

**Comparación de propiedades hidrofísicas entre un suelo bajo vegetación natural y un suelo bajo cultivos. Caso de estudio páramo de Berlín (Santander)**

**Juan Andrés Díaz Velásquez, Carlos Andrés Moncada Carreño**

**Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Isabel Cristina Domínguez Rivera**

**PhD in Agriculture, Food and Rural Development**

**Codirector**

**Sebastián Elías Patiño Gutiérrez**

**Ingeniero Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**2020**

### **Agradecimientos**

Agradecemos a la directora del proyecto Isabel Cristina Domínguez Rivera, PhD, al codirector Sebastián Elías Patiño Gutiérrez, ing. Civil, por haber sido una guía y por el acompañamiento a lo largo del proyecto; al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) por asumir los costos y brindarnos los equipos necesario para un óptimo desarrollo en la ejecución del plan y a las personas del páramo de Berlín por su amabilidad a la hora de recibirnos en sus fincas.

### **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo de investigación primeramente a Dios por darnos la sabiduría y permitirnos finalizar satisfactoriamente este proyecto.

Yo Juan Andrés Díaz dedico la presente investigación a mis padres Eduardo Díaz y Clara Velásquez; a mis padrinos Julio Neira y Margarita Díaz; a mis segundos padres Jaime Sánchez y Romelia Rangel; a mi hermano Fabián Díaz; a mi abuela Gladys Pérez de Sánchez; y a mis compañeros de estudio. Por haber sido un apoyo incondicional a lo largo de este camino universitario y ser fundamentales en la obtención de mi título profesional.

Yo Carlos Andrés Moncada Carreño dedico la presente investigación a mis padres José y Estela; a mi hermana Zulay; a mi hija Mariana que adoro con el corazón; a mi amigo y compañero de proyecto Juan Díaz; a mis tíos Ángela, Rosa, Isaí, Janeth, Flor Alba, Ana Gilma, Hernando, Luis Ángel y demás familiares, por haber sido mí soporte a lo largo de este camino y por ser la inspiración en la obtención de mi título profesional.

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General.....	16
1.2. Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico .....	17
2.1. Ecosistema de Páramo .....	17
2.2. Páramo de Berlín.....	17
2.3. Características de Páramo .....	18
2.3.1. Clima.....	18
2.3.2. Suelo y vegetación.....	19
2.4. Propiedades Hidrofísicas .....	21
2.4.1. Contenido de humedad.....	21
2.4.2. Cantidad de materia orgánica.....	21
2.4.3. p.H.....	22
2.4.4. Conductividad hidráulica saturada.....	22
2.5. Alteraciones en el suelo debido a factores agropecuarios .....	22
3. Metodología .....	23
3.1. Fase 1: Reconocimiento del Área de Estudio .....	24
3.2. Fase 2: Diseño de Muestreo.....	24
3.2.1. Humedad.....	25
3.2.2. Cantidad de materia orgánica.....	26
3.2.3. p.H.....	27
3.2.4. Conductividad hidráulica.....	28

3.2.5. Porosidad.....	29
3.3. Fase 3: Análisis Estadístico .....	30
4. Resultados.....	31
4.1. Selección de la Microcuenca .....	31
4.2. Ubicación y Clasificación de las Coberturas .....	32
4.3. Geolocalización de los puntos de muestreo .....	33
4.4. Análisis de las Propiedades Hidrofísicas del Suelo .....	34
4.4.1. Humedad.....	34
4.4.2. Contenido de materia orgánica. ....	35
4.4.3. Potencial de hidrogeniones (pH).....	37
4.4.4. Porosidad.....	38
4.4.5. Conductividad hidráulica saturada.....	39
4.4.6. Relación de las propiedades hidrofísicas. ....	41
5. Conclusiones.....	42
6. Recomendaciones .....	43
Referencias bibliográficas .....	44
Apéndices .....	47

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades hidrofísicas analizadas en la investigación.....	25
Tabla 2. Características físicas principales y usos dominantes de las UH.....	31
Tabla 3. Resumen estadístico de humedad. ....	35
Tabla 4. Resumen estadístico del contenido de materia orgánica. ....	37
Tabla 5. Resumen estadístico del pH.....	38
Tabla 6. Resumen estadístico de porosidad. ....	39
Tabla 7. Datos de conductividad hidráulica obtenidos en laboratorio.....	40

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Clima del Páramo de Berlín (a). Nieve en el Páramo de Berlín (b). ....	19
<i>Figura 2.</i> Frailejón Páramo de Berlín. ....	20
<i>Figura 3.</i> Cultivo de cebolla junca Páramo de Berlín. ....	23
<i>Figura 4.</i> Muestras de suelo en anillos de pared delgada listas para llevar al horno (a). Muestra de suelo masada en la balanza digital (b). ....	26
<i>Figura 5.</i> Crisoles pesados junto con el espécimen en balanza digital de alta precisión (a) y muestras contenidas dentro de la mufla (b). ....	27
<i>Figura 6.</i> Preparación de las muestras para el ensayo de pH (a). Muestra analizada en el potenciómetro (b). ....	28
<i>Figura 7.</i> Muestra saturada con agua destilada y tensiómetros calibrados ubicados sobre la unidad (a). Verificación de las presiones en el cono de la unidad del Hyprop 2 (b). ....	29
<i>Figura 8.</i> Medición de la temperatura de la lechada en el picnómetro. ....	30
<i>Figura 9.</i> Esquema general de usos de suelos. ....	32
<i>Figura 10.</i> Clasificación y distribución espacial de los puntos de muestreo. ....	33

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Resumen de coberturas encontradas.....	47
Apéndice B. Estadística descriptiva del promedio de humedad.....	50
Apéndice C. Estadística descriptiva del promedio de materia orgánica.....	51
Apéndice D. Estadística descriptiva del promedio de pH.....	52
Apéndice E. Estadística descriptiva del promedio de porosidad.....	53
Apéndice F. Datos de conductividad hidráulica obtenidos en laboratorio.....	54

## Resumen

**Título:**

COMPARACIÓN DE PROPIEDADES HIDROFÍSICAS ENTRE UN SUELO BAJO VEGETACIÓN NATURAL Y UN SUELO BAJO CULTIVOS. CASO DE ESTUDIO PÁRAMO DE BERLÍN (SANTANDER)\*

**Autores:**

Juan Andrés Díaz Velásquez, Carlos Andrés Moncada Carreño\*\*

**Palabras clave:**

Páramo, propiedades hidrofísicas, humedad, materia orgánica, pH, porosidad, conductividad hidráulica, cultivos.

**Descripción:**

Esta investigación se realizó en el páramo de Berlín (Santander), donde se encuentran presentes sistemas de producción que incluyen cultivos de papa y cebolla, los cuales afectan significativamente la regulación hidrológica del suelo. Por consiguiente, la presente investigación, busca estudiar la influencia de las actividades agrícolas sobre las principales propiedades hidrofísicas del suelo (humedad, materia orgánica, pH, porosidad y conductividad hidráulica). Para cumplir con este objetivo, el proyecto se organizó en tres fases, la primera fase consistió en el reconocimiento en campo del área de estudio, en el cual se ubicaron las dos unidades hidrográficas (UH); la segunda fase se realizó de forma paralela, donde se identificaron las coberturas en que se dividen estas UH y se establecieron las zonas de muestreo; en la última fase fueron llevados las muestras obtenidas en campo al laboratorio y procesados para cuantificar las propiedades hidrofísicas. Finalmente, se analizaron los datos con estadística descriptiva, ANOVA y prueba de rango múltiple (Tukey). Se realizaron seis salidas de campo, en los meses de septiembre a diciembre del año 2019 y se extrajeron 216 muestras de suelo para comparar la UH intervenida con la UH no intervenida. Se encontró que en las zonas de estudio las actividades agrícolas afectan las propiedades hidrofísicas del suelo, generando disminuciones en la humedad y materia orgánica del 16.0% y 9.6% respectivamente al comparar la UH intervenida y la UH no intervenida en la zona nativa de baja pendiente. Además, se encontraron variaciones en el pH llegando a una diferencia de 2 unidades cuando se compara la UH intervenida en el área con cultivo de cebolla y la UH no intervenida en la zona con arbustos densos.

---

\* Tesis de Ingeniería

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora Isabel Cristina Domínguez Rivera Doctora en Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural. Codirector Sebastián Elías Patiño Ingeniero Civil.

**Abstract****Title:**

COMPARISON OF HYDROPHYSICAL PROPERTIES BETWEEN A SOIL UNDER NATURAL VEGETATION AND A SOIL UNDER CULTIVATION. CASE STUDY PÁRAMO DE BERLÍN (SANTANDER)\*

**Authors:**

Juan Andrés Díaz Velásquez, Carlos Andrés Moncada Carreño\*\*

**Key words:**

Paramo, hydrophysical properties, humidity, organic matter, pH, porosity, hydraulic conductivity, crops.

**Description:**

This research was carried out in the Berlín paramo (Santander), where production systems that include potato and onion monocultures are present, which cause the destruction of natural vegetation, increased erosion, and decreased moisture holding capacity, thus affecting hydrological regulation of soils. Therefore, the present investigation seeks to study the influence of agricultural activities on the main hydrophysical properties of the soil (humidity, organic matter, pH, porosity and hydraulic conductivity). To fulfill this objective, the project was organized in three phases, the first phase consisted on a field survey of the study area, in which two hydrographic units (UH) were located. The second phase was carried out in parallel, and sampling areas were selected according to land uses within the UH. In the last phase, the sample obtained in the field were taken to the laboratory and processed to quantify the hydrophysical properties of soils. Finally, data were analyzed with descriptive statistics, ANOVA and multiple range test (Tukey). A total of six field trips were conducted from September to December 2019, and 216 soil sample were extracted to compare the intervened UH with the non-intervened UH. The results show that in the study area, the hydrophysical properties of soil are being affected by agriculture, which decreases humidity and organic matter on 16.0% and 9.6% respectively, when comparing intervened UH with the non-intervened UH in the native area of low slope. In addition, the pH had a difference of 2 units when comparing the intervened UH in the area whit onion and the non-intervened UH in the area of dense bushes.

---

\* Engineering Thesis

\*\* Faculty of Physic-mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director Isabel Cristina Domínguez Rivera PhD in Agriculture, Food and Rural Development. Co-director Sebastián Elías Patiño Civil Engineer.

## Introducción

Los páramos son ecosistemas de gran riqueza natural y equilibrio ambiental, esenciales para el bienestar de las personas. Los páramos son clave en la regulación del ciclo hídrico porque es allí donde nacen las principales fuentes fluviales, las cuales abastecen a gran parte de las poblaciones de los asentamientos rurales y centros urbanos de la cordillera Andina. Además, almacenan y capturan carbono atmosférico, que contribuye en la regulación del clima regional, son hábitat de especies polinizadoras y dispersoras de semillas, entre otros beneficios ambientales (Restrepo et al., 2008).

El suelo es uno de los componentes más trascendentes de los páramos, en este ocurren transformaciones de su estructura y propiedades, resultado de la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos (Morales et al., 2007); procesos expresados en la capacidad de almacenamiento de agua gracias a sus características biofísicas y ecosistémicas que, en conjunto con el clima y la topografía, mantienen un flujo sostenible de las corrientes hídricas, que nacen y descienden del ecosistema hacia las áreas medias y bajas (Arango et al., 2001).

A pesar de ser reguladores del ciclo hídrico, climático y captador de carbono orgánico, los páramos enfrentan serias amenazas. El aumento de las actividades agrícolas y pecuarias, afectan las propiedades naturales del suelo, la disminución de la capacidad de retención de humedad, calidad del agua superficial, así como el incremento en la meteorización de la materia orgánica y la pérdida de nutrientes, son algunas de sus consecuencias. Todas estas alteraciones generan un déficit en el potencial hídrico de los páramos (CMP, 2002).

En Colombia existen grandes variedades de sistemas de producción en páramo que incluyen monocultivos de papa o cebolla, ubicados principalmente en la cordillera Oriental, que abastecen a una gran parte de la población colombiana (Díaz & Navarrete, 2005). Por lo tanto, el presente

estudio busca analizar la influencia de las actividades agrícolas sobre las principales propiedades hidrofísicas del suelo (humedad, materia orgánica, pH, conductividad hidráulica y porosidad) en el páramo de Berlín (Santander).

La zona de estudio está ubicada dentro del Distrito de Manejo Integrado DMI Páramo de Berlín, que hace parte de un complejo de parques naturales bajo la jurisdicción conjunta de las corporaciones autónomas regionales CDMB y CORPONOR (Restrepo et al., 2008), que conservan y preservan la invaluable biodiversidad del páramo mediante declaratorias que regulan la expansión significativa de las actividades agrícolas y pecuarias.

La unidad hidrográfica (UH) de análisis para el proyecto, se definió bajo estudios previos del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander. Este grupo está a cargo de un proyecto multidisciplinario titulado “Análisis participativo de la influencia del uso del suelo en los servicios hidrológicos de suministro y regulación ofertados por el ecosistema de páramo seco. Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander-Colombia)”, donde una de sus áreas de enfoque, es el suelo de páramo. El presente trabajo busca contribuir a ampliar este conocimiento, investigando acerca de los cambios de las propiedades hidrofísicas en el suelo y cuantificando los efectos de las actividades humanas sobre estas propiedades en el ecosistema de páramo.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Evaluar el efecto del cambio de cobertura en las principales propiedades hidrofísicas del suelo en ecosistema de páramo. Caso de estudio: Páramo de Berlín (Santander)

### **1.2. Objetivos Específicos**

Cuantificar las principales propiedades hidrofísicas del suelo de páramo (humedad, materia orgánica, pH, conductividad hidráulica y porosidad), bajo diferentes coberturas de suelo.

Analizar el efecto del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en el páramo de Berlín (Santander) en época de lluvia de septiembre a diciembre, empleando estadística descriptiva y análisis gráfico.

## **2. Marco Teórico**

La revisión de la literatura necesaria para desarrollar el proyecto de investigación se muestra a continuación.

### **2.1. Ecosistema de Páramo**

Desde hace cinco millones de años, con el levantamiento final de la cordillera de los Andes, se dio inicio al proceso para la creación definitiva de los bosques andinos y, en la parte superior de éstos, se formaron los ecosistemas de páramo, por encima de los 3,000 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Morales et al., 2007). El páramo, presenta unas condiciones del clima, flora y suelo característicos y tiene presencia en el norte de los Andes, desde el norte de Perú hasta Ecuador, Colombia y Venezuela, y aisladamente en Panamá y Costa Rica (Morales et al., 2007). En Colombia el área aproximada de páramo es de 1'932,987 hectáreas, que es equivalente al 1.7% del territorio nacional (Morales et al., 2007). Los departamentos colombianos con mayor representatividad de páramo son: Boyacá (18.3%), Cundinamarca (13.3%), Santander (9.4%), Cúcuta (8.1%), Tolima (7.9%) y Nariño (7.5%) (Arango et al., 2001).

### **2.2. Páramo de Berlín**

Con una extensión de 44,272 hectáreas, está ubicado al norte de la cordillera oriental de Colombia, en la unidad biogeográfica de Santurbán. Comprende los departamentos de Santander (33.6% municipio de Tona) y Norte de Santander (66.4% municipios de Silos y Mutiscua). La altura mínima es de 2,800 msnm y la máxima de 4,100 msnm. Este páramo posee una invaluable riqueza florística, faunística y paisajística, que aunada con el potencial hídrico lo convierte en un territorio estratégico, como oferente de servicios ambientales (Restrepo et al., 2008).

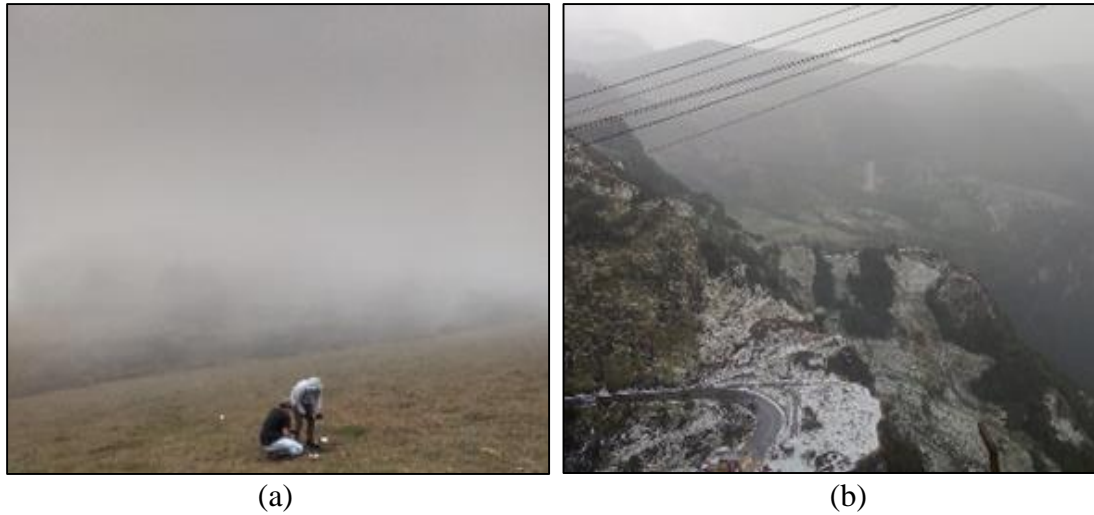
Este páramo se caracteriza por tener una precipitación anual de 717.42 mm/año, que lo cataloga como páramo seco, ya que se encuentra en el rango entre 623.5 mm/año y 1,196.5 mm/año, de acuerdo a lo descrito por Rangel (2009), quien con base en datos de estaciones meteorológicas propuso los rangos de clasificación. El régimen de precipitación es considerado bimodal, con periodos de alta precipitación entre los meses de marzo-mayo y septiembre-noviembre. En los meses de diciembre-febrero y junio-agosto, se presentan precipitaciones menores, es decir, periodos muy secos con alta radiación solar (CMP, 2002).

### **2.3. Características de Páramo**

Los páramos se caracterizan por tener unas condiciones particulares tales como:

**2.3.1. Clima.** El clima de las altas montañas tropicales es húmedo y se caracteriza por el rocío, la constante niebla y las lloviznas frecuentes. Debido a las bajas temperaturas y la alta nubosidad, la evapotranspiración es reducida, generando un alto rendimiento hídrico característico de este ecosistema. Los páramos presentan condiciones ambientales extremas debido a su baja temperatura media diaria, alto promedio diario de humedad relativa, baja presión atmosférica, escasa densidad del aire, alta radiación solar y cambios intradiurnos bruscos de temperatura (Díaz & Navarrete, 2005).

La precipitación total anual oscila entre 600mm (en los páramos secos) y más de 4000mm (en los páramos húmedos) (Llambí et al., 2012).



*Figura 1.* Clima del Páramo de Berlín (a). Nieve en el Páramo de Berlín (b).  
*Fuente:* Reportaje Periódico El tiempo por (Delgado, 2019).

**2.3.2. Suelo y vegetación.** Los suelos de páramo son, por lo general, de origen volcánico y se caracterizan por ser húmedos y ácidos, con pH entre 3.9 y 5.4 (Guhl, 1963). El suelo paramuno es rico en humus bien descompuesto, enmohecido y de color pardo oscuro o negro; con un espesor que varía entre algunos centímetros y un metro (CAR, 1988). En el páramo, la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo a tasas muy bajas, debido a las bajas temperaturas y a la alta humedad (Hofstede et al.,2014). La infiltración es generalmente alta debido a la presencia de suelos típicamente porosos relacionados con altos valores de conductividad hidráulica. La retención de agua es especialmente significativa, dado que en los primeros 30 cm de profundidad el agua ocupa el 61.7% del volumen total del suelo (CAR, 1988). Así, los suelos de páramo se caracterizan por tener altos valores de porosidad y conductividad hidráulica (Díaz & Navarrete, 2005).

La vegetación en el páramo ha desarrollado características fisiológicas para adaptarse y sobrevivir a las extremas condiciones del clima, topografía y suelo. Algunas de estas características son la formación de rosetas que sirven de defensa contra el viento y frío, la enanificación arbustiva,

el desarrollo de hojas cariáceas que reduce la pérdida de agua por transpiración, la formación de cubiertas de pelos en las hojas para captar el agua de lluvia o de rocío, la permanencia de hojas muertas sobre los tallos (mantienen la temperatura, atrapa residuos orgánicos, almacena agua); la formación de macollas (trampa de materia orgánica y de humedad) y la agrupación de varias plantas pequeñas en cojines, entre otros (CAR, 1988).



*Figura 2.* Frailejón Páramo de Berlín.

*Fuente:* Adaptado Patiño (2019).

La vegetación es uno de los principales factores en la formación de los suelos, a través de la descomposición de materia orgánica. El proceso de descomposición es restringido debido a la baja temperatura que aletargan la actividad microbial, sumado a la alta concentración de aluminio volcánico y la materia orgánica que se combinan y forman vesículas muy resistentes a la descomposición por la edofauna. Por esta razón, los procesos de formación de humus y la mineralización de los restos orgánicos ocurren de forma lenta y esto hace que la materia orgánica tienda a acumularse y se formen horizontes superficiales espesos de color negro o de tonos muy oscuros (Hofstede et al.,2014).

La conjunción del clima de páramo y las características de vegetación y suelos hace que los hidrosistemas de páramo constituyan unos reguladores naturales de la escorrentía (Arango et al., 2001).

#### **2.4. Propiedades Hidrofísicas**

La condición física de un suelo determina propiedades como la aireación, capacidad de soporte vegetal, capacidad de drenaje, capacidad de almacenamiento de agua, entre otras. El estudio de estas condiciones físicas permite establecer la capacidad y la influencia de los sistemas de producción agrícolas sobre el suelo (Ramirez & Varón, 2016).

La cantidad de carbono orgánico está alrededor de 0.1g/g en sitios húmedos (>900 mm/año) y en regiones más secas alrededor de 0.07 g/g (<600 mm/año). La densidad aparente seca está fuertemente correlacionada con el contenido de carbón orgánico; puede tener valores tan bajos como 150 Kg/m<sup>3</sup> en condiciones humedad y en suelos meteorizados hasta cerca de 900 Kg/m<sup>3</sup> en suelos jóvenes y regiones secas (Buytaert et al., 2014).

Las propiedades hidrofísicas de estudio en esta investigación son las siguientes:

**2.4.1. Contenido de humedad.** Es la proporción de la masa de agua con respecto a la masa de la muestra de suelo seco después de que ha sido secada a un peso constante (Chocobar et al., 2013).

**2.4.2. Cantidad de materia orgánica.** La descomposición de residuos de plantas y animales es asimilada por el suelo. El carbono es incorporado dentro de la biomasa del suelo se mantiene a un nivel estable propio de las condiciones ambientales (Silva, 2016).

**2.4.3. pH.** Es una de las propiedades más importantes en los suelos ya que determinan su solubilidad y actividad de los microorganismos, los cuales mineralizan la materia orgánica. También representa el grado de acidez o basicidad en base a la concentración de iones de hidrógeno (Ramírez, 1997).

**2.4.4. Conductividad hidráulica saturada.** Describe la funcionalidad del sistema poroso, englobando propiedades como, cantidad, tamaño, morfología, continuidad y orientación de los poros (Ellies et al., 1997). Esta propiedad controla la infiltración y la escorrentía superficial del suelo y, por lo tanto, se puede inferir sobre el flujo de agua a través del suelo (Rojas et al., 2008).

## **2.5. Alteraciones en el suelo debido a factores agropecuarios**

Los cultivos en el páramo causan el mayor impacto en el suelo. Desde la preparación del terreno, se elimina toda la vegetación y se voltea el suelo, éste se seca superficialmente y los nutrientes se liberan. En el primer año de cultivo, los rendimientos son relativamente altos dado que el cultivo utiliza las reservas de fósforo. De otra parte, los cultivos no pueden proteger el suelo de la erosión hídrica y eólica como lo hacen las vegetaciones nativas de páramo (Hofstede, 2001).

La disparidad de valores del contenido de materia orgánica en el suelo se puede relacionar con las actividades propias de la agricultura, como el empleo de fertilizantes y de pesticidas. La actividad pecuaria afecta la capacidad de retención de agua en el suelo ya que se ve afectada por el pisoteo constante del ganado, compactándolo y quitándole espacio poroso para acumular el agua. La pérdida de agua modifica el espacio de vacíos y el suelo pierde su capacidad de infiltración, dificultando el flujo de agua y la toma de nutrientes de las plantas (Estupiñán et al., 2009).



*Figura 3.* Cultivo de cebolla junca Páramo de Berlín.

Investigaciones han demostrado la influencia de actividades antrópicas en las propiedades hidrofísicas del suelo. Por ejemplo, (Daza et al., 2014) en su estudio en el páramo de Sumapaz-Colombia, comparó la zona entre un suelo nativo y un cultivo de papa y encontró que el pH aumenta un 0.5 unidades y la humedad disminuye el 39%.

### **3. Metodología**

La presente investigación se desarrolló en tres fases. La primera relacionada con el reconocimiento del área de estudio y la identificación de las zonas de muestreo, la segunda relacionada con el diseño del muestreo y los ensayos de laboratorio y la tercera vinculada con el análisis de las propiedades cuantificadas en la segunda fase. La descripción en detalle se da a continuación.

### **3.1. Fase 1: Reconocimiento del Área de Estudio**

En la primera fase se realizó el reconocimiento en campo de la zona de estudio ubicada en el páramo de Berlín (Santander). La selección del área de estudio fue realizada en el proyecto de investigación de Godoy & Medina (2019). En este trabajo fueron clasificadas 10 zonas dentro de las dos Unidades Hidrográficas diferenciadas principalmente por el tipo de cobertura, pendiente, e intervención antrópica.

Para el reconocimiento del área de estudio se realizó el recorrido caminando, iniciando desde la parte alta de las unidades hidrográficas de forma que se identificaran los puntos de acceso, las intervenciones antrópicas, fuentes hídricas, los usos del suelo y las zonas de muestreo. Finalmente, se llegó a la parte baja de las UH zona donde se encuentran los cultivos y la casa de los propietarios de los terrenos, allí se propuso la ruta para la extracción de los muestras de suelo.

### **3.2. Fase 2: Diseño de Muestreo**

El muestreo se basó en un diseño probabilístico aleatorio estratificado en profundidad por un periodo de cuatro meses de septiembre-diciembre en el año 2019, con una frecuencia de monitoreo de tres semanas (21 días) de acuerdo con el modelo propuesto por Patiño (2019). Este método consiste en elegir puntos de muestreo aleatoriamente sobre cada zona, en los cuales se extraen muestras de suelo sobre los mismos estratos o profundidades de manera que sean comparables (Otzen & Manterola, 2017).

Las variables que se estudiaron se muestran en la Tabla 1, donde también se especifica la norma seguida para su cuantificación. La profundidad del muestreo se realizó a estratos de 0-5cm, 10-15cm y 20-25cm.

Tabla 1.  
*Propiedades hidrofísicas analizadas en la investigación.*

Variables	Norma
Humedad	ASTM D2216-10 (ASTM, 2010)
Materia Orgánica	ASTM D2974-00 (ASTM, 2002)
pH	ASTM D4972-01 (ASTM, 2001)
Conductividad Hidráulica	ASTM F1815-11 (ASTM, 2018)
Porosidad	ASTM D0854-14 (ASTM, 2014)

En campo se realizó la capacitación en el uso de los equipos para la extracción de muestras de suelo, de igual forma, en el laboratorio de hidráulica de la UIS, se recibieron indicaciones para el correcto uso de los materiales y equipos.

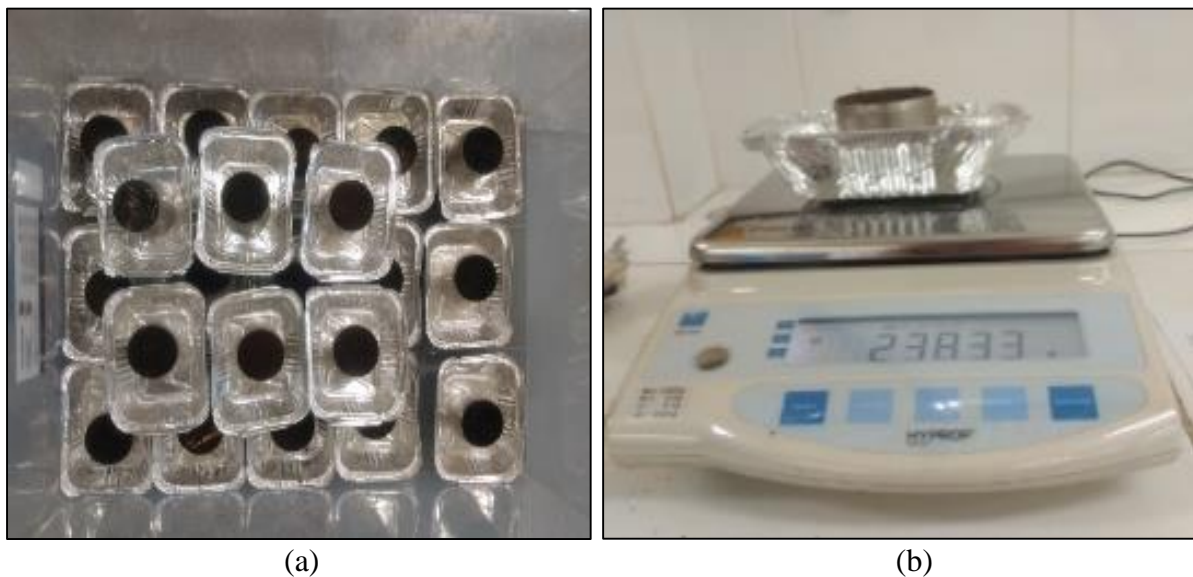
Las muestras recolectadas en campaña fueron preservadas y transportadas de acuerdo a las especificaciones de la norma NTC 4113-1(1997), con el fin de no modificar sus propiedades físicas. Dichas muestras se llevaron al laboratorio de investigación del GPH donde fueron conservadas y refrigeradas (5-10 °C).

A continuación, se presenta una breve descripción de los ensayos realizados en laboratorio.

**3.2.1. Humedad.** Las muestras fueron preparados para el ensayo de humedad siguiendo la norma ASTM D2216-10 (ASTM, 2010). Este ensayo consiste en registrar las masas del contenedor limpio y seco junto con su respectiva muestra húmeda, para esto a cada muestra contenida en anillo de pared delgada, fue acendrada y rematada en sus bordes para completar el volumen exacto dentro del anillo, se colocaron dentro de una tara, de la cual se conoce su masa.

Posteriormente se lleva al horno por un periodo de 24 horas a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  y se verificó que la diferencia en pérdida de masa fue inferior al 1% (ver Figura 4).

Transcurrido el tiempo de secado, la muestra se ensayó a la mayor brevedad posible, ya que no se contó con un desecador para el reposo al vacío de los especímenes. Dicho proceso se debe realizar con el fin de evitar que los agentes externos como humedad o polvo puedan alterar las mediciones. Por esta razón, transcurridos 3 minutos a la salida del horno se registró la masa del anillo con la muestra seca. Por último, el contenido de humedad fue cuantificado debido a la evaporación del agua contenida en el suelo por el aumento de la temperatura.



*Figura 4.* Muestras de suelo en anillos de pared delgada listas para llevar al horno (a). Muestra de suelo masada en la balanza digital (b).

**3.2.2. Cantidad de materia orgánica.** Este ensayo se realizó según la norma ASTM D2974 (ASTM, 2002), para determinar el porcentaje de materia orgánica presente en cada muestra, usando el método de ignición.

Este ensayo consistió en agregar una muestra de suelo entre 5-10 g en un crisol previamente pesado, se registró su cuantía con una precisión de 0.001g (ver *Figura 5 (a)*). Posteriormente, se colocaron las muestras en una mufla a una temperatura de  $360 \pm 10^{\circ}\text{C}$  por un periodo de 2 horas

(ver *Figura 5* (b)). Seguidamente, se extrajeron los crisoles con las medidas de precaución necesarias e inmediatamente se registró el peso de las cenizas.



*Figura 5.* Crisoles pesados junto con el espécimen en balanza digital de alta precisión (a) y muestras contenidas dentro de la mufla (b).

**3.2.3. pH.** El ensayo de pH se realizó siguiendo la norma ASTM D4972-01 (ASTM, 2001) para determinar el índice de alcalinidad o acidez de las muestras, las cuales previamente pasaron por un proceso de secado y cernido (tamiz No. 10; 2mm).

Se depositaron entre 10-15 g de cada muestra en vasos de precipitado previamente tarados, estos fueron complementados con una dosificación de agua destilada equivalente a tres partes de la muestra (ver *Figura 6* (a)), esta se homogeneizó mezclando y agitando durante aproximadamente 20 minutos, se dejó reposar por 1 hora las muestras a temperatura ambiente. Paralelamente, se realizó la calibración del equipo (potenciómetro) con los buffers técnicos 4.01 y 7.00, considerando que el pH para estos suelos oscila entre estos valores. Finalmente, se introdujo el electrodo dentro

de la suspensión y se registró el valor de pH (ver Figura 6 (b)), luego se hizo limpieza de los instrumentos usados con agua destilada para evitar contaminación cruzada.



*Figura 6.* Preparación de las muestras para el ensayo de pH (a). Muestra analizada en el potenciómetro (b).

**3.2.4. Conductividad hidráulica.** La conductividad hidráulica de cada zona es analizada bajo modelos proporcionados por el sistema Hyprop 2 (Meter Group, 2015), el cual genera las curvas de retención de humedad y determina la conductividad hidráulica del suelo.

Este sistema está compuesto por dos tensiómetros de distinta longitud, transductores de presión y una balanza de precisión. El ensayo se inicia después de calibrar todo el sistema y de realizar la saturación de la muestra (ver Figura 7), de manera que esta vaya perdiendo agua debido a la evaporación en el tiempo.

En el proceso los tensiómetros miden variación de la succión en el suelo en función de dicha evaporación, en tanto que la balanza va midiendo la variación de la masa muestral. El programa puede tardar en este proceso entre una y dos semanas. Todo concluye cuando ya no hay presiones hidrostáticas en la masa de suelo.

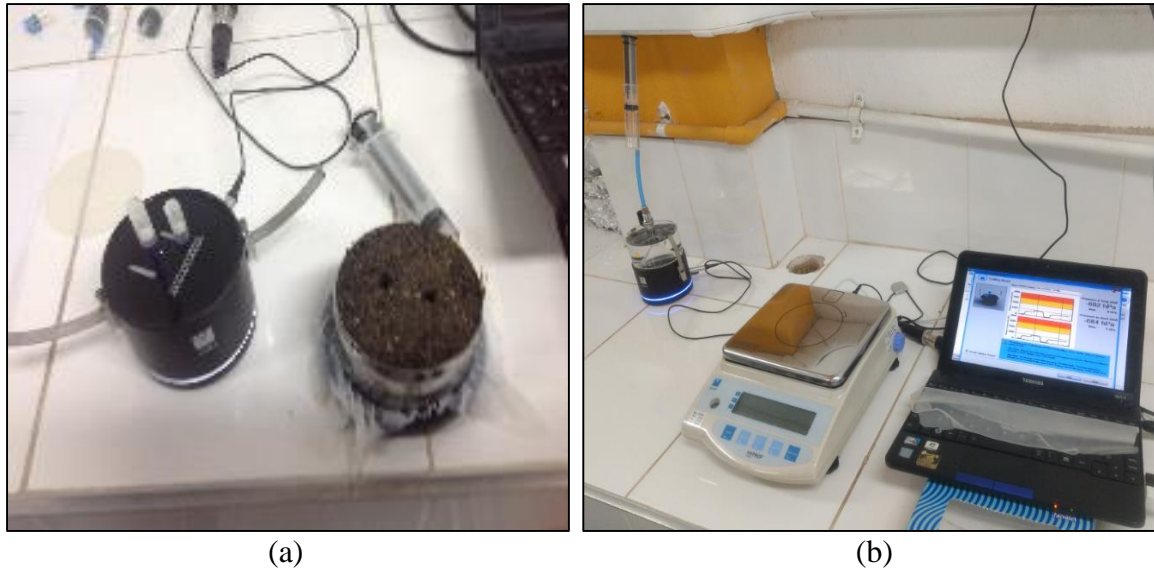


Figura 7. Muestra saturada con agua destilada y tensiómetros calibrados ubicados sobre la unidad (a). Verificación de las presiones en el cono de la unidad del Hyprop 2 (b).

**3.2.5. Porosidad.** Para el cálculo de la porosidad de las muestras se requiere de la densidad aparente y de la densidad real, para los cuales se realizaron dos ensayos de densidad.

-Para la determinación de la densidad aparente seca se partió de los datos del ensayo de humedad ASTM D7263-09 (ASTM, 2009), del cual se extrajo la información de las masas de los anillos con sus respectivos especímenes y el contenido de humedad para cada una de las muestras.

-Por otra parte, el procedimiento para determinar la densidad real que se describe en la norma ASTM D854-14 (ASTM, 2014), consistió en registrar la masa de un picnómetro seco, que posteriormente se llenó con agua que pasó por un proceso de desaireado con ayuda de una bomba de vacío. Se midió la masa y la temperatura del agua en el picnómetro (ver Figura 8), para luego introducir una muestra de 50g que fue secada y cernida previamente por el tamiz No.4, se agitó suavemente procurando no introducir aire y nuevamente se retira el aire presente en los poros, además, se realizó un reajuste del nivel de agua de forma que esta estuviese siempre en la marca de calibración.

Finalmente, la lechada se vierte en un recipiente que se lleva al horno a un proceso de secado para luego registrar las masas y realizar los cálculos respectivos de gravedad específica. Con estos dos valores se calcula la porosidad con la relación entre estas densidades.



*Figura 8.* Medición de la temperatura de la lechada en el picnómetro.

### **3.3. Fase 3: Análisis Estadístico**

Los resultados de las propiedades hidrofísicas obtenidas en laboratorio fueron analizados por medio de estadística descriptiva y gráficamente, donde se compara de forma directa las unidades hidrográficas en función de la cobertura del suelo y las profundidades de muestreo. De igual forma, se analizó la correlación de dichas propiedades con las intervenciones antrópicas y el comportamiento de las variables de acuerdo a sus desviaciones estándar y a los valores promedios.

El análisis estadístico se llevó a cabo con el software Minitab® donde se realizó el cálculo de las varianzas y se compararon las medias muestrales por medio de la prueba Tukey (Gutiérrez & De la Vara, 2012), con un nivel de significancia de 5%. Esta prueba agrupa las medias de las zonas de las UH en diferentes grupos, comparándolas e identificando si existen diferencias entre ellas. Este modelo se escogió debido a que se acopla perfectamente con las cantidades muestrales y la

finalidad del análisis, además, ha sido usado por varios autores, en investigaciones de estudios de suelo similares, como en Soto (2015), quien realiza un análisis de propiedades hidrofísicas como pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y concentración de aluminio para ver la influencia que tienen sobre los indicadores de calidad del suelo.

#### 4. Resultados

##### 4.1. Selección de la Microcuenca

Las UH fueron escogidas bajo la premisa de analizar un sistema de cuencas pareadas, esta es una metodología experimental que busca contrastar dos cuencas adyacentes o cercanas con características geomorfológicas, topográficas, hidrológicas y climáticas similares, donde el factor diferenciador es el uso del suelo (Zhang et al., 2003). Las características más relevantes de las UHs se consignan en la Tabla 2, donde se aprecian datos como: área, altitud, pendiente y porcentaje de usos de suelo presentes en la zona de estudio.

Tabla 2.

*Características físicas principales y usos dominantes de las UH.*

Características físicas	UH	
	Intervenida (I)	No Intervenida (NI)
Área (ha)	15.91	20.88
Perímetro (m)	2225	3275
Elevación Máx (m)	3501	3565
Elevación Mín (m)	3431	3431
Pendiente promedio (%)	15.6	17.4
<b>Usos dominantes</b>		
Mosaico de pastos y cultivos (%)	46.9	36.5
Bosque denso (%)	12.8	12.7
Herbazal (%)	40.3	50.8
Afloramientos rocosos (%)	0	0

*Nota:* En la UH-NI el porcentaje de 36.5 hace referencia únicamente al Mosaico de pastos. Adaptado de Celis (2018).

## 4.2. Ubicación y Clasificación de las Coberturas

Después de realizar una salida de campo enfocada al reconocimiento de la zona de estudio se logró esquematizar cada UH con las respectivas coberturas presentes. En la Figura 9, se puede observar el esquema de los usos de suelo y su distribución aproximada dentro de cada UH.

Este modelo es un croquis usado como referencia para la recolección de muestras. En campo se utilizó GPS y control visual del entorno para realizar las respectivas extracciones.

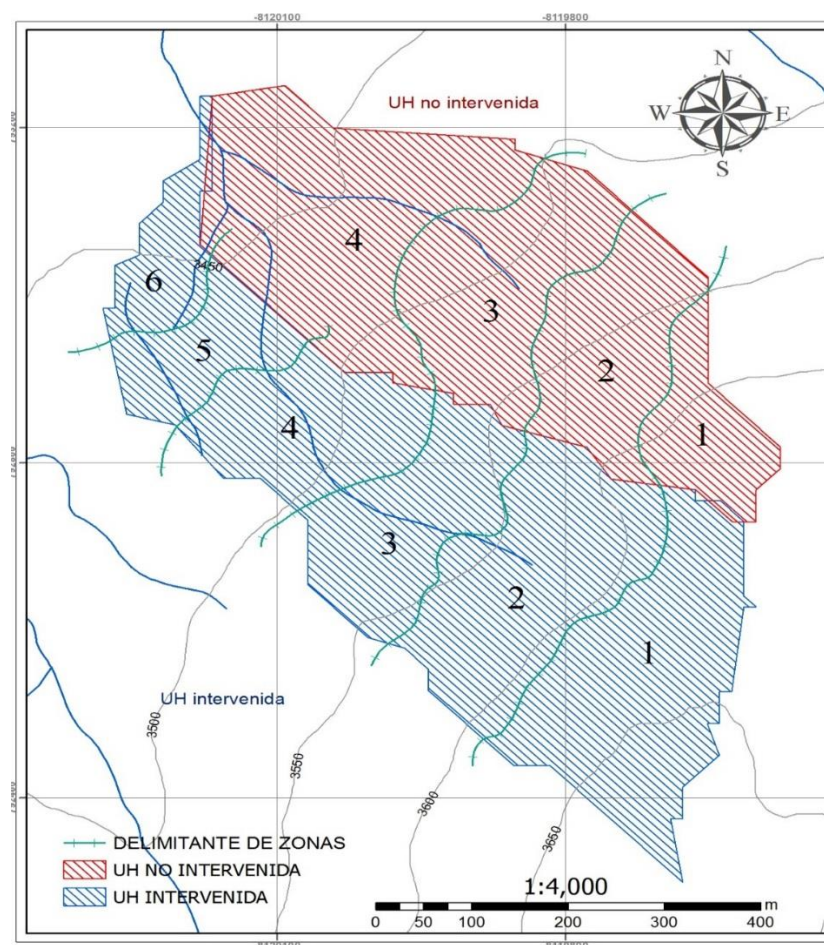


Figura 9. Esquema general de usos de suelos.

Nota: 1-Vegetación nativa de páramo con baja pendiente, 2- vegetación nativa de páramo con alta pendiente, 3- arbusto denso, 4- barbecho, 5-cultivo de cebolla, 6- cultivo de papa. Adaptado de Patiño (2019).

La clasificación de las coberturas en las UH del área de estudio fue realizada previamente en el proyecto de investigación de Godoy & Medina (2019), donde se describe en detalle la metodología

empleada y sus resultados. De ese trabajo, se identificaron 10 zonas dentro de las UH. El Apéndice A, contiene una breve descripción de los tipos de cobertura encontrados en el estudio.

#### 4.3. Geolocalización de los puntos de muestreo

La recolección de muestras se realizó de forma aleatoria y distribuida sobre toda la extensión de las coberturas y unidades hidrográficas para abarcar la mayor variabilidad posible. Se efectuó la extracción de 216 muestras en 6 salidas de campo, en estas, se escogieron los puntos más representativos, los cuales se georreferenciaron con la ayuda del aplicativo móvil Avenza Maps (<https://www.avenza.com/avenza-maps/>) (Figura 10).

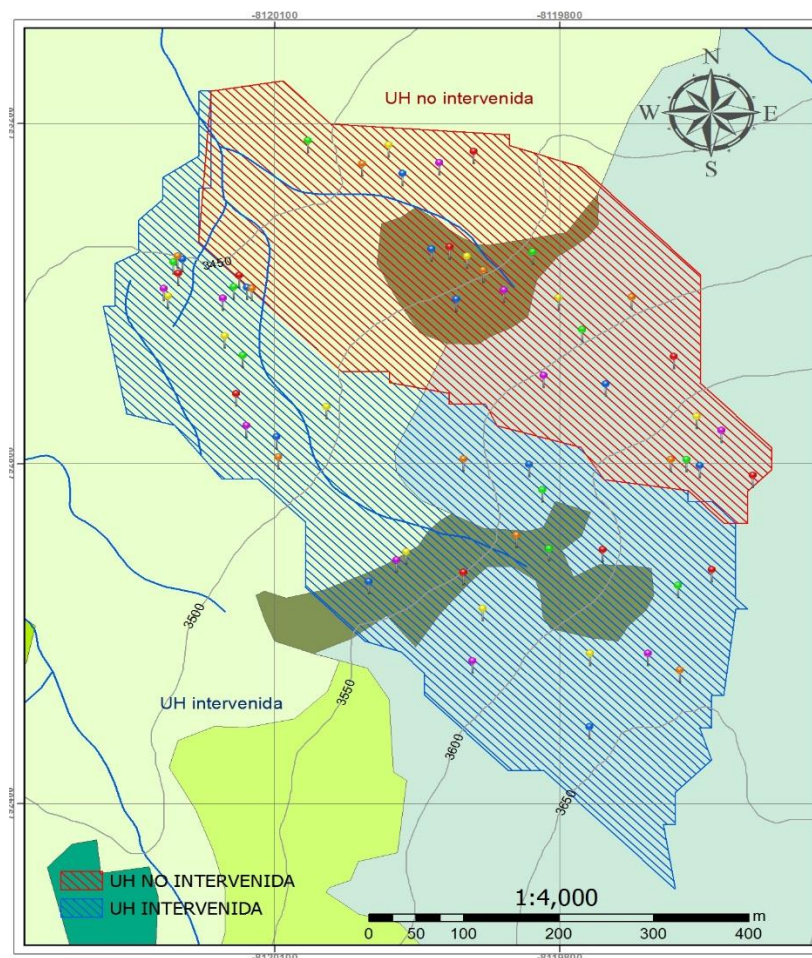


Figura 10. Clasificación y distribución espacial de los puntos de muestreo.

Nota: ● Muestreo 1, ● Muestreo 2, ● Muestreo 3, ● Muestreo 4, ● Muestreo 5, ● Muestreo 6. Adaptado de Patiño (Patiño, 2019).

#### 4.4. Análisis de las Propiedades Hidrofísicas del Suelo

**4.4.1. Humedad.** En la Tabla 3 y en el Apéndice B se muestra el promedio de las humedades por zonas en las dos UH a diferentes profundidades. Al observar la Tabla, se evidencia que la humedad disminuye al aumentar la profundidad, excepto en zonas intervenidas de barbecho y cultivo de cebolla, esto se puede deber a las actividades de labrado, técnica que consiste en despejar y voltear el suelo ocasionando la reducción en la humedad (Llambí et al., 2012).

Los páramos en condiciones naturales presentan altos contenidos de humedad debido a la baja transpiración de las plantas y a la porosidad del suelo (Díaz & Navarrete, 2005). En las tres profundidades se observó que la mayor diferencia de humedad entre las dos unidades hidrográficas se presenta en la zona nativa de baja pendiente, la cual disminuye de 0-5 cm el 16%, de 10-15 cm 13.37% y de 20-25 cm un 11.46%. La máxima dispersión de los datos en la UH intervenida se mostró en la zona de arbusto denso un 28.51%, y en la UH no intervenida en la zona nativa de baja pendiente un 26.40%.

El cultivo de papa en comparación con el cultivo de cebolla presentó disminuciones de 17.02% a una profundidad de 0-5 cm, 19.87% de 10-15 cm y 19.29% de 20-25 cm. Adicionalmente se comparó el cultivo de papa con la zona nativa de baja pendiente no intervenida llegando a diferencias del 32.07% de 0-5 cm, 18.83% de 10-15 cm y 8.53% de 20-25 cm. Las zonas de cultivo tienden a disminuir su humedad debido a que el suelo comienza a erosionarse por el labrado ocasionando la pérdida de retención de agua en el suelo, adicionalmente los cultivos no están adaptados al ecosistema y estos absorben una mayor cantidad de agua que las plantas nativas (Hofstede, 2001).

Tabla 3.  
Resumen estadístico de humedad.

Zona	UH	Profundidad								
		0-5 cm			10-15 cm			20-25 cm		
		Med±Desvest	Ag	Comp	Med±Desvest	Ag	Comp	Med±Desvest	Ag	Comp
N.b	NI	71.76±26.22 %	A	(-)	56.74±26.40 %	F	(-)	45.11±22.96 %	L	(-)
	I	55.75±10.86 %	A	(-)	43.37±17.41 %	F	(-)	33.65±14.89 %	L	(-)
N.a	NI	69.15±12.80 %	B	(-)	56.06±16.25 %	G	(+)	35.39±9.77 %	M	(+)
	I	62.69±21.29 %	B	(-)	61.15±19.75 %	G	(+)	40.89±23 %	M	(+)
A.d	NI	53.45±18.14 %	C	(+)	51.15±17.58 %	H	(-)	44.06±14.42 %	N	(-)
	I	68.45±28.51 %	C	(+)	41.06±12.09 %	H	(-)	40.21±9.28 %	N	(-)
B.b	NI	43.57±8.01 %	D	(-)	33.77±11.32 %	I	(+)	33.73±8.31 %	O	(+)
	I	43.48±14.43 %	D	(-)	46.91±17.37 %	I	(+)	40.24±17.11 %	O	(+)
C.c	I	56.71±17.75 %	E	(-)	57.78±16.98 %	J	(-)	55.87±16.40 %	P	(-)
C.p	I	39.69±8.15 %	E	(-)	37.91±9.86 %	K	(-)	36.58±9.43 %	Q	(-)

Nota: La casilla  representa las medias que son significativamente diferentes. Las letras representan la agrupación (Ag.) de medias Tukey. La sigla UH representa las unidades hidrográficas, NI (no intervenida) e I (intervenida). Los signos (+) o (-) representan un aumento o disminución comparando (Comp.) UH intervenido respecto a UH no intervenida de cada zona, los cultivos se compararon entre sí. (Desvest) representa la desviación estándar de cada media, se analizaron 216 muestras.

**4.4.2. Contenido de materia orgánica.** En la Tabla 4, se muestra el promedio de materia orgánica total por zonas en las dos UH a diferentes profundidades. Según el Apéndice C se puede observar que la cantidad de materia orgánica disminuye al aumentar la profundidad. Esto puede deberse a la descomposición de plantas y animales que se encuentran en mayor cantidad a nivel superficial (Silva, 2016).

En estado natural los páramos presentan grandes contenidos de materia orgánica ocasionado por la lenta descomposición del material vegetal debido a las bajas temperaturas (Llambí et al., 2012). Las prácticas agrícolas como la labranza, ocasionan que los suelos permanezcan descubiertos o en barbecho por algunos periodos de tiempo durante el año. Esta exposición directa

a la radiación solar hace que el material orgánico se degrade más rápido (Angarita & Pastrana, 2016).

Esta puede ser la razón por la que en la zona de barbecho de 0-5 cm el contenido de materia orgánica es menor comparada con las otras zonas.

En la profundidad de 0-5 cm se puede observar que el cultivo de cebolla en la UH intervenida presenta el menor valor (15.89%) en el contenido de materia orgánica, comparándolo con la zona nativa de baja pendiente no intervenida (29.18%), se puede deducir que el cultivo disminuyó en un 23.25%.

El cultivo de papa en comparación con el cultivo de cebolla presentó las siguientes disminuciones: 3.75% de 0-5 cm, 4.64% de 10-15 cm y 4.20% de 20-25 cm. El porcentaje de materia orgánica en los cultivos tiende a disminuir debido a la mineralización del suelo, el cual necesita gran cantidad de nutrientes para su desarrollo, cuando el suelo pierde la materia orgánica se utilizan fertilizantes que introducen artificialmente este componente del suelo (Pérez, 2014).

En las tres profundidades se observó que la mayor pérdida de contenido de materia orgánica para una misma cobertura en comparación con las UH es la zona nativa de baja pendiente, disminuye: de 0-5 cm un 5.94%, de 10-15 cm un 9.58% y de 20-25 cm un 7.18%.

La máxima dispersión de los datos en la UH intervenida se mostró en la zona de arbusto denso un 14.06%, y en la UH no intervenida en la zona nativa de baja pendiente un 10.51%.

Tabla 4.

*Resumen estadístico del contenido de materia orgánica.*

Zona UH		Profundidad								
		0-5 cm			10-15 cm			20-25 cm		
		Med±Desvest	Ag	Comp	Med±Desvest	Ag	Comp	Med±Desvest	Ag	Comp
N.b	NI	29.18±8.10 %	A	(-)	25.03±8.34 %	F	(-)	17.23±10.51 %	M	(-)
	I	23.25±6.38 %	A	(-)	15.45±5.29 %	G	(-)	10.06±5.11 %	M	(-)
N.a	NI	27.30±8.50 %	B	(-)	18.09±7.30 %	H	(+)	13.74±6.39 %	N	(-)
	I	26.67±12.14 %	B	(-)	22.86±9.93 %	H	(+)	11.81±8.88 %	N	(-)
A.d	NI	22.98±5.55 %	C	(+)	15.88±6.93 %	I	(-)	14.34±7.53 %	O	(-)
	I	26.59±14.06 %	C	(+)	11.1±4.77 %	I	(-)	9.984±2.32 %	O	(-)
B.b	NI	16.64±3.8 %	D	(+)	9.63±3.63 %	J	(+)	8.01±2.82 %	P	(+)
	I	17.53±7.95 %	D	(+)	19.91±10.35 %	K	(+)	16.89±10.02 %	P	(+)
C.c	I	19.64±6.75 %	E	(-)	19.54±5.78 %	L	(-)	18.59±7.02 %	Q	(-)
C.p	I	15.89±4.65 %	E	(-)	14.91±5.06 %	L	(-)	14.49±5.53 %	Q	(-)

*Nota:* La casilla  representa las medias que son significativamente diferentes. Las letras representan la agrupación (Ag.) de medias Tukey. La sigla UH representa las unidades hidrográficas, NI (no intervenida) e I (intervenida). Los signos (+) o (-) representan un aumento o disminución comparando (Comp.) UH intervenido respecto a UH no intervenida de cada zona, los cultivos se compararon entre sí. (Desvest) representa la desviación estándar de cada media, se analizaron 216 muestras.

**4.4.3. Potencial de hidrógeno (pH).** En la Tabla 5 y en el Apéndice D se muestra el promedio de pH por zonas en las dos UH a diferentes profundidades. De acuerdo a Mora & Helmut (1995) los páramos se caracterizan por tener suelos ácidos, debido al alto contenido de aluminio. El pH bajo ha permitido durante mucho tiempo la adaptabilidad de microorganismos y especies vegetales, los cuales, reflejan las condiciones naturales de este ecosistema y, por esta condición, se hace más frágil una vez es intervenido y pierde sus características naturales (Estupiñán et al., 2009).

En las tres profundidades no se observaron grandes variaciones de pH comparando las dos UH. Las mayores disminuciones fueron: de 0-5 cm el 0.02, de 10-15 cm el 0.24 y de 20-25 cm el 0.36.

La máxima dispersión de los datos en la UH intervenida se mostró en la zona de barbecho un 0.43, y en la UH no intervenida en la zona nativa de baja pendiente un 0.56.

Valores de pH inferiores a 5.5 restringen el crecimiento de las plantas, generalmente por deficiencia en ciertos nutrientes. Por lo general se considera que un pH entre 6 y 7 es adecuado para la agricultura, el pH suele ser un indicador sobre el estado de fertilidad en las cosechas (Llambí et al., 2012). Se determinó que la zona de cultivo de cebolla tiene pH de 5.97, comparando este resultado con la zona de arbusto denso UH no intervenida con pH de 3.97, se evidencia un aumento de 2 unidades sobre el cultivo de cebolla. Los datos indican que los cultivos presentan pH superiores a las otras zonas, este hallazgo podría indicar que se están utilizando fertilizantes, necesario para adecuar el suelo y mejorar el crecimiento de los cultivos. Principalmente estos productos agrícolas están compuestos por calcio, en Colombia es frecuente el uso de cal en los cultivos, componente utilizado para aumentar el pH y llegar a valores óptimos para el crecimiento de las plantas (Pérez, 2014).

Tabla 5.

Resumen estadístico del pH..

Zona	UH	Profundidad											
		0-5 cm			10-15 cm			20-25 cm					
		Med±Des	vest	Ag	Comp	Med±Des	vest	Ag	Comp	Med±Des	vest	Ag	Comp
N.b	NI	4.51±0.18		A	(-)	4.77±0.42		G	(-)	5.04±0.56		M	(-)
	I	4.51±0.17		A	(-)	4.70±0.33		G	(-)	5.00±0.40		M	(-)
N.a	NI	4.34±0.17		B	(+)	4.66±0.31		H	(-)	4.84±0.43		N	(+)
	I	4.70±0.38		B	(+)	4.60±0.39		H	(-)	5.04±0.34		N	(+)
A.d	NI	3.97±0.26		C	(+)	4.32±0.19		I	(+)	4.46±0.28		O	(+)
	I	4.00±0.32		C	(+)	4.32±0.36		I	(+)	4.51±0.23		O	(+)
B.b	NI	5.18±0.53		D	(-)	5.27±0.48		J	(-)	5.48±0.52		P	(-)
	I	5.16±0.43		D	(-)	5.03±0.39		J	(-)	5.12±0.24		P	(-)
C.c	I	5.97±0.36		E	(-)	5.87±0.39		K	(-)	5.88±0.33		Q	(-)
C.p	I	4.90±0.14		F	(-)	4.94±0.20		L	(-)	4.99±0.19		R	(-)

Nota: La casilla  representa las medias que son significativamente diferentes. Las letras representan la agrupación (Ag.) de medias Tukey. La sigla UH representa las unidades hidrográficas, NI (no intervenida) e I (intervenida). Los signos (+) o (-) representan un aumento o disminución comparando (Comp.) UH intervenido respecto a UH no intervenida de cada zona, los cultivos se compararon entre sí. (Desvest) representa la desviación estándar de cada media, se analizaron 216 muestras.

**4.4.4. Porosidad.** En la Tabla 6 y en el Apéndice E se muestra el promedio de la porosidad por zonas en las UH, a diferentes profundidades. Los suelos de páramo son los que presentan mayor porosidad encontrándose valores que pueden ir desde el 50% hasta el 90% e incluso más, esto da una idea de cuánta agua puede contener un suelo con estas características (Llambí et al., 2012). La porosidad depende de la textura, densidad y estabilidad estructural, el sistema de densidad aparente y densidad real son bajos debido a los altos contenidos de carbono (CAR, 1988).

En la zona de estudio, solo se presentó disminución de porosidad comparando la UH no intervenida con la UH intervenida en la zona nativa de baja pendiente, en la profundidad de 0-5 cm del 0.27% y de 10-15 cm del 2.69%. Estos valores indicarían que la zona intervenida aún no ha sido afectada por factores antrópicos en términos de porosidad. La máxima dispersión de los datos en la UH intervenida se mostró en la de arbusto denso un 9.83%, y en la UH no intervenida en la zona nativa de baja pendiente un 13.50%.

Tabla 6.

*Resumen estadístico de porosidad.*

Zona	UH	Profundidad								
		0-5 cm			10-15 cm			20-25 cm		
		Med±Desvest	Ag	Comp	Med±Desvest	Ag	Comp	Med±Desvest	Ag	Comp
<b>N.b</b>	<b>NI</b>	52.75±4.80 %	A	(-)	51.31±13.50 %	G	(-)	48.40±6.13 %	N	(+)
	<b>I</b>	52.47±6.37 %	A	(-)	48.62±7.28 %	G	(-)	52.51±8.01 %	N	(+)
<b>N.a</b>	<b>NI</b>	57.99±6.13 %	B	(+)	56.50±9.71 %	H	(+)	52.55±5.70 %	O	(+)
	<b>I</b>	63.26±6.23 %	B	(+)	57.67±5.01 %	H	(+)	56.97±5.47 %	O	(+)
<b>A.d</b>	<b>NI</b>	59.39±9.45 %	C	(+)	55.20±9.67 %	I	(+)	54.85±6.65 %	P	(+)
	<b>I</b>	65.25±9.83 %	C	(+)	55.67±6.55 %	I	(+)	56.12±4.61 %	P	(+)
<b>B.b</b>	<b>NI</b>	43.66±5.14 %	D	(+)	46.80±5.51 %	J	(+)	47.31±11.09 %	Q	(+)
	<b>I</b>	57.77±6.05 %	E	(+)	56.20±5.46 %	K	(+)	59.01±9.49 %	Q	(+)
<b>C.c</b>	<b>I</b>	62.40±3.39 %	F	(-)	57.31±4.49 %	L	(+)	62.03±3.56 %	R	(+)
<b>C.p</b>	<b>I</b>	60.26±5.86 %	F	(-)	64.40±4.41 %	M	(+)	62.15±5.26 %	R	(+)

*Nota:* La casilla  representa las medias que son significativamente diferentes. Las letras representan la agrupación (Ag.) de medias Tukey. La sigla UH representa las unidades hidrográficas, NI (no intervenida) e I (intervenida). Los signos (+) o (-) representan un aumento o disminución comparando (Comp.) UH intervenido respecto a UH no intervenida de cada zona, los cultivos se compararon entre sí. (Desvest) representa la desviación estándar de cada media, se analizaron 216 muestras.

**4.4.5. Conductividad hidráulica saturada.** En la Tabla 7 y en el Apéndice F se muestran los resultados de la conductividad hidráulica. Se cuenta con un dato por cada cobertura dominante. La conductividad hidráulica relaciona el contenido de agua y la presión para describir la velocidad con la que el agua se mueve en el interior del suelo. Esta relación se puede observar en la curva de retención de humedad, la cual indica la capacidad que tiene el suelo para almacenar agua bajo diferentes niveles de secamiento (Llambí et al., 2012).

La porosidad en la zona de arbusto denso a una profundidad de 0-5 cm es del 59.39%, siendo el mayor porcentaje entre las UH no intervenidas, este valor se relaciona directamente con la conductividad hidráulica, debido a que en esta zona también se registró el mayor valor de esta conductividad del 221.5 cm/d. Los suelos de páramo en estado natural al tener una elevada porosidad tienen una alta conductividad hidráulica (Hofstede, 2001).

Comparando la zona de arbusto denso no intervenida con la zona nativa de baja pendiente, barbecho, cultivo de cebolla y papa intervenidas, se presentaron disminuciones del 22%, 81%, 69% y 91% respectivamente.

Tabla 7.

*Datos de conductividad hidráulica obtenidos en laboratorio.*

<b>Zona</b>	<b>Unidad Intervenida</b>	<b>Zona</b>	<b>Unidad no Intervenida</b>
<b>N.b</b>	171.7 cm/d	<b>N.a</b>	144.6 cm/d
<b>B.b</b>	42.5 cm/d	<b>A.d</b>	221.5 cm/d
<b>C.c</b>	67.8 cm/d		
<b>C.p</b>	20.4 cm/d		

*Nota:* N.b nativa de baja pendiente, B.b barbecho, C.c cultivo de cebolla, C.p cultivo de papa, N.a nativa de alta pendiente, A.d arbusto denso, se analizaron 6 muestras.

**4.4.6. Relación de las propiedades hidrofísicas.** En el suelo de páramo la infiltración es generalmente alta debido a la presencia de poros relacionados con altos valores de conductividad hidráulica. La humedad es especialmente significativa, dado que en los primeros 30 cm el agua ocupa aproximadamente el 60% del volumen total del suelo. Así, los suelos de páramo se caracterizan por tener altas porosidades y altas conductividades hidráulicas (Díaz & Navarrete, 2005).

La velocidad de la actividad microbiana y descomposición de material orgánico es dependiente de la humedad, temperatura y tipo de suelo, a medida que se pierde la humedad, los microorganismos se ven afectados debido a que

disminuyen las relaciones osmóticas de las células (movimiento de agua a través de una membrana semipermeable) (Matter et al., 2006).

El rol de la materia orgánica en la estructuración de las partículas de suelo es ampliamente reconocido (Estupiñán et al., 2009), a su vez, la estructura del suelo afecta su porosidad y, por lo tanto, la retención y disponibilidad de agua del suelo, además de su capacidad de aire; Al ser mayor la cantidad de materia orgánica aumentan los poros de mayor diámetro, que retienen el agua con menor energía (Acevedo, 2014).

Los principales elementos químicos que causan la acidez en el suelo son el hidrogeno y el aluminio, los cuales se originan a partir de las mismas plantas, de los minerales arcillosos y sobre todo por el contenido de materia orgánica (Llambí et al., 2012).

Se pudo determinar que la porosidad no presenta disminuciones entre las UH debido a que las variaciones encontradas no son considerables de acuerdo a la prueba de Tukey, las disminuciones en la materia orgánica no significan que la porosidad disminuya debido a que también depende de la estructura del suelo (Buytaert et al., 2014).

## 5. Conclusiones

La zona de vegetación natural con baja pendiente presentó una disminución considerable en el contenido de materia orgánica entre las dos unidades hidrográficas en un 9.58%, simultáneamente se presentó una disminución de la humedad en un 13.37%; estas disminuciones ratifican la relación entre las dos propiedades hidrofísicas.

Las medias de pH promedio muestran que los cultivos de cebolla y papa tuvieron un aumento en este parámetro respecto a las otras zonas, llegando hasta una diferencia de 2 unidades. Los cultivos se compararon entre sí y se observó que el cultivo de cebolla y papa alcanza valores de 5.97 y 4.99 respectivamente, probablemente estos valores sobresalientes son debido a la utilización de productos ricos en calcio como la cal para disminuir la acidez del suelo y mejorar las condiciones de crecimiento en los cultivos.

Comparando la UH intervenida respecto a la UH no intervenida se pudieron observar las siguientes variaciones por coberturas en las propiedades hidrofísicas: en la zona nativa de baja pendiente sobre la humedad (16%), materia orgánica (9.58%), pH (0.07) y porosidad (2.69); en la zona nativa de alta pendiente sobre la humedad (6.46%), materia orgánica (1.93%) y pH (0.37); en la zona de arbusto denso sobre la humedad (10.09%), materia orgánica (4.79%) y pH (0.05); en la zona de barbecho sobre el pH (0.36) y Ks (125%).

Esto refleja los cambios asociados a la actividad antrópica sobre las propiedades hidrofísicas en las coberturas en la zona de estudio, especialmente en las áreas bajo cultivo. Por lo tanto, es

necesario encontrar alternativas para que los agricultores realicen prácticas de cultivo que conserven la calidad del suelo.

## **6. Recomendaciones**

Después de realizar la investigación surgieron dos preguntas ¿Cuánto tiempo se necesita para que el suelo presente cambios significativos en las zonas afectadas por factores antrópicos? ¿Qué efectos tendrían estos cambios en el ecosistema?, se recomienda seguir investigando en estas propiedades hidrofísicas en el páramo de Berlín y poder llegar a responder estas incógnitas que podrían ayudarnos a prevenir un daño ambiental.

**Referencias bibliográficas**

- Acevedo, E. (2014). *Sistema de Labranza y Productividad de los Suelos*. June.
- Angarita, E., & Pastrana, J. (2016). *Estado del arte sobre las consecuencias de la agricultura en recursos hídricos y suelos en ecosistema de páramo*.
- Arango, A. P., Pineda, C. M., Molina, J., Eduardo, L., Osejo, M., Moreno, J., Naranjo, L. G., Navarro, W., Ojeda, J., Padilla, F., Palacios, O. I., Pérez, C., Fernando, L., Porras, P., Rangel, O., Rengifo, L. M., Reyes, P., Rincón, M., & Rivera, D. (2001). *Minambiente*.
- ASTM D1815-11. (2018). Standard Test Methods for Saturated Hydraulic Conductivity , Water Retention , Porosity , Particle Density , and Bulk Density of Putting Green and. *Test, i*(Reapproved 2018), 1–6. <https://doi.org/10.1520/F1815-11>
- ASTM D2216-10. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water ( Moisture ) Content of Soil and Rock by Mass: ASTM D 2216. *ASTM International, November 1988*, 1–7. <https://doi.org/10.1520/D2216-10.N>
- ASTM D2974-00. (2002). Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. *Annual Book of ASTM Standards, 04.08*, 6–9.
- ASTM D4972-01. (2001). *Standart Test Method for pH of Soils. ASTM D4972 - 01. 01*(Reapproved), 1–5. <https://doi.org/10.1520/D4972-01R07.2>
- ASTM D7263-09. (2009). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens. *ASTM International, 09*(Reapproved 2018), 1–7. <https://doi.org/10.1520/D7263-09.2>
- ASTM D854-14. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *Annual Book of ASTM Standards*, 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2014). *Hidrología del páramo Andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad*. May 2014.
- CAR. (1988). *Los páramos*.
- Celis, A. (2018). *Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por dos unidades hidrográficas de páramo*.
- Chocobar, A., Cox, R. A., Fonteyne, S., Govaerts, B., Jaspers, N., & Kienle, F. (2013). *Contenido de humedad del suelo CIMMTY*.

- Congreso Mundial de Páramos. (2002). *Estudio del estado actual y plan de manejo ambiental de los páramos de Santurban en la jurisdicción de la corporación autónoma regional de la frontera nororiental de Santander.*
- Daza Torres, M. C., Hernández Flórez, F., & Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189–7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- Delgado, D. (2019). *Impresionante granizada en el corregimiento de Berlín, Santander - Otras Ciudades - Colombia - ELTIEMPO.COM.* <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/impresionante-granizada-en-el-corregimiento-de-berlin-santander-421424>
- Díaz, M., & Navarrete, J. (2005). *Hidrosistemas Sensibles.*
- Ellies, A., Renato, G., & Carlos, R. (1997). *La conductividad hidraulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructuras del suelo.* 25(1), 4206. <https://doi.org/10.4206/agrosur.1997.v25n1-06>
- Estupiñán, L. H., Gómez, J. E., Barrantes, V. J., & Limas, L. F. (2009). *Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo el Granixo, (Cundinamarca-Colombia).*
- Godoy, D., & Medina, H. (2019). *CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA DE SUELO DE PÁRAMO MEDIANTE METODOLOGÍA DE CUENCAS PAREADAS. CASO DE ESTUDIO: PÁRAMO DE BERLÍN (SANTANDER).* 1–23.
- Guhl Nimtz, E. (1963). *Los páramos en la vida y la obra de Ernesto Gueh l Nimtz.*
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos.*
- Hofstede, R. (2001). *El impacto de las actividades humanas sobre el páramo.*
- Llambí, L. D., Soto-w, A., Borja, P., Soto-w, A., & Calle, T. (2012). *Páramos Andinos Ecología , hidrología y suelos de páram os.*
- Matter, O., Role, I. T., & Agriculture, I. N. (2006). *LA MATERIA ORGÁNICA , IMPORTANCIA Y EXPERIENCIAS.* 49–61.
- Meter Group. (2015). *Operation Manuak Hyprop 2. HYPROP Manual.*
- Mora, L. E., & Helmut, S. (1995). *Estudios ecologicos del páramo y del bosque altoandino cordillera oriental de colombia.* 6, 57–94.
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourth, J. C., Olaya, E., Posada, E., & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de*

- Páramos. *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.*, 1, 205.
- NTC 4113-1. (1997). Guía para el diseño de programas de muestreo. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)*, 10.
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227–232. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- Patiño, S. (2019). *EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL USO DEL SUELO SOBRE SUS PROPIEDADES HIDROFÍSICAS EN ECOSISTEMA DE PÁRAMO ASOCIADAS A LOS SERVICIOS DE SUMINISTRO Y REGULACIÓN HÍDRICA/ en estudio.*
- Pérez, J. (2014). *Uso de los fertilizantes y su impacto en la producción agrícola.*
- Ramírez, M., & Varón, V. (2016). *Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva.*
- Ramírez, R. (1997). *Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.*
- Restrepo, J., Escobar, E., & Gualdrón, J. (2008). Plan de manejo del distrito de manejo integrado de los recursos naturales. *Cdmb y Corponor.*
- Robert Hofstede, Juan Calles, Víctor López, Rocío Polanco, Fidel Torres, Janett Ulloa, A. V., & Marcos Cerra. (2014). Los páramos Andinos ¿qué sabemos? In *UICN, Quito, Ecuador.*
- Rojas, L., Rojas, H., & Menjívar, J. (2008). *Estimación de la conductividad hidráulica saturada in situ en un suelo tratado con vinaza.* 5–8.
- Silva, A. (2016). *La materia organica del suelo.*
- Soto, M. (2015). *Análisis de indicadores de la calidad del suelo para la evaluación de la efectividad de la estrategia de restauración realizada en el corredor Barbas-Bremen.*
- Zhang, L., Best, A., McMahon, T., Western, A., & Vertessy, R. (2003). *A critical review of paried catchment studies witch reference to seasonal flows and climatic variability.*

**Apéndices**

*Apéndice A. Resumen de coberturas encontradas.*

**Vegetación nativa de páramo con baja pendiente (N.b)**

Zona 1

Se observó un terreno con pendiente en promedio de 17% con presencia de frailejones, pajonal y afloramientos rocosos, también se observó un suelo húmedo y de color negro.

I



NI



**Vegetación nativa de páramo con alta pendiente (N.a)**

Zona 2

El terreno tenía una pendiente de aproximadamente 60% y se observaron arbustos, herbazales y frailejones dispersos. El suelo era húmedo y de color pardo oscuro.

I



NI



**Arbusto denso (A.d)**

## Zona 3

Esta zona presentó elementos arbóreos, con una pendiente en promedio de 35% y un suelo de color negro con presencia de musgos y con alta humedad.

I



NI

**Barbecho (B.b)**

## Zona 4



Se evidenció un terreno en descanso con pendiente de 12% aproximadamente, con cobertura de pastos y un color pardo oscuro.

I



NI



Cultivo de cebolla (C.c)	Cultivo de papa (C.p)
Zona 5	Zona 6
Cultivo transitorio con pendiente aproximada del 12% y un color de suelo negro moderadamente seco. Se observaron empaques de fertilizantes, plaguicidas y fungicidas.	Se observó una parte en fase de arado y otra en proceso de crecimiento con un suelo de color pardo moderadamente seco. Esta zona presentó la misma pendiente en promedio que el cultivo de cebolla.
I	I
	

*Fuente:* Adaptado de Godoy & Medina (2019).

*Nota:* I-Unidad hidrográfica intervenida; NI-Unidad hidrográfica no intervenida.

Apéndice B. Estadística descriptiva del promedio de humedad

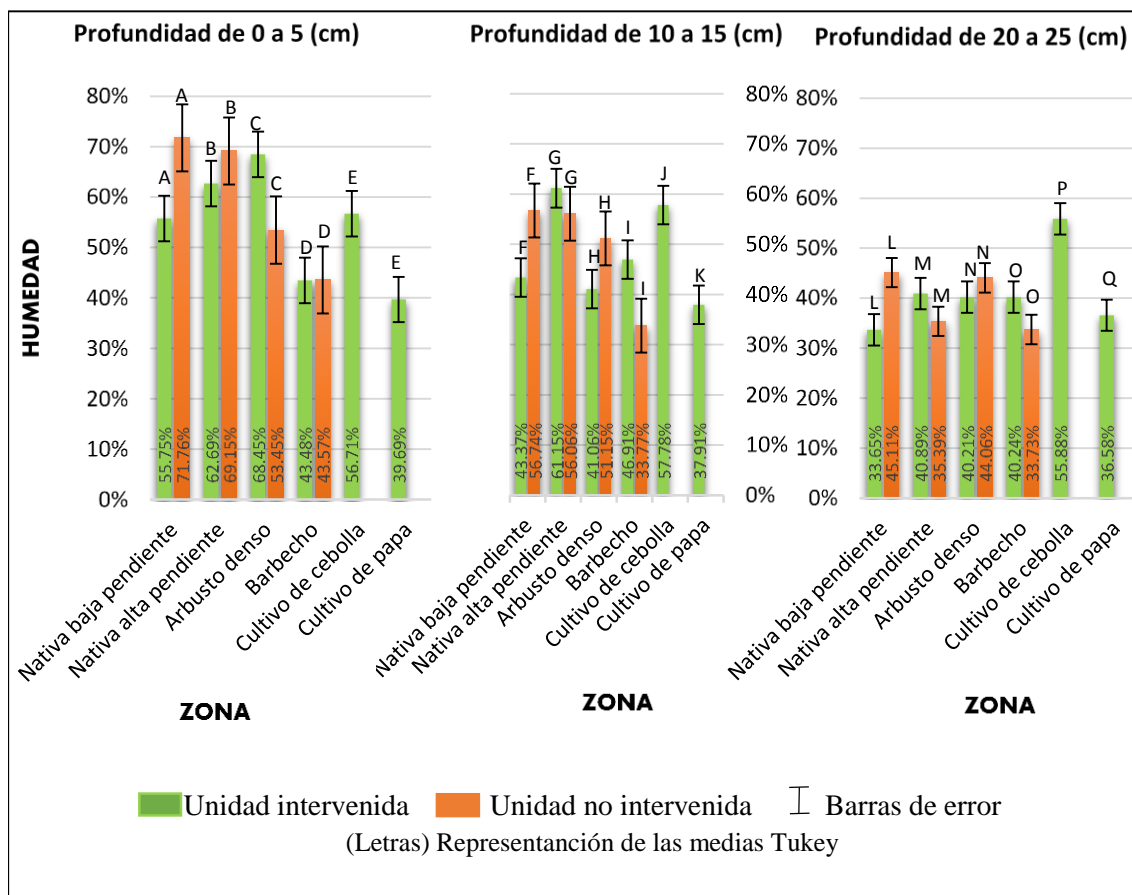


Figura B.1. Gráficos de los promedios de humedad por zonas en las UH a diferentes profundidades. Nota: Las letras representan la agrupación de medias por el método Tukey.

Apéndice C. Estadística descriptiva del promedio de materia orgánica.

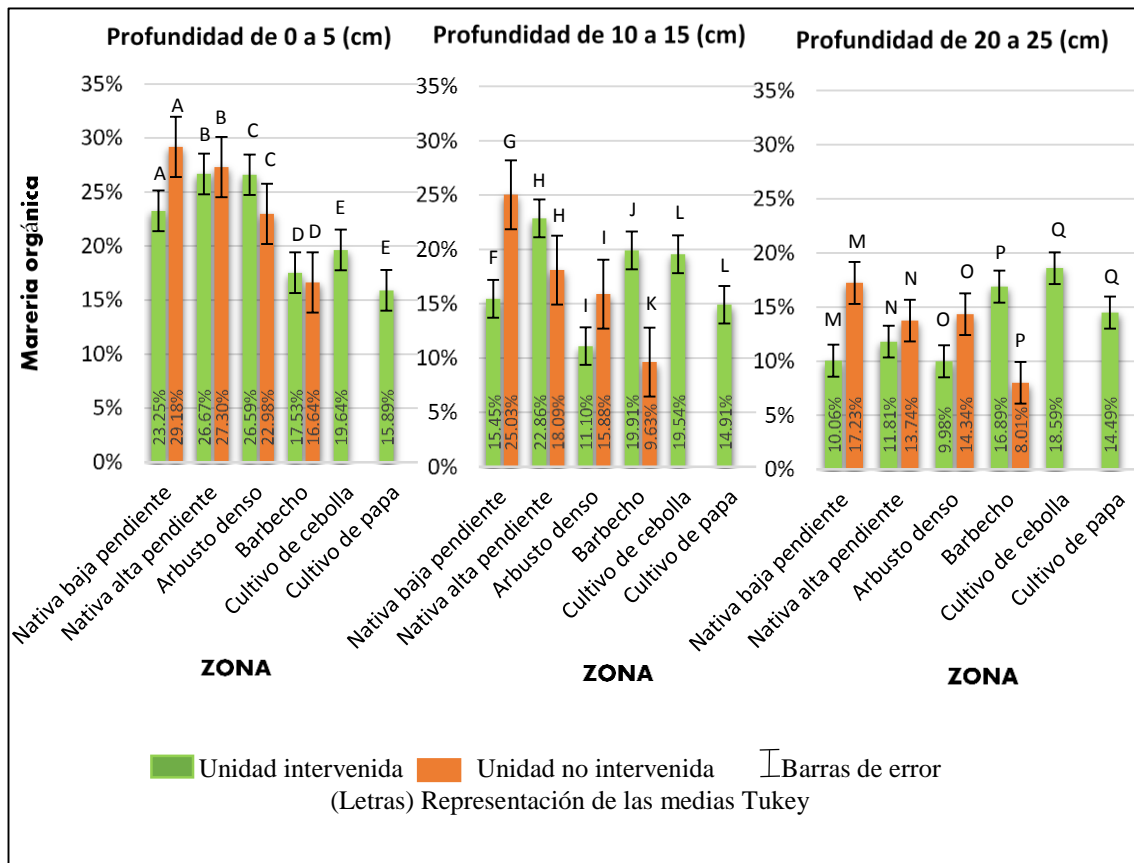


Figura C.1. Gráficos de los promedios de materia orgánica por zonas en las UH a diferentes profundidades. Nota: Las letras representan la agrupación de medias por el método Tukey.

Apéndice D. Estadística descriptiva del promedio de pH.

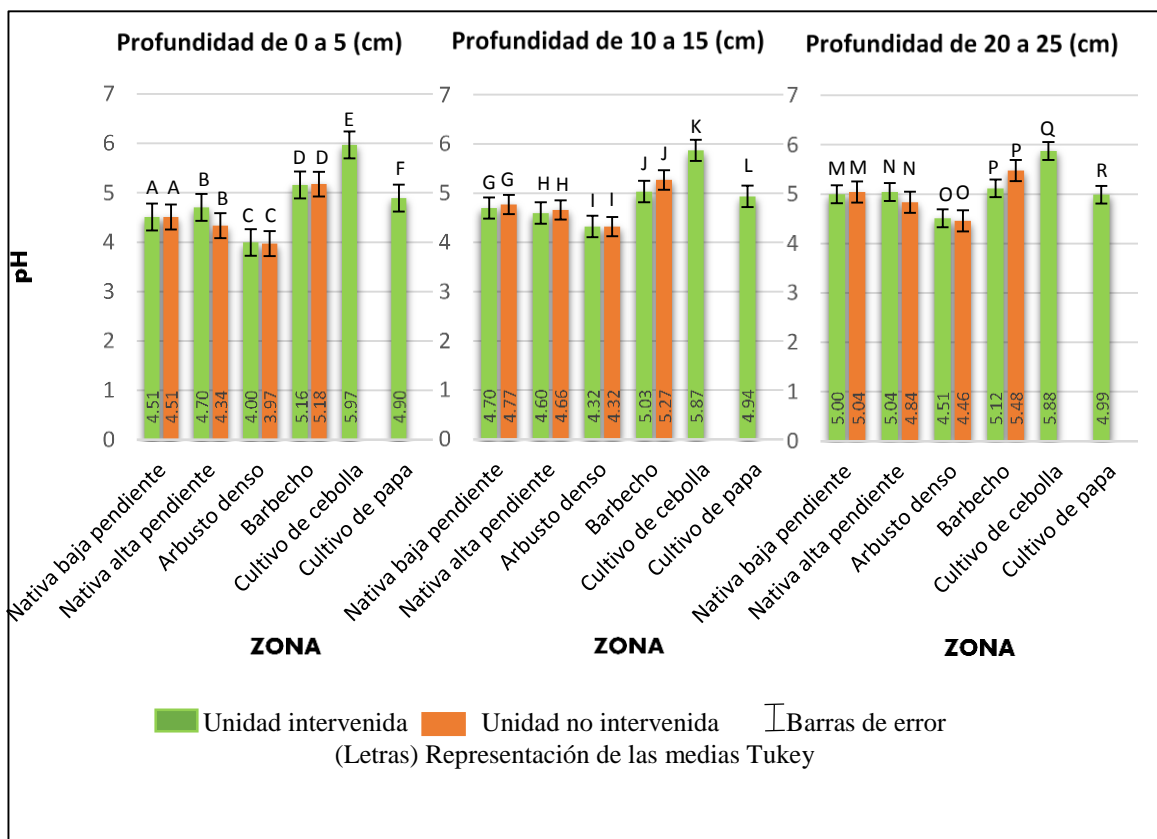


Figura D.1. Gráficos de los promedios de pH por zonas en las UH a diferentes profundidades.  
 Nota: Las letras representan la agrupación de medias por el método Tukey.

Apéndice E. Estadística descriptiva del promedio de porosidad.

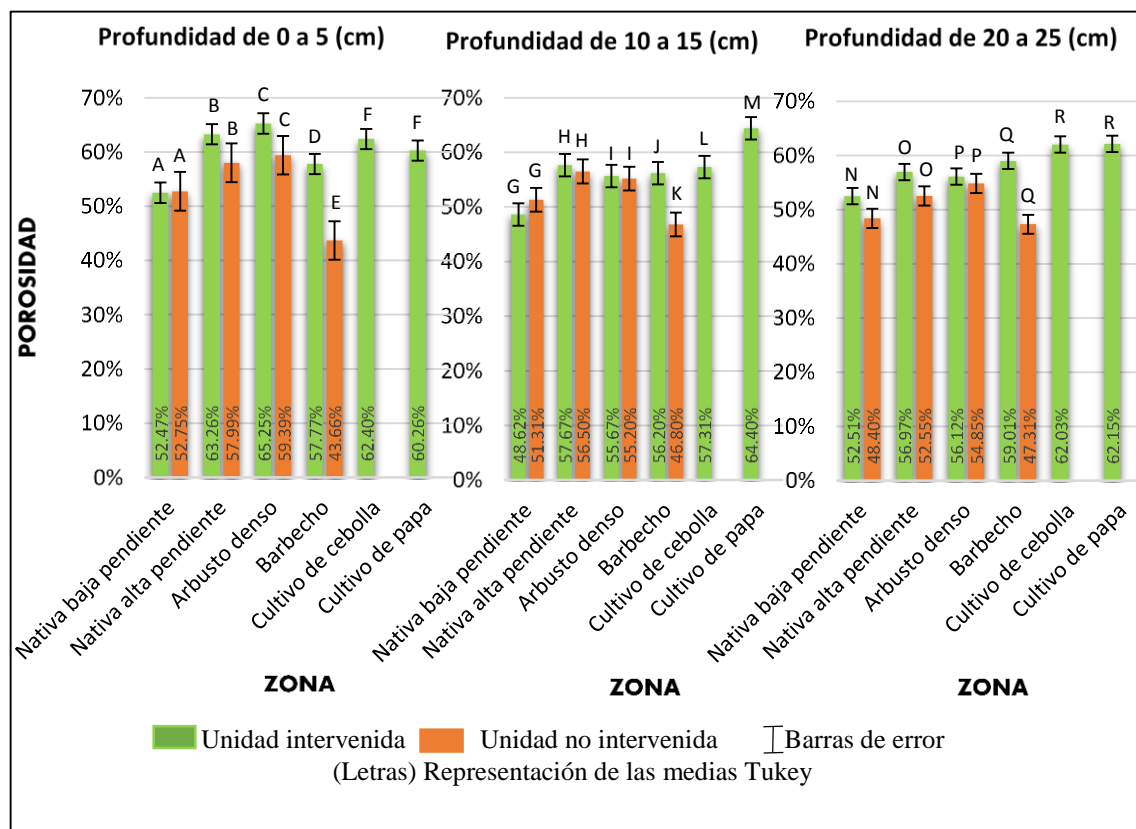


Figura E.1. Gráficos de los promedios de porosidad por zonas en las UH a diferentes profundidades. Nota: Las letras representan la agrupación de medias por el método Tukey.

Apéndice F. *Datos de conductividad hidráulica obtenidos en laboratorio.*

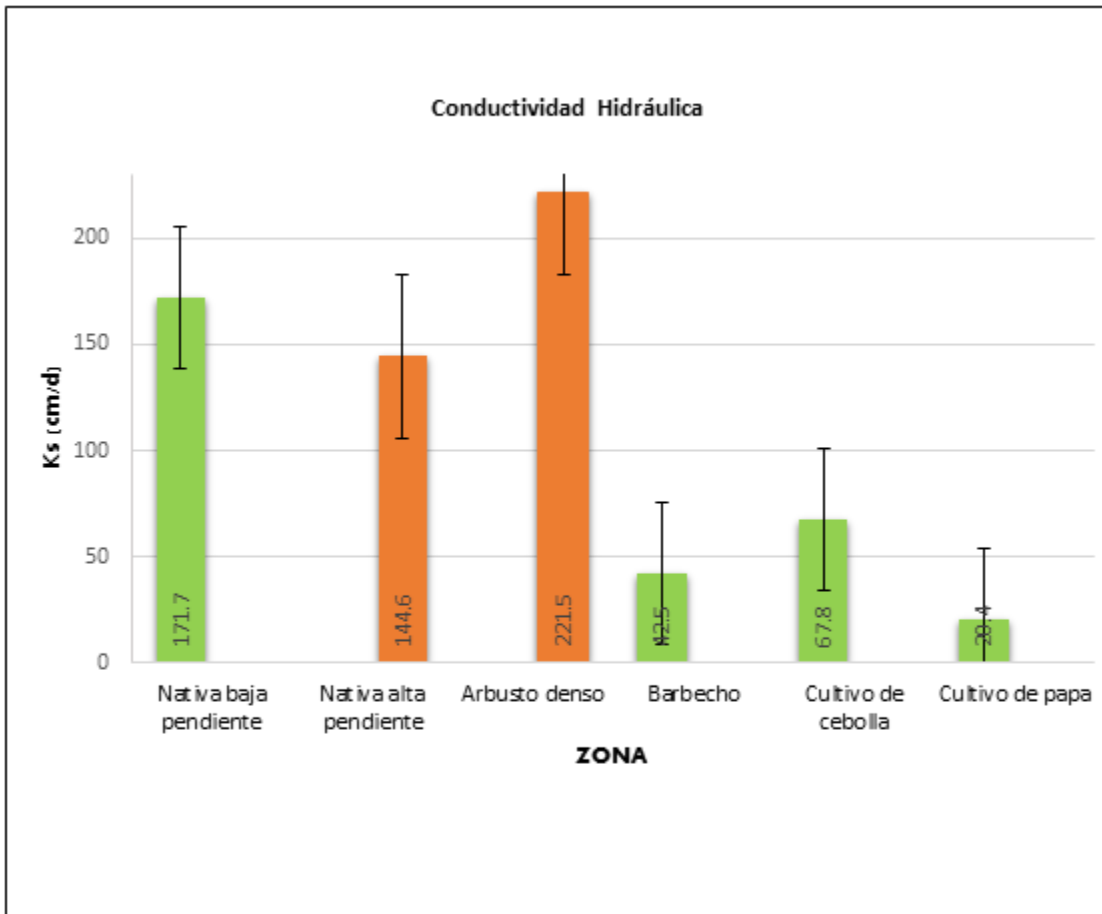


Figura F.1. Gráficos de los promedios de conductividad hidráulica por zonas en las UH.