  $K_{sat}$  es más variable en la superficie y se vuelve más homogénea a mayor profundidad en esta zona.

Por su parte en la zona media, la dispersión es relativamente alta en la capa superficial (4.41 m/día), muy baja en la capa intermedia (0.24 m/día), y luego aumenta nuevamente en la capa más profunda (1.51 m/día). La baja dispersión en la capa de 20-40 cm coincide con una mediana también baja, sugiriendo una capa bastante uniforme de baja conductividad.

Finalmente, en la zona baja la dispersión es moderada en la capa superficial (2.58 m/día), disminuye en la capa intermedia (0.87 m/día), y se mantiene relativamente similar en la capa más profunda (0.91 m/día). Esto sugiere una variabilidad moderada en todas las profundidades, aunque ligeramente menor en las capas más profundas.

### **2.1.2.1 Análisis de resultados**

Con el objetivo de analizar la variabilidad entre distintas propiedades del suelo medidas por Naranjo (2025) y las obtenidas en este estudio en diferentes zonas y profundidades del páramo de Berlín, en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para cada una de las variables edáficas evaluadas. Se aplicó en Google Colab la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis (Tabla 3). Esta prueba permite comparar si existen diferencias estadísticamente significativas entre grupos independientes, en este caso, las zonas alta, media y baja.

**Tabla 2. Mediana - conductividad hidráulica saturada (Ksat), % arena, % limo y %arcilla, densidad aparente, conductividad eléctrica, porosidad del suelo, humedad gravimétrica y pH.**

Zona	Profundidad (cm)	Muestras Ksat	Mediana Ksat(m/día)	% Arena	%Limo	%Arcilla	Densidad Aparente (g/cm3)	Conductividad Eléctrica	Porosidad del suelo (%)	Humedad gravimétrica del suelo (%)	PH del suelo
<b>Alta</b>	(0 - 20)	Muestra 1	2.9701	57.48%	13.65%	28.88%	1.13	188.91	54%	29%	6.80
	(20 - 40)	Muestra 2	3.7685	56.87%	13.02%	30.12%	1.26	113.98	49%	24%	7.02
	(40 - 60)	Muestra 3	0.7627	50.61%	13.65%	35.76%	1.37	96.56	44%	21%	6.60
<b>Media</b>	(0 - 20)	Muestra 1	5.8343	24.91%	41.46%	33.64%	0.80	299.37	65%	51%	5.87
	(20 - 40)	Muestra 2	1.442	19.16%	36.06%	44.79%	0.80	217.49	66%	52%	5.69
	(40 - 60)	Muestra 3	8.1665	22.46%	42.26%	35.29%	0.77	182.60	67%	46%	5.38
<b>Baja</b>	(0 - 20)	Muestra 1	0.6637	13.82%	52.02%	34.16%	0.78	280.99	66%	59%	5.58
	(20 - 40)	Muestra 2	1.9978	13.53%	49.77%	36.71%	0.72	204.98	70%	63%	5.39
	(40 - 60)	Muestra 3	2.8831	24.62%	31.37%	44.02%	0.86	138.68	65%	51%	4.96

**Nota: Tomado de Naranjo (2025)**

En la tabla 3, la columna ‘H (estadístico)’ corresponde al valor del estadístico de Kruskal-Wallis, que indica la magnitud de la diferencia entre los grupos comparados. El ‘p-valor’ indica la probabilidad de que dichas diferencias hayan ocurrido por azar. Cuando este valor es menor a 0.05, se considera que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos.

Por último, la columna ‘¿Diferencias significativas (p < 0,05)?’ resume si efectivamente se encontraron diferencias significativas para cada variable evaluada. Este análisis proporciona una base para identificar cuáles propiedades del suelo varían significativamente entre zonas, lo cual es clave para entender la dinámica edáfica del ecosistema de estudio.

**Tabla 3. Resultados pruebas no paramétricas datos agrupados (comparación entre zonas). Kruskal-Wallis**

Variable	H (estadístico)	p-valor	Diferencias significativas ( $p < 0.05$ )?
Ksat	2.2222	0.3292	No
Arena	5.9556	0.0509	No
Limo	5.6471	0.0594	No
Arcilla	2.4889	0.2881	No
Densidad	5.4678	0.065	No
CE	3.4667	0.1767	No
Porosidad	5.5141	0.0635	No
Humedad	6.2521	0.0439	Sí
pH	5.9556	0.0509	No

*Nota: Elaborado en Google colab.*

El análisis mostró que solo la humedad gravimétrica presentó diferencias significativas entre zonas ( $p=0.0439$ ), siendo mayor en la zona Baja (59-63%) que en la Media (46-52%) y Alta (21-29%), lo que sugiere mayor retención hídrica en suelos bajos, asociado a su mayor contenido de limo y arcilla (13-24%) versus la zona Alta (50-57% arena).

El pH mostró una tendencia ( $p=0.0509$ ) a ser más alto en la zona Alta (6.6-7.0) que en la Baja (4.96-5.58), posiblemente por diferencias en materiales parentales o drenaje. La conductividad eléctrica ( $p=0.1767$ ) y Ksat ( $p=0.3292$ ) no variaron significativamente entre zonas, indicando alta variabilidad interna o patrones no detectables con la muestra actual.

A continuación, se aplicó un análisis post hoc (prueba de Dunn) para identificar específicamente qué pares de zonas difieren entre sí. El resultado de este análisis se presenta en la tabla 4.

**Tabla 4. Análisis post hoc - Resultados de pares de zonas que diferían específicamente.**

<b>Comparación</b>	<b>Variable destacada</b>	<b>p-valor ajustado</b>
Alta vs Baja	Humedad	0.0405
Alta vs Media	Humedad	0.3479
Baja vs Media	Humedad	1

*Nota: Elaborado en Google colab*

El análisis estadístico no paramétrico mostró que solo la humedad gravimétrica del suelo presentó diferencias significativas entre las zonas Alta, Media y Baja, siendo mayor en la zona Baja. Las demás variables, como densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, porosidad, textura y mediana de Ksat, no variaron significativamente según la prueba de Kruskal-Wallis con post hoc de Dunn.

Posteriormente, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson en Python para evaluar las relaciones lineales entre las propiedades del suelo y la Ksat. Este coeficiente varía entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 o -1 indican una correlación lineal fuerte (positiva o negativa, respectivamente), mientras que un valor cercano a 0 sugiere ausencia de relación lineal. Este análisis complementó los resultados previos, permitiendo entender cómo se relacionan las propiedades del suelo dentro de cada zona con respecto a la Ksat.

En la tabla 5, se presentan los resultados del análisis de correlación de Pearson para la zona alta.

**Tabla 5. Coeficiente de Pearson - Matriz zona alta**

	Ksat	Arena	Limo	Arcilla	Densidad	Conductividad	Porosidad	Humedad	pH
Ksat	1	0.94	-0.71	-0.91	-0.67	0.43	0.71	0.60	0.96
Arena	0.94	1	-0.43	-1.00	-0.88	0.70	0.90	0.83	0.81
Limo	-0.71	-0.43	1	0.35	-0.05	0.34	0.00	0.14	-0.88
Arcilla	-0.91	-1.00	0.35	1	0.92	-0.77	-0.94	-0.88	-0.75
Densidad	-0.67	-0.88	-0.05	0.92	1	-0.96	-1.00	-1.00	-0.43
Conductividad	0.43	0.70	0.34	-0.77	-0.96	1	0.94	0.98	0.15
Porosidad	0.71	0.90	0.00	-0.94	-1.00	0.94	1	0.99	0.48
Humedad	0.60	0.83	0.14	-0.88	-1.00	0.98	0.99	1	0.35
pH	0.96	0.81	-0.88	-0.75	-0.43	0.15	0.48	0.35	1

*Nota: Elaborado en Python*

En esta zona, Ksat mostró una correlación positiva fuerte con el pH del suelo ( $r = 0.9577$ ), aunque no estadísticamente significativa ( $p = 0.1858$ ), lo que sugiere una posible tendencia en la que suelos con mayor pH favorecen una mayor conductividad hidráulica. También se observó una correlación alta con el porcentaje de arena ( $r = 0.9429$ ) y una correlación negativa fuerte con el contenido de arcilla ( $r = -0.9093$ ), lo que indica que suelos con mayor textura arenosa tienden a presentar mayores valores de Ksat, en contraste con suelos más arcillosos.

En la tabla 6, se presentan los resultados del análisis de correlación de Pearson para la zona media.

**Tabla 6. Coeficiente de Pearson - Matriz zona media.**

	Ksat	Arena	Limo	Arcilla	Densidad	Conductividad	Porosidad	Humedad	pH
Ksat	1	0.71	0.97	-0.88	-0.77	-0.12	0.34	0.86	-0.48
Arena	0.71	1	0.85	-0.96	-0.09	0.62	-0.42	-0.24	0.28
Limo	0.97	0.85	1	-0.97	-0.60	0.11	0.12	-0.72	-0.27
Arcilla	-0.88	-0.96	-0.97	1	0.38	-0.36	0.14	0.52	0.01
Densidad	-0.77	-0.09	-0.60	0.38	1	0.73	-0.87	0.99	0.93
Conductividad	-0.12	0.62	0.11	-0.36	0.73	1	-0.97	0.62	0.93
Porosidad	0.34	-0.42	0.12	0.14	-0.87	-0.97	1	-0.78	-0.99
Humedad	-0.86	-0.24	-0.72	0.52	0.99	0.62	-0.78	1	0.86
pH	-0.48	0.28	-0.27	0.01	0.93	0.93	-0.99	0.86	1

*Nota: Elaborado en Python*

En la zona media, la Ksat presentó una correlación positiva muy fuerte con el porcentaje de limo ( $r = 0.9737$ ,  $p = 0.1462$ ), siendo esta la relación más destacada, lo que puede indicar que, en esta zona, un contenido limoso más alto favorece la conductividad hidráulica. Por otro lado, la correlación con la arcilla fue negativa ( $r = -0.8842$ ), y con la humedad también negativa ( $r = -0.8564$ ), lo que sugiere que suelos más arcillosos y húmedos tienden a dificultar el paso del agua.

En la tabla 7, se presentan los resultados del análisis de correlación de Pearson para la zona baja.

**Tabla 7. Coeficiente de Pearson - Matriz zona Baja.**

	Ksat	Arena	Limo	Arcilla	Densidad	Conductividad	Porosidad	Humedad	pH
Ksat	1	0.79	0.86	-0.93	0.47	-1.00	-0.07	0.56	-0.94
Arena	0.79	1	-0.99	0.96	0.91	-0.83	-0.67	-0.95	-0.95
Limo	-0.86	-0.99	1	-0.99	-0.86	0.89	0.58	0.91	0.98
Arcilla	0.93	0.96	-0.99	1	0.77	-0.95	-0.45	-0.83	-1.00
Densidad	0.47	0.91	-0.86	0.77	1	-0.54	-0.91	-0.99	-0.74
Conductividad	-1.00	-0.83	0.89	-0.95	-0.54	1	0.15	0.62	0.97
Porosidad	-0.07	-0.67	0.58	-0.45	-0.91	0.15	1	0.87	0.40
Humedad	-0.56	-0.95	0.91	-0.83	-0.99	0.62	0.87	1	0.80
pH	-0.94	-0.95	0.98	-1.00	-0.74	0.97	0.40	0.80	1

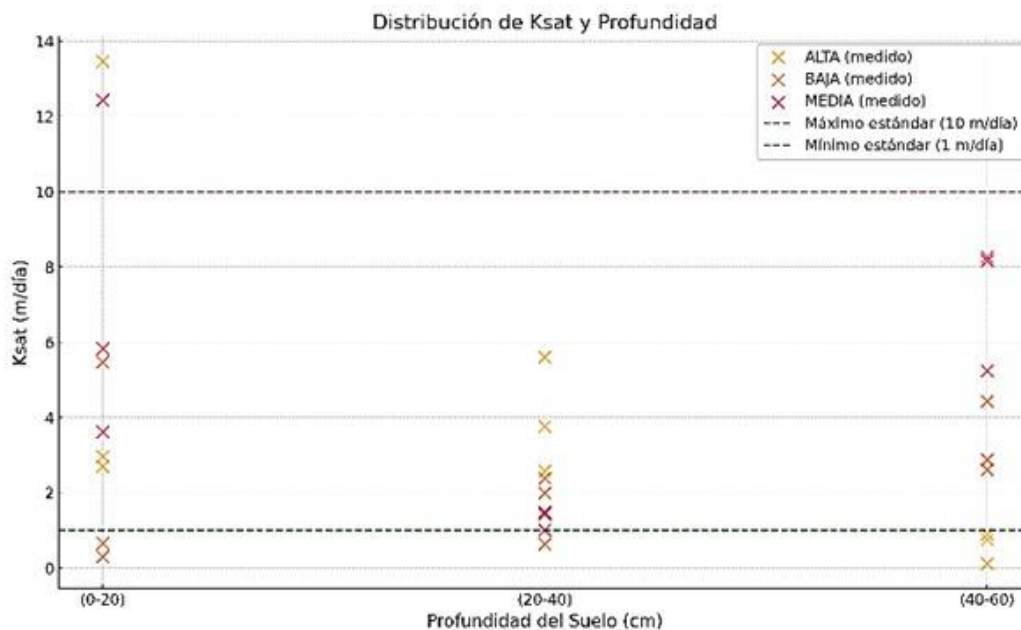
**Nota: Elaborado en Python**

En esta zona, se evidenció una correlación negativa casi perfecta entre Ksat y la conductividad eléctrica ( $r = -0.9970$ ,  $p = 0.0489$ ), siendo esta estadísticamente significativa. Esto indica que a mayor concentración de sales (CE), la conductividad hidráulica tiende a reducirse. También se observó una correlación negativa fuerte con el pH ( $r = -0.9440$ ), y una correlación positiva alta con el contenido de arcilla ( $r = 0.9257$ ), lo que sugiere que, a diferencia de las otras zonas, en la zona baja de la parcela el aumento en el contenido de arcilla podría disminuir la infiltración del agua en el suelo.

**2.1.2.2 Ksat con respecto a valores estándares de cultivo de cebolla en rama**

La Ksat en el cultivo de cebolla en rama es un valor relevante para evaluar la eficiencia en el riego y la gestión del agua, ya que la cebolla de rama es sensible tanto a la escasez como al exceso de agua. Teniendo en cuenta los valores estándares para el cultivo de cebolla de 1 (m/día) – 10 (m/día), se correlacionaron los datos de la distribución de la Ksat por muestra (Tabla 4) y su profundidad. (Figura 9).

**Figura 9. Ksat por muestra (Tabla1), Profundidad del suelo (cm), Maximo y minimo estandar cultivo de cebolla en rama (1-10 m/dia).**



**2.1.2.3 Discusión.**

El análisis de la conductividad hidráulica saturada (Ksat) en tres zonas (Alta, Media, Baja) y tres profundidades (0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm) reveló patrones diferenciados. En la

zona Alta, la mediana de Ksat disminuyó con la profundidad (2.97 m/día en 0–20 cm a 0.76 m/día en 40–60 cm), sugiriendo mayor compactación o cambios en la porosidad del suelo en capas profundas [7].

La capa superficial mostró mayor variabilidad (IQR alto), atribuida a factores como materia orgánica y laboreo, especialmente el "aporque" [8]. La zona Media presentó alta Ksat superficial, seguida de una disminución en 20–40 cm (posiblemente por mayor contenido de arcilla) y un aumento en 40–60 cm, indicando cambios en la estructura del suelo [9].

En la zona Baja, la Ksat aumentó con la profundidad, asociado a acumulación de materiales o mejor estructura para el flujo hídrico, con variabilidad moderada (IQR estable) [10].

La variabilidad (IQR) fue mayor en capas superficiales (zonas Alta y Media), reflejando influencia de factores externos como labranza, mientras que las capas profundas mostraron mayor homogeneidad [11]. Los valores medidos (0.11–13.46 m/día) coincidieron con rangos típicos para suelos arenosos, franco-arenosos y arcillosos, validando los datos [2]. La relación inversa entre Ksat, arcilla y densidad aparente fue consistente con modelos de pedotransferencia [13].

El manejo agrícola (labranza, tránsito de maquinaria) afectó especialmente los primeros 20 cm, donde la Ksat varió significativamente (ej: 2.7–13.5 m/día en zona Alta), mientras que la compactación natural redujo la Ksat en profundidad (aumento del 12% en densidad aparente) [14].

Para el cultivo de cebolla de rama en suelos franco-arcilloso-arenosos, el rango óptimo de  $K_{sat}$  es 1.0–10.0 m/día, asegurando drenaje adecuado y evitando enfermedades radiculares [15]. Al comparar los datos con estos requerimientos, se identificaron zonas con riesgo de anegamiento [16]. Se recomienda evaluaciones repetidas para capturar variaciones estacionales en  $K_{sat}$  [17]. Estos resultados destacan la importancia de considerar profundidad y ubicación en el paisaje para gestionar el movimiento de agua, recarga de acuíferos y riego [12].

Finalmente, se evaluó la aplicabilidad agrícola de los suelos estudiados, comparando los rangos de  $K_{sat}$  con los requerimientos para el cultivo de cebolla [15] identificando zonas con riesgo de anegamiento según reportes previos [16]. Dada la variabilidad temporal observada en las mediciones, se siguió la recomendación de McKeague et al. (1987) de realizar evaluaciones repetidas para capturar fluctuaciones estacionales en la conductividad hidráulica.

El conocimiento de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) resulta útil para el manejo eficiente del agua en sistemas agrícolas. Esta propiedad física del suelo permite diseñar sistemas de riego adecuados a las características específicas de cada terreno, previniendo problemas como encharcamientos o pérdidas por percolación excesiva. Al comprender cómo el agua se mueve a través del perfil del suelo, los agricultores y técnicos pueden optimizar el uso del recurso hídrico, aspecto especialmente relevante en regiones con escasez de agua.

En cuanto a la selección de cultivos, la  $K_{sat}$  proporciona información valiosa para identificar suelos aptos para especies específicas. Como es el caso de los cultivos como la cebolla de rama requieren valores de  $K_{sat}$  entre 1-10 m/día para un desarrollo óptimo. Contar

con estos datos evita pérdidas económicas significativas al garantizar que los cultivos se establezcan en suelos con condiciones hidráulicas adecuadas para sus requerimientos.

En el ámbito de las prácticas agrícolas, la Ksat sirve como indicador clave para determinar necesidades de labranza, detectar problemas de compactación y planificar técnicas de manejo conservacionista. Suelos con valores bajos de Ksat pueden requerir intervenciones como subsolado para mejorar la infiltración, mientras que aquellos con valores altos pueden beneficiarse de prácticas que reduzcan la pérdida de nutrientes.

Desde la perspectiva ambiental, el monitoreo de la Ksat contribuye a proteger los acuíferos subterráneos, reducir la lixiviación de nutrientes y desarrollar estrategias de adaptación al cambio climático. Esta información técnica, basada en las propiedades reales del suelo, permite mejorar simultáneamente la productividad agrícola y la conservación de los recursos naturales, sentando las bases para una agricultura sostenible y adaptada a las condiciones locales específicas.

## **Conclusiones**

- Se evidencian diferencias marcadas en textura, contenido de humedad, y conductividad eléctrica, lo que refleja la heterogeneidad de las propiedades edáficas entre zonas y profundidades, dando como resultado una variabilidad de la Ksat y con implicaciones importantes para la dinámica del agua en el suelo y la planificación del manejo hídrico en las prácticas de riego agrícola en el área de estudio.
- El mayor IQR se obtuvo en la zona alta (0-20), esto puede estar dado por la heterogeneidad del suelo, o que al momento de extraer la muestra no estuviera en las mejores condiciones para la posterior toma del ksat o que al momento de tomar la muestra se había realizado labores de aporque en esta zona.
- El uso del permeámetro de carga constante permitió medir de forma directa y confiable la conductividad hidráulica saturada (Ksat) en campo, mostrando diferencias entre zonas y profundidades del perfil del suelo.
- Intervenciones como enmiendas orgánicas, reducción de compactación al momento de tomar las muestras en campo y manejo adecuado de la salinidad podrían mejorar Ksat en las zonas menos favorables.
- Los valores de Ksat en las capas superficiales de la zona Alta están dentro del rango óptimo (1-10 m/día) para cultivos como la cebolla, mientras que las zonas Media y Baja, y las capas más profundas, presentan limitaciones significativas para el drenaje.

### **Recomendaciones**

- Respecto a la operación del parámetro en el laboratorio, es importante verificar la altura del nivel de agua (hs) antes de realizar cada medición, con el fin de asegurar un flujo constante sobre la superficie saturada. Esta práctica permite un manejo óptimo del permeámetro de carga constante y garantiza la precisión en la determinación de la conductividad hidráulica saturada.
- Incrementar la materia orgánica en las parcelas media y baja mejorará la estructura del suelo y la conectividad de los poros, favoreciendo un aumento de la  $K_{sat}$ . Esto puede lograrse mediante la aplicación regular de compost o residuos agrícolas [18].
- La rotación de cultivos y la reducción de laboreo son estrategias efectivas para mejorar el drenaje, evitar la compactación y mantener niveles adecuados de  $K_{sat}$  [20].
- Dado que el páramo de Berlín es un ecosistema vulnerable, se recomienda estudiar cómo el cambio climático podría afectar la conductividad hidráulica y, por ende, la capacidad de infiltración del agua. Incluir modelos climáticos en futuros estudios podría ayudar a predecir cómo se comportarán los suelos en el futuro bajo diferentes condiciones ambientales.

### Referencias Bibliográficas

[1] Zimmermann, U., & Basile, G. (2006). *Achieving Real-World Saturated Hydraulic Conductivity: Practical and Theoretical Findings from Using an Exponential One-Phase Decay Model*. *Hydrology*.

[2] Dane, J. H., & Topp, G. C. (2002). *Methods of soil analysis. Part 4: Physical methods*. Soil Science Society of America.

[3] López, M. A., & Restrepo, M. E. (2013). *Caracterización de la permeabilidad de suelos en el Páramo de Berlín, Colombia*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 435-446.

[4] Ramírez, J. L., & Vargas, D. A. (2017). *Estudio de los cultivos de cebolla de rama en el Páramo de Berlín: Impacto ambiental y potencial agrícola*. *Revista Colombiana de Agricultura y Agroindustria*, 42(3), 219-229.

[5] Universidad Nacional de Colombia. (2018, 13 de septiembre). *Reconstruyen vegetación milenaria del Páramo de Berlín*. Agencia de Noticias UNAL.  
<https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/reconstruyen-vegetacion-milenaria-del-paramo-de-berlin>

[6] Amoozegar, A. (1989). A compact constant-head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone. *Soil Science Society of America Journal*, 53(5), 1356–1361. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300050009x>

[7] Jarvis, N. (2007). *A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality*. *Vadose Zone Journal*, 6(1), 1–20.

[8] Mohanty, B. P., & van Genuchten, M. T. (2002). *A new model for estimating macroporosity from water retention data*. *Water Resources Research*, 38(7), 1134.

[9] Wang, Y., Ruan, J., Li, Y., Kong, Y., Cao, L., & He, W. (2023). *Soil Macropore and Hydraulic Conductivity Dynamics of Different Land Uses in the Dry–Hot Valley Region of China*. *Water*, 15(17), 3036.

[10] FAO. (n.d.). *Soil Permeability*. In *FAO Training Manual*. Retrieved from [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706e/x6706e09.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706e/x6706e09.htm)  
[FAOHome](#)

[11] Crops and Soils Extension. (n.d.). *The important role of soil texture on water*. Retrieved from [https://cropsandsoils.extension.wisc.edu/articles/the-important-role-of-soil-texture-on-water/Crops and Soils](https://cropsandsoils.extension.wisc.edu/articles/the-important-role-of-soil-texture-on-water/Crops%20and%20Soils)

[12] Bodner, G., Scholl, P., & Kaul, H. P. (2013). *Field quantification of wetting-drying cycles to predict temporal changes of soil pore size distribution*. *Soil and Tillage Research*, 133, 1–9.

[13] [13] Drury, C. F., Tan, C. S., Reynolds, W. D., Zhang, T. Q., & Yang, X. M. (2004). *Influence of crop rotation and aggregate size on carbon dioxide and nitrous oxide emissions*. *Soil Tillage Research*, 79(1), 87-100.

[14] Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics.

*Journal of Hydrology*, 251(3–4), 123–150.

[15] Rivera, L. E. (2012). *Conjunto Tecnológico para la Producción de Cebolla*.

*Estación Experimental Agrícola*. Recuperado de [https://www.uprm.edu/eea/wp-](https://www.uprm.edu/eea/wp-content/uploads/sites/177/2016/04/7.-CEBOLLA-RIEGO-L.-E.-Rivera-con-figura-1-v2012.pdf)

[content/uploads/sites/177/2016/04/7.-CEBOLLA-RIEGO-L.-E.-Rivera-con-figura-1-v2012.pdf](https://www.uprm.edu/eea/wp-content/uploads/sites/177/2016/04/7.-CEBOLLA-RIEGO-L.-E.-Rivera-con-figura-1-v2012.pdf)

[16] Rodríguez Reta, I., Luna Robles, E. O., Aguirre Calderón, C. E., & Béjar Pulido, S.

J. (2024). Evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas de un Vertisol con diferentes usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(84), 105–120.

[17] Lee, S., Wick, T., & Wheeler, M. F. (2016). *Iterative coupling of flow, geomechanics*

*and adaptive phase-field fracture including level-set crack width approaches*. *arXiv preprint arXiv:1610.07120*.

[18] Lal, R. (2004). *Soil carbon sequestration impacts global climate change and food*

*security*. *Science*, 304(5677), 1623–1627.

[19] Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxton, K. E. (1983). *Estimating soil water*

*retention from soil properties*. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(2), 166–171.

[20] López-Bellido, L., López-Bellido, R. J., Castillo, J. E., & López-Bellido, F. J.

(2000). Effects of tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization on wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 92(6), 1054–1063.

[21] **Naranjo Barrios, J. D.** (2024). *Análisis de la gestión del agua para riego de una unidad productiva de cebolla larga (*Allium fistulosum*) bajo las condiciones agroclimáticas del páramo de Berlín (Santander – Colombia)*. Trabajo de grado para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

## Apéndices

A continuación, se presentan los materiales complementarios utilizados durante el desarrollo del presente trabajo de grado, con el fin de fortalecer la transparencia metodológica, la reproducibilidad de los resultados y el soporte técnico de los procedimientos aplicados.

### Apéndice A. Código para análisis estadísticos en Python y Google Colab

Se desarrollaron scripts en Python, ejecutados en la plataforma Google Colab, para realizar los análisis estadísticos no paramétricos de los datos. Estos incluyeron:

- Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson por zonas (alta, media y baja).
- Prueba de Kruskal-Wallis para comparar diferencias en las propiedades edáficas entre zonas.
- Análisis post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni para identificar pares de zonas con diferencias significativas.

Estos códigos fueron fundamentales para establecer relaciones estadísticas entre la Ksat y variables como textura, humedad, densidad aparente y pH del suelo.

### Apéndice B. Hoja de cálculo para la determinación de Ksat

Con el fin de sistematizar el cálculo de la conductividad hidráulica saturada, se elaboró una hoja de cálculo en Excel con las siguientes funcionalidades:

- Cálculo del caudal  $Q = V/t$  para cada ensayo.
- Determinación del gradiente hidráulico y la densidad de flujo.
- Obtención gráfica de la pendiente Ksat a partir de la Ley de Darcy.

Esta hoja permitió automatizar los cálculos de las 27 muestras y comparar fácilmente entre zonas y profundidades.

### **Apéndice C. Documentación del permeámetro de carga constante**

Se diseñó y construyó un permeámetro de carga constante con capacidad para ensayar múltiples muestras simultáneamente. Se documentaron:

- Etapas de ensamblaje del sistema.
- Configuración de carga hidráulica mediante tubos de PVC con orificios regulados.
- Registro fotográfico de la instrumentación usada.

Este diseño permitió la realización eficiente y estandarizada de los ensayos de laboratorio para la medición de la  $K_{sat}$ .

### **Apéndice D. Fotografías del procedimiento experimental**

Se tomaron imágenes de alta resolución que ilustran:

- Saturación previa de las muestras de suelo.
- Configuración de las cargas hidráulicas aplicadas.
- Medición del volumen drenado y tiempos de ensayo.

Estas evidencias visuales respaldan el proceso experimental descrito en el capítulo metodológico del presente documento.

### **Apéndice E. Archivos adjuntos**

Los archivos digitales correspondientes a los códigos en Python, hoja de cálculo, y galería de imágenes han sido entregados como material complementario y podrán consultarse en la base de datos de la Biblioteca UIS bajo el título del presente trabajo.

“Los apéndices están adjuntos y pueden visualizarse en la base de datos de la biblioteca UIS.”