Análisis del efecto del cambio del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en el Páramo de Berlín (Santander)

Willy Javier Alba Armesto, Javier Ricardo Salazar Aceros

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Isabel Cristina Domínguez Rivera

Doctora en Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural

Codirector:

Sebastián Elías Patiño Gutiérrez

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

Los autores agradecen a la directora del proyecto Isabel Cristina Domínguez Rivera, PhD, al codirector Sebastián Elías Patiño Gutiérrez, Ing. Civil y al director del grupo de investigación en Recursos hídricos y Saneamiento ambiental Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, PhD, por la orientación, la atención a consultas, el material facilitado, la dedicación durante el desarrollo del proyecto y en la elaboración de este artículo.

Contenido

Pág.

Introducción 10

1. Objetivos 12

1.1. Objetivo general 12

1.2. Objetivos específicos 12

2. Marco teórico 13

2.1. Páramo 13

2.2. Páramos en Colombia 14

2.2.1. Clima del páramo 15

2.2.2. Suelos de páramo 16

2.2.3. Vegetación del páramo 17

2.2.4. Hidrología del páramo 17

2.3. Propiedades hidrofísicas en el suelo de páramo 18

2.4. Efectos del uso del suelo sobre las propiedades hidrofísicas 19

3. Metodología 21

3.1. Zona de estudio 21

3.2. Fase 1: empalme de trabajo y capacitación en el uso de equipos de campo y laboratorio. ... 24

3.3. Fase 2: Monitoreo y cuantificación de propiedades hidrofísicas del suelo en usos presentes en el área de estudio 24

3.4. Fase 3: Análisis de resultados 26

4. Resultados y discusión 27

4.2. Clasificación de usos de suelo 27

4.3. Análisis de las propiedades hidrofísicas en el suelo 28

4.4. Humedad del suelo 29

4.5. Contenido de materia orgánica 31

4.6. Porosidad total 33

4.7. Potencial de Hidrógeno 35

4.8. Textura 37

4.9. Capacidad de campo 39

4.10. Comparación estadística entre los usos del suelo 41

5. Conclusiones 43

Referencias bibliográficas 45

Apéndices 51

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Distribución espacial de muestras. 29

Figura 2. Contenido de humedad por uso del suelo y profundidad. 31

Figura 3. Materia orgánica por uso del suelo y profundidad. 33

Figura 4. Porosidad total por uso del suelo y profundidad. 35

Figura 5. Potencial de hidrogeno por uso del suelo y profundidad. 36

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Características de las coberturas vegetales según las franjas altitudinales. 14

Tabla 2. Propiedades hidrofísicas del suelo. 18

Tabla 3. Características de la unidad hidrográfica del páramo de Berlín. 22

Tabla 4. Descripción de usos de suelo en la zona de estudio..... 22

Tabla 5. Ensayos y normas para las muestras de suelo. 25

Tabla 6. Registro fotográfico de cada uso de suelo. 27

Tabla 7. Textura en cada uso del suelo (arena, limo y arcilla)..... 38

Tabla 8. Capacidad de campo en cada uso del suelo. 40

Tabla 9. Análisis comparativo de rangos múltiples entre los usos del suelo. 42

Lista de apéndices

Pág.

Apéndice A. Descripción detallada de las coberturas en la zona de estudio. 51

Apéndice B. Distribución espacial de muestras en los usos de suelo. 53

Resumen

Título: Análisis del efecto del cambio del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en el Páramo de Berlín (Santander)[*]

Autores: Willy Javier Alba Armesto, Javier Ricardo Salazar Aceros[**]

Palabras Claves: páramo, propiedades hidrofísicas, agricultura, uso del suelo.

Descripción

El páramo ofrece servicios ecosistémicos fundamentales como el abastecimiento del recurso hídrico aprovechados por poblaciones que dependen de sus afluentes. En Colombia el páramo provee de agua al 70% de la población del país, no obstante, más del 50% de las áreas de páramo han sido intervenidas con prácticas agrícolas intensivas, lo cual puede ser una amenaza para el recurso hídrico. Por lo tanto, esta investigación localizada en el páramo de Berlín, complejo de páramo Santurbán (Colombia), busca estudiar el efecto que ocasiona el cambio del uso de suelo de páramo transformado a cultivos, mediante el análisis de algunas las propiedades hidrofísicas del suelo: humedad, materia orgánica, porosidad, capacidad de campo, pH y textura.

El proyecto ejecutado de enero a mayo del 2020 consistió en la identificación, muestreo y análisis de seis usos de suelo. Para ello primero, se identificaron los usos de suelo, luego se procedió a la recolección de 24 muestras en cuatro monitoreos cada tres semanas por uso de suelo. Posteriormente, se realizó un análisis estadístico descriptivo de cada propiedad cuantificada previamente y se comparó mediante ANOVA y la prueba de Tukey las diferencias entre usos.

Se observó que la transformación de los usos de suelo de zona nativa a zonas agrícolas, generan cambios significativos en las propiedades del suelo evaluadas como: aumento del pH del suelo hasta en 1.7 unidades, disminución en el contenido de humedad (>20%), disminución en la capacidad de campo (38.5%), pérdida de materia orgánica (> 7%) y disminución de la porosidad (10%), alterando posiblemente la capacidad del suelo para regular y retener el agua.

[*] Trabajo de grado

[**] Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Ingeniera Sanitaria, MSc, PhD. Codirector: Sebastián Elías Patiño Gutiérrez, Ingeniero Civil.

Abstract

Title: Analysis of the effect of land use change on its hydrophysical properties in the Páramo de Berlín (Santander)[*]

Authors: Willy Javier Alba Armesto, Javier Ricardo Salazar Aceros[**]

Keywords: Paramo, hydrophysical properties, agriculture, land uses.

Description

Páramos provide fundamental ecosystem services associated with the production of water resources used by populations that depend on water sources descending from this ecosystem. In Colombia, páramos supply water to 70% of the country's population, however, more than 50% of páramo areas are under intensive agriculture, which can threat water resources. Therefore, this research located in the Berlin páramo, Santurbán complex (Colombia), aims to study the effect caused by the change of natural cover to agriculture, by a comparative analysis of the hydrophysical properties of the soil: moisture, organic matter, porosity, field capacity, pH and texture.

The project was carried out from January to May 2020, and consisted in the identification of six land uses distributed in two hydrological units. Subsequently, 24 samples were collected in four monitoring sessions for each land cover, then, a descriptive statistical analysis of each previously quantified property was carried out and the behavior between uses was compared by using ANOVA and the Tukey test.

It was observed the transformation of land uses from native to agricultural areas generates significant changes in the hydrophysical properties of the soil, such as an increase in pH on 1.7 units, decrease in moisture content (>20%), reduction of field capacity (38.5%), organic matter loss (>7%), and decrease in porosity (10%), altering the ability of the soil to regulate and retain water.

[*] Degree work

[**] Faculty of Physic-mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Sanitary Engineer, MSc, PhD. Co-director: Sebastián Elías Patiño Gutiérrez, Civil Engineer.

Introducción

Los páramos son unidades ecológicas que se encuentran en constante transformación debido a las diferentes realidades socioculturales y a procesos biogeofísicos donde interactúan el suelo, el clima, la vegetación y el agua. (Morales & otros., 2007)

El ecosistema de páramo posee un factor esencial en la capacidad de retener grandes volúmenes de agua y controlar el flujo hídrico a través de sus cuencas hidrográficas, el suelo. Este posee características físicas y químicas particulares, como alta porosidad, baja densidad aparente, gran acumulación de materia orgánica y alta humedad, las cuales son sensibles a los cambios del uso del suelo. (P.Mena. & Medina, 2000)

El suelo de páramo durante milenios ha sido un medio donde comunidades humanas extraen sus recursos para subsistir, sin embargo en las últimas décadas ante el aumento y desarrollo de actividades antrópicas, se ha acelerado los procesos de transformación y degradación en el suelo (Morales-Betancourt & Estévez-Varón, 2006), reflejado en una erosión acelerada, desprendimiento de tierra y degradación de las cuencas hidrográficas (P.Mena. & Medina, 2000).

Una manera de evaluar el efecto de las actividades antrópicas sobre el suelo es mediante el estudio de las propiedades hidrofísicas del suelo tales como capacidad de campo, materia orgánica, humedad, pH, porosidad y textura, las cuales describen la interacción entre la masa de suelo y el agua (Godoy & Medina, 2019). En la cordillera andina, se han realizado diferentes investigaciones sobre las propiedades hidrofísicas del suelo en páramos, (Estupiñán, Gómez, Barrantes, & Limas, 2009)- (Hofstede R. , “Los servicios del ecosistema páramo: una visión desde la evaluación de

ecosistemas del milenio.", sf). Estos estudios describen el impacto de los cambios de uso del suelo en la hidrología del páramo.

En Colombia, el complejo de páramos de Santurbán (142,610 ha) abastece de agua a regiones de Santander y Norte de Santander, en el cual se encuentra el páramo de Berlín (44,272 ha) (Agudelo Restrepo & otros, 2007), área de estudio del presente proyecto. El objetivo principal de esta investigación es analizar el efecto en el cambio del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas. Para esto en un periodo seco del 2020 se requirió cuantificar un conjunto de propiedades hidrofísicas del suelo en usos de suelo seleccionados y comparar estadísticamente las diferencias en las propiedades hidrofísicas del suelo en los principales usos.

El proyecto se dividió en tres fases que comprenden: empalme de trabajo donde se reconoce los usos del suelo en las unidades hidrológicas, monitoreo y cuantificación de las propiedades hidrofísicas del suelo, donde se recolectaron muestras de los diferentes usos de suelo en el área de estudio y análisis de resultados que comprende la comparación estadística y descriptiva entre los usos de suelo con el fin de determinar diferencias entre las propiedades de cada uso.

Este trabajo de grado está enmarcado en el proyecto de investigación adelantado por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander: "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)".

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar el efecto del cambio del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en ecosistema de páramo, tomando como caso de estudio el páramo de Berlín (Santander).

1.2 Objetivos específicos

1. Cuantificar un conjunto de propiedades hidrofísicas del suelo en usos del suelo seleccionados en ecosistema de páramo por un periodo seco.

2. Comparar estadísticamente las diferencias en las propiedades hidrofísicas del suelo en los principales usos.

2. Marco teórico

2.1. Páramo

Los páramos son ecosistemas complejos, diversos y esenciales. Se ubican en Suramérica a lo largo de la cordillera de los Andes entre los 3,000 y 4,800 metros sobre el nivel del mar (msnm), extendiéndose discontinuamente desde Mérida en Venezuela hasta la depresión de Huancabamba en Perú y aisladamente en la Sierra Nevada de Santa Marta con un área aproximada de 35,000 km² (Llano, 1990). Estos ecosistemas de páramo se encuentran entre el límite superior de bosque andino y el límite inferior glacial. Son considerados biomas exclusivos de las montañas neotropicales e importantes centros de flora y fauna esenciales en la prestación de servicios ecosistémicos en especial el almacenamiento y regulación del recurso hídrico para poblaciones dependientes de sus afluentes (Hofstede R. , “Los servicios del ecosistema páramo: una visión desde la evaluación de ecosistemas del milenio.”, sf).

El surgimiento del páramo data en el levantamiento final de la cordillera de los Andes hace cinco millones de años (Llano, 1990), y consiste de valles y llanuras que en su mayoría son glaciares con lagos y praderas húmedas amalgamadas con matorrales y bosque de baja altura (Von Rothkirch & Ruiz, 1996). El ecosistema de páramo se encuentran entre límites altitudinales que dependen de múltiples factores de la región como la posición geográfica, la latitud, la topografía, historia geológica y evolutiva, así como factores climáticos y actividades antrópicas (Morales-Betancourt & Estévez-Varón, 2006).

2.2. Páramos en Colombia

En Colombia existen 1’925.410 hectáreas de ecosistema de páramo distribuidas en las tres cordilleras y aisladamente en la Sierra Nevada de Santamarta. Santander es el tercer departamento con mayor extensión de páramo en el país (9.4%) (Ministerio de Ambiente, 2001), donde está ubicado el complejo de jurisdicciones de Santurbán (3,000-4,290 msnm) (Daza, Hernández, & Alba, 2014). En términos generales, los páramos de Colombia son áreas altas, fría, húmedas, nubladas en los cuales se reconocen tres grandes franjas altitudinales: subpáramo, páramo medio y el Superpáramo (Tabla 1). Estas franjas poseen características particulares que dependen de la interacción de distintos factores como el clima, el suelo, la flora y la biodiversidad de los páramos (Rivera & Rodríguez, 2011).

Tabla 1.

Características de las coberturas vegetales según las franjas altitudinales.

Franja (msnm)	Características
Altoandina (3000-3200)	Comprende vegetación cerrada de bosques de la media montaña y vegetación abierta de matorrales y pajonales de la parte alta.
Subpáramo (3200-3500) < 9 °C	Presenta vegetación arbustiva con bosque bajo y en general una especie del género Arcythophyllum
Páramo medio (3500-4100) < 6 °C	Presenta formación arbustiva con frecuencia más abierta. Llamado también Páramo de gramíneas; predominan los frailejones, los pajonales y los chuscales.

Tabla 1. *(Continuación)*

Franja (msnm)	Características
Superpáramo (4100-4800) < 3 °C	La cobertura vegetal disminuye y es discontinua, se aprecia roca desnuda superficial. La vegetación más común es de tipo prado que tiende a variar según el tipo de cordillera.

Nota: (Morales & otros., 2007), (Rivera & Rodríguez, 2011)

2.2.1. Clima del páramo

El páramo presenta un clima tropical de alta montaña con altas fluctuaciones en la temperatura entre el día y la noche (Hofstede, Segarra, & Vásconez, Los páramos del mundo: Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. UICN ; , 2003). La baja temperatura media diaria, baja presión atmosférica, escasa densidad del aire, alta radiación solar, baja temperatura, alta nubosidad y poca evapotranspiración son condiciones climáticas típicas de los páramos (Díaz.G, Navarrete. G, & Suárez L, 2005). El clima particular de estos ecosistemas donde las lloviznas son frecuentes clasifica al páramo según sus precipitaciones anuales, en páramo seco (<1,200 mm), páramo húmedo (1,770-2,350 mm) y páramo super húmedo (2,950-3,500 mm) (Díaz.G, Navarrete. G, & Suárez L, 2005) y divide su distribución multianual de precipitaciones en seca y húmeda, de tipo monomodal o bimodal. El páramo de Berlín (600-1,000 mm) es un páramo seco bimodal (Llorente Bousquets & Morrone, 2001). La variabilidad de las condiciones climáticas además de depender de las precipitaciones, también se relaciona con las variaciones en temperatura. Según el carácter estacional en que se encuentre, a lo largo del día las temperaturas pueden alcanzar extremos de

20°C hasta temperaturas bajo cero. Además, la temperatura media en las franjas altitudinales del páramo es menor a mayor altura siendo inferiores a 9°C en el subpáramo (Morales & otros., 2007).

2.2.2. Suelos de páramo

La distribución de los suelos en los páramos depende de factores como el clima, el relieve, los organismos y el material parental (Morales & otros., 2007). Estos suelos se distinguen por la alta porosidad, baja densidad aparente, consistencia friable y capacidad de drenaje que dan como resultado una conductividad hidráulica alta y una capacidad de retención de agua muy alta (Daza, Hernández, & Alba, 2014).

En los páramos de la cordillera central y occidental, los suelos se han desarrollado a partir de la intemperización de cenizas volcánicas que junto a las condiciones climáticas y el tiempo han sido esenciales en el proceso de formación de sus suelos (Centro de Enseñanza e Investigación del IICA, 1969). En la cordillera oriental los suelos se han desarrollado sobre rocas calcáreas sin cenizas y por lo general del orden de entisoles, inceptisoles y histosoles (Llano, 1990). Estos suelos se caracterizan por ser de color negro, ácidos; con pH entre 3.9 y 5.4; ricos en material orgánico que se descompone lentamente por las bajas temperaturas y alta humedad formando gruesas capas de suelo (Díaz.G, Navarrete. G, & Suárez L, 2005). La estructura granular estable de estos suelos brindan alta porosidad, por ende, buena infiltración con altos valores de conductividad hidráulica, creando un efecto de esponja favorable en la retención y regulación de agua, además dando resistencia a la erosión (P.Mena. & Medina, 2000). En el páramo de Santurbán, los suelos en general son muy superficiales, limitados por roca franco-arcillosa, excesivamente drenados y con fertilidad natural muy baja (Morales & otros., 2007).

2.2.3. Vegetación del páramo

Las extremas condiciones climáticas, la topografía y el suelo de páramo han desarrollado en la vegetación características fisiológicas para adaptarse como cubiertas de pelos en hojas (capta el agua del roció), rosetas (resiste frio y vientos), hojas coriáceas (reduce perdida de agua por transpiración), permanencia de hojas muertas en tallos (almacena agua y atrapa residuos orgánicos), y tejidos acuíferos para mantener el equilibrio hídrico, entre otras (Díaz.G, Navarrete. G, & Suárez L, 2005). En el complejo de páramos de Santurbán se aprecian 253 especies de plantas entre espermatofitas y criptógamas, siendo las angiospermas la especie más diversificada, (76%) y el género con mayor riqueza especifica la Lachemilla (10 spp) (Morales & otros., 2007) En las diferentes franjas altitudinales se pueden diferenciar varias zonas de vegetación (Tabla 1) que han sido descritas bajo la metodología de Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, de Bolòs, & Jo, 1979).

2.2.4. Hidrología del páramo

La hidrología del páramo es conocida por su alto y sostenido flujo base de agua. En el páramo se presentan precipitaciones verticales de bajas intensidades y precipitaciones horizontales como niebla y rocío, las cuales a través de la interceptación vegetal logran volúmenes importantes de agua al sistema hidrológico (Buytaert, De Bièvre, Wyseure, & Deckers, 2004). Por otro lado, las características de baja evaporación de la vegetación paramuna reducen el consumo natural de agua en el páramo, estimando la evapotranspiración con valores hasta de 1 mm dia-1 (Hofstede R. , 1995). Como resultado de la baja evapotranspiración, hay un gran excedente de agua que alimenta a los afluentes cercanos. La capacidad de regulación del agua se atribuye principalmente al clima, la topografía y los suelos. Las distribuciones equitativas de las lluvias durante el año, las bajas

temperaturas, el terreno accidentado de páramo y la estructura del suelo son responsables de la alta capacidad de sostener el flujo base (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2004).

2.3. Propiedades hidrofísicas en el suelo de páramo

Las propiedades hidrofísicas del suelo son una serie de variables que describen la interacción entre la masa de suelo y el agua, describiendo la capacidad y habilidad del suelo para transmitir agua (Llambi & Soto, 2012). Además, estas propiedades determinan en gran medida, el potencial de uso, donde se consideran características como permeabilidad, capacidad de infiltración, retención de humedad, estabilidad estructural, densidad aparente, densidad real, conductividad eléctrica, entre otras (Godoy & Medina, 2019).

La variabilidad de las propiedades hidrofísicas del suelo es influenciada por intervenciones antrópicas que se pueden estudiar a través de técnicas geoestadísticas con el fin de estimar y predecir el comportamiento de sus atributos (Jaramillo, Jaramillo, Restrepo, Sánchez, & Mejía, 2011). En los suelos de páramo algunas propiedades de interés son porosidad, textura, pH, humedad, capacidad de campo y contenido de materia orgánica (Instituto Colombiano Normas Técnicas y Certificación, 1997). En la Tabla 2 se definen estas propiedades de interés.

Tabla 2.

*Propiedades hidrofísicas del suelo***.**

Propiedad	**Definición**
Capacidad de campo	Contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo luego de saturarse y drenarse libremente.

Tabla 2. *(Continuación)*

Propiedad	Definición
Materia orgánica	Fracción de restos vegetales y animales que son descompuestos y reservados en el suelo.
Humedad	Cantidad de agua en relación con la masa o el volumen de suelo.
pH	Grado de acidez o basicidad de acuerdo con la concentración de iones de hidrógeno.
Porosidad	Espacio total entre poros aislados y el espacio ocupado por el agua en un suelo.
Textura	Distribución de las partículas del suelo (arena, limo, arcilla), expresada en porcentaje.

Nota: (Ramirez Carvajal, 1997), (Ruiz T. & Grillo F., 1975)

2.4. Efectos del uso del suelo sobre las propiedades hidrofísicas

El suelo de páramo se ha relacionado con diferentes servicios ambientales descritos en términos de producción, regulación y suministro (Buytaert, Iñiguez, & De Bièvre, “The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo,” , Oct. 2007). Sin embargo, la intensificación de los sistemas de producción agrícola ha ido desplazando el bosque alto andino, acelerando la degradación de los suelos en los ecosistemas naturales de páramo (Morales-Betancourt & Estévez-Varón, 2006). Cuando los suelos son sometidos a actividades como agricultura o ganadería, estos experimentan acomodamiento de los agregados, produciendo modificaciones en los espacios y vacíos, perdiendo su capacidad de infiltración, dificultando el flujo de agua y la toma de nutrientes de las plantas debido a la pérdida de humedad (Estupiñán,

Gómez, Barrantes, & Limas, 2009). La agricultura en particular, ocasiona una reducción en la cantidad de agua en el suelo; a medida en que las condiciones de los suelos originales van cambiando sus características físicas se ven afectadas notablemente, en especial las relacionadas con los procesos de captura, retención y almacenamiento de agua, que son en gran medida las funciones principales de los suelos de páramo. Así, al reemplazar muchas áreas de páramo por cultivos, se reduce su capacidad de regular el flujo hídrico (Crespo & otros., 2010).

En el páramo andino se han hecho estudios sobre el efecto de actividades antrópicas en las propiedades hidrofísicas del suelo (Ministerio de Ambiente, 2001), (ASTM International, 2010) mostrando que el cambio del estado natural a actividades agropecuarias en los ecosistemas de páramo genera impactos sobre el suelo que inciden directamente sobre la calidad del mismo y en el sistema integral paramuno (Godoy & Medina, 2019), (Daza, Hernández, & Alba, 2014), (Pinzón Pinto, 2016).

En el páramo de Guerrero (Pinzón Pinto, 2016) y en el páramo de Sumapaz (Daza, Hernández, & Alba, 2014) se ha observado que la retención de humedad disminuye ante el cambio del uso del suelo, presentando depreciación en la capacidad de almacenamiento en cultivo de papa respecto a vegetación natural en más del 5%. El uso de suelo con mayores cambios significativos en las propiedades hidrofísicas son el barbecho respecto a vegetación natural, el cual presenta valores altos de densidad aparente hasta de 1.34 Mg m-3 y valores bajos de porosidad hasta en un 20%.

La pérdida de contenido de materia orgánica en los páramos de Guerrero y Sumapaz fueron de 45 y 46.5% respectivamente en usos dedicados a actividades agrícolas con respecto al suelo con vegetación nativa (Daza, Hernández, & Alba, 2014), (Pinzón Pinto, 2016). Además, la humedad a capacidad de campo se redujo al cambiar el uso natural a cultivo de papa hasta en 31.8%,

probablemente por la preparación excesiva del terreno para la siembra (Crespo & otros., 2010). En los páramos de Guerrero y Sumapaz se encontró aumento en el pH de 1.5 y 0.5 respectivamente en cultivos de papa respecto a vegetación natural. Esto puede deberse al uso de cal en el desarrollo de cultivos lo que promueve la lixiviación de componentes como el aluminio (Estupiñán, Gómez, Barrantes, & Limas, 2009). Además de fertilizantes que alteran las características químicas de los suelos (Daza, Hernández, & Alba, 2014), (Pinzón Pinto, 2016).

3. Metodología

3.1. Zona de estudio

Este proyecto analizó seis usos de suelo, pertenecientes a un mismo tipo de suelo (Godoy & Medina, 2019). De tal forma que las diferencias observadas en las propiedades hidrofísicas del suelo, pueden atribuirse principalmente a los cambios en el uso del suelo (Godoy & Medina, 2019). La zona de estudio se ubica en el páramo de Berlín en el complejo de Santurbán, en el altiplano de la cordillera Oriental, en el departamento de Santander, al oriente de Colombia (ASTM International, 2010). Este páramo se caracteriza por estar en una zona atmosféricamente seca (precipitación promedio anual de 910 mm) con temperaturas variables según la época del año debido a la fluctuación diaria de la temperatura (Godoy & Medina, 2019).

Tabla 3.

Características de la unidad hidrográfica del páramo de Berlín.

Características	
Altitud (msnm)	3,380-3,570
Área (ha)	36.79
Perímetro (m)	5500
Temperatura media anual (°C)	2 - 10

Nota: (Godoy & Medina, 2019).

En la Tabla 4 se muestra la descripción de usos en las zonas de estudio. En el ANEXO A se detalla los usos del suelo observados.

Tabla 4.

Descripción de usos de suelo en la zona de estudio.

Uso del suelo	Pendiente promedio	Descripción
Vegetación nativa de páramo con baja pendiente	17%	Terreno con presencia de frailejones, pajonal y afloramientos rocosos, de suelo húmedo y color negro

Tabla 4. *(Continuación)*

Uso del suelo	Pendiente promedio	Descripción
Vegetación nativa de páramo con alta pendiente	60%	Terreno con presencia de arbustos, herbazales y frailejones dispersos, de suelo húmedo y color pardo oscuro
Arbusto denso	35%	Terreno con presencia de arbustos de suelo de alta humedad de color negro
Barbecho	12%	Terreno en pendiente, con cobertura de pasto, suelo color pardo oscuro
Cultivo de cebolla	12%	Terreno con presencia de cultivo transitorio de suelo moderadamente seco de color negro.
Cultivo de papa	12%	Terreno con presencia de cultivo de cebolla suelo moderadamente seco de color pardo

Nota: (Godoy & Medina, 2019).

Fases del proyecto

El proyecto se dividió en tres fases que corresponden a: i) Fase 1: empalme de trabajo y capacitación en el uso de equipos de campo y laboratorio; ii) Fase 2: monitoreo y cuantificación de propiedades hidrofísicas del suelo en usos presentes en el área de estudio, y iii) Fase 3: análisis de resultados.

3.2. Fase 1: empalme de trabajo y capacitación en el uso de equipos de campo y laboratorio.

En esta primera fase se realizaron dos salidas de campo junto al Grupo GPH para reconocer las unidades hidrológicas a estudiar mediante un recorrido que permitió observar los usos del suelo dominantes y las áreas de muestreo. Paralelamente, se recibió instrucción en el procedimiento y elementos empleados en la extracción de muestras de suelo (barreno manual). De igual forma, se conocieron los procedimientos para la realización de los ensayos, en el Laboratorio de investigación del grupo GPH en la Universidad Industrial de Santander.

3.3. Fase 2: Monitoreo y cuantificación de propiedades hidrofísicas del suelo en usos presentes en el área de estudio

Se monitorearon seis zonas que corresponden a los seis usos de suelo mencionados en la Tabla 4. Para ello, se recolectaron muestras de suelo en un diseño aleatorio discreto estratificado, siguiendo el protocolo de la Norma Técnica Colombiana (Instituto Colombiano Normas Técnicas y Certificación, 1997).

Se cuantificaron seis propiedades hidrofísicas del suelo (Tabla 2). Para esto, en cada zona se recolectaron dos muestras, obtenidas mediante barreno manual. En cada punto se tomaron tres profundidades (0-5, 10-15 y 20-25 cm), para un total de 36 muestras por campaña. Los especímenes de suelo fueron recolectados en cilindros de pared delgada de 100 cm^3 tipo Kopecky que permiten la conservación de la estructura natural. La elección de los puntos de muestreo fue completamente al azar en cada uso para que fuera representativa de cada zona. En cada punto de extracción de muestra de suelo se removió de forma manual los dos primeros centímetros de suelo para evitar sustraer materia vegetal directamente como hojas, raíces y tallos. Al instante, de la

extracción del anillo las muestras se taparon y guardaron dentro de bolsas herméticas todo dentro de un contenedor para evitar el daño debido al trasporte.

Para el análisis de las propiedades hidrofísicas se consideraron las normas establecidas por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM International). En la Tabla 5 se muestran los ensayos y normas para cada propiedad hidrofísica del suelo incluida en el estudio. La frecuencia de monitoreo fue cada veintiún días, durante tres meses, realizando un total de cuatro monitoreos.

Tabla 5.

Ensayos y normas para las muestras de suelo.

Variables	Norma ASTM	Referencia
Capacidad de campo	ASTM D1556-82	(ASTM International, 1992)
Humedad de suelo	ASTM D2216-10	(ASTM International, 2010)
Materia Orgánica	ASTM F1647-11	(ASTM International, 2011)
Porosidad	ASTM D7263-09	(ASTM International, 2011)
pH	ASTM D4972-01	(ASTM International, 2007)
Textura	ASTM D422-06	(ASTM International, 2002)

3.4. Fase 3: Análisis de resultados

Para el análisis de la información de las propiedades hidrofísicas se realizaron comparaciones estadísticas: descriptivas y gráficas; en las que se contrastaron directamente las propiedades en los muestreos de los usos del suelo en función de la profundidad. Por consiguiente, en los análisis estadísticos se utilizaron métodos de tendencia central que constan de medidas estadísticas que pretenden resumir en un único valor a un conjunto de datos (Daza, Hernández, & Alba, 2014). Por otro lado, las medidas de dispersión evalúan cuanto difieren los datos entre sí. De esta manera, estos tipos de medidas fueron usadas para describir un conjunto de datos entregando información acerca de la posición y la dispersión (Daza, Hernández, & Alba, 2014). Así mismo, se puede valorar si hay diferencias en las propiedades hidrofísicas entre los seis usos de suelo considerados. Paralelamente, se relacionaron los métodos estadísticos anteriormente mencionados mediante gráficos para visualizar y comparar la variabilidad de las propiedades hidrofísicas en función de los usos de suelo observados en la unidad hidrográfica.

Por otro lado, se realizó un análisis de varianza, que es una colección de modelos estadísticos y procedimientos con el cual se evaluó la varianza para cada variable (Gionet, 1963). Se empleó el análisis de varianza completamente al azar (ANOVA) para determinar si la media entre los usos del suelo era igual o, por el contrario, difería estadísticamente (Cuevas, Febrero, & Fraiman, Aug. 2004). Además, en el análisis se empleó un método que va de la mano con el análisis de varianza, la prueba de rango múltiple, con el método de Tukey con un nivel de significancia de 0.05, el cual crea intervalos de confianza para todas las diferencias en los usos de las unidades de muestreo en base a la media de las propiedades hidrofísicas (Canteri, Althaus, Virgens Filho, Giglioti, & Godoy, 2001).

4. Resultados y discusión

4.2. Clasificación de usos de suelo

La clasificación y descripción de los usos de suelo se hizo en un estudio previo (Godoy & Medina, 2019), donde se identificaron seis usos de suelos dominantes (Apéndice A). En la Tabla 6 se muestran los seis usos de suelo con su respectivo registro fotográfico.

Tabla 6.

Registro fotográfico de cada uso de suelo.

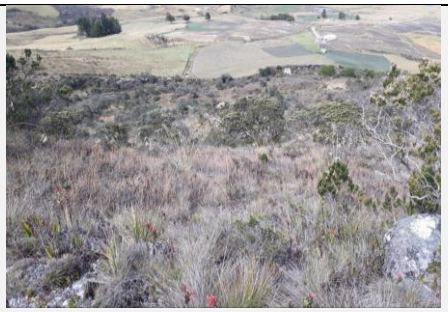
Vegetación nativa de páramo con baja pendiente	Vegetación nativa de páramo con alta pendiente
	
Arbusto denso	Barbecho

Tabla 6. *(Continuación)*

Arbusto denso	Barbecho
Cultivo de cebolla	Cultivo de papa

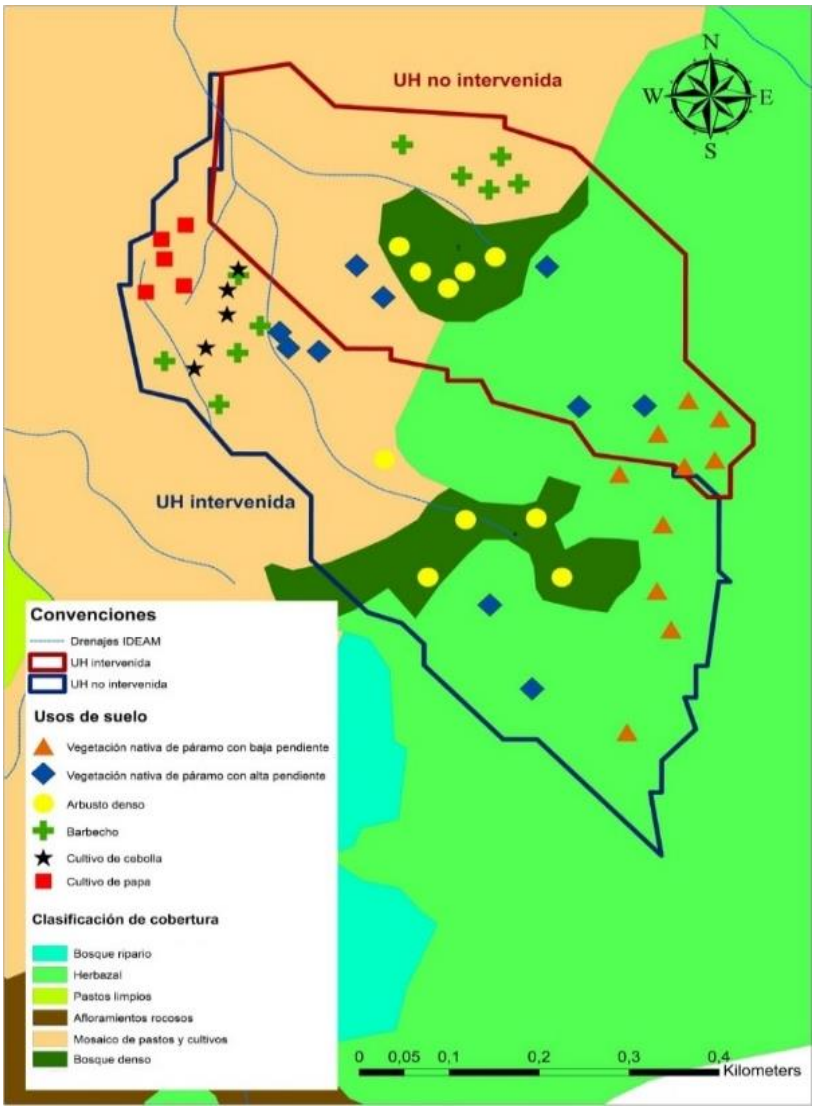
Nota: (Godoy & Medina, 2019).

4.3. Análisis de las propiedades hidrofísicas en el suelo

En la Figura 1 se observa la distribución espacial de los puntos en que fueron recolectadas las muestras de suelo, georreferenciados mediante la aplicación Avenza Maps (https://www.avenzamaps.com/index.html) y procesados en el programa ArcGIS (https://esri.co/). En el Apéndice B se muestra el mapa de forma detallada.

Figura 1.

Distribución espacial de muestras.



Nota: UH: Unidad hidrográfica. Aunque el estudio general incluye clasificación por unidades hidrológicas, no se encuentra en la escala de análisis de este proyecto.

4.4. Humedad del suelo

En la Figura 2 se observa el comportamiento del contenido de humedad del suelo bajo sus diferentes usos. El bosque denso y la vegetación natural de baja y alta pendiente poseen un

contenido de humedad aproximado de 48%. Esta semejanza puede ocurrir por el contenido de materia orgánica similar (pieza clave en el almacenamiento y retención del agua en el suelo) entre usos; (Figura 3) (Buytaert & otros., "Human impact on the hydrology of the Andean páramos,", 2006). El contenido de humedad en el páramo de Berlín fue análogo al encontrado en el páramo de Sumapaz (50%) (Daza, Hernández, & Alba, 2014), que posee similar cantidad de materia orgánica aunque estructura del suelo diferente. (Morales & otros., 2007)

El carbono contenido en la materia orgánica es un factor importante en el almacenamiento de la humedad, éste participa activamente en los procesos de estabilidad estructural de los suelos a fin de mantener el balance hídrico (Llambi & Soto, 2012). En los usos de vegetación nativa y bosque denso, el contenido de humedad disminuyó con la profundidad (p.ej. en vegetación natural de baja pendiente 59%, 50% y 32% a 0-5, 10-15 y 20-25 cm, respectivamente). Esta reducción puede presentarse por disminución en profundidad de materia orgánica, lo que disminuye la porosidad del suelo y por ende la humedad del mismo (Zúñiga, y otros, 2018).

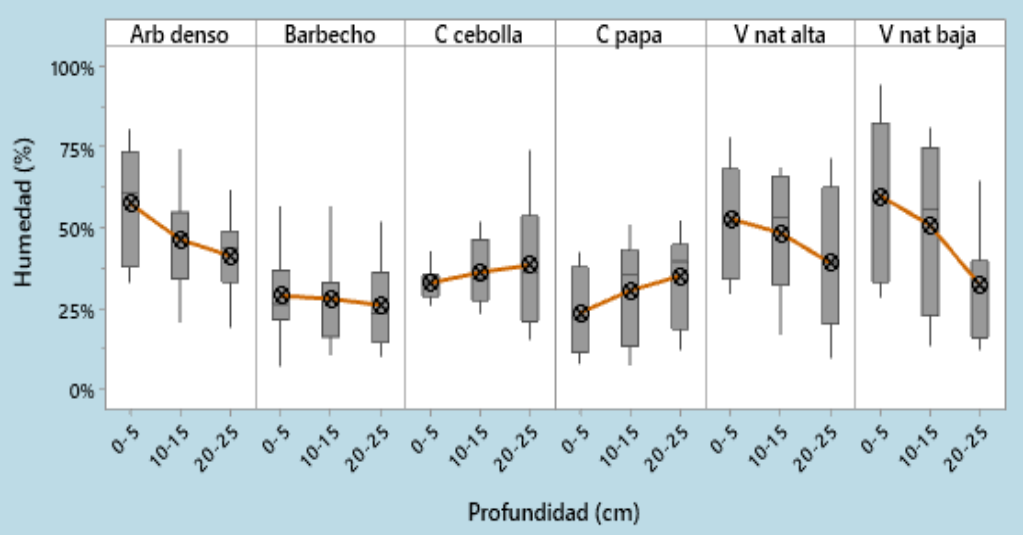
En general, los cultivos y barbecho poseen un menor porcentaje de humedad que la vegetación natural y bosque denso en más del 10%. Esta disminución puede ocurrir por las actividades agrícolas que aumentan el drenaje, impactando en el ciclo del agua. El drenaje produce suelos más secos, que a su vez puede aumentar la escorrentía y la erosión (Buytaert & otros., "Human impact on the hydrology of the Andean páramos,", 2006). Por otra parte, se evidencia que la diferencia entre todos los usos del suelo no es mayor del 18% en contenido de humedad, esto se debe a la topografía y vegetación que tiene cada uso (Estupiñán, Gómez, Barrantes, & Limas, 2009).

Los usos de suelo evaluados pueden ser influenciados por los factores que forman el suelo. La vegetación y el clima son factores importantes en la retención de humedad del suelo. Estos

factores también pueden alterar los ambientes naturales del ecosistema, como las altas temperaturas y los fuertes vientos causando pérdidas de humedad y erosión del suelo (Llambi & Soto, 2012).

Figura 2.

Contenido de humedad por uso del suelo y profundidad.



Nota: V nat baja: vegetación nativa de páramo con baja pendiente; V nat alta: vegetación nativa de páramo con alta pendiente; Arb denso: arbusto denso; Barbecho: barbecho; C cebolla: cultivo de cebolla; C papa: cultivo de papa.⊗: media; –: mediana.

4.5. Contenido de materia orgánica

Los suelos con vegetación natural de baja pendiente y bosque denso en páramo presentaron un contenido de materia orgánica más alto respecto a otros usos de suelo hasta en 7% (Figura 3), esta diferencia posiblemente sucede por las bajas temperaturas que ralentizan los procesos de formación de humus y mineralización de restos orgánicos en la vegetación nativa haciendo que la

materia orgánica tienda a acumularse (Morales & otros., 2007). Los valores de vegetación natural estuvieron cercanos al 19%, semejante a los reportados en el páramo de Sumapaz (18%) (Daza, Hernández, & Alba, 2014) y levemente inferiores a los del páramo de Guerrero (22.4%) (Pinzón Pinto, 2016).

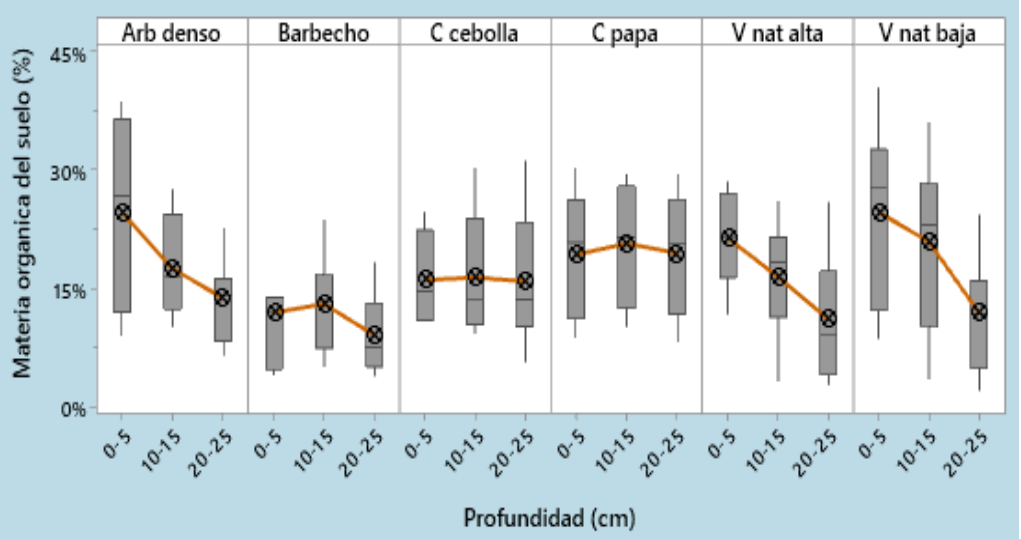
En el uso de vegetación natural se observó un aumento de materia orgánica a menor profundidad debido a la baja disponibilidad de biomasa, obtenida de la vegetación a mayor profundidad (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, sf). A diferencia del suelo intervenido de cultivo de papa y cebolla, donde la materia orgánica varía poco en profundidad, probablemente por la preparación de la siembra con la labor de arado (25-30 cm) que distribuye la materia orgánica de manera uniforme (Union de Organizaciones Campesinas de Cotopaxi, 2007).

La pérdida de materia orgánica del suelo en los primeros cinco centímetros de barbecho respecto a bosque denso estuvo alrededor del 14%. Esta reducción se debe posiblemente a la pérdida de nutrientes y materia orgánica durante su etapa productiva en barbecho (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, sf). Siendo el barbecho el uso con menor materia orgánica (<15%) respecto a los otros usos de suelo, sin embargo, mayor que lo reportado en el páramo de Sumapaz (9%) (Daza, Hernández, & Alba, 2014).

El cultivo de papa posee un contenido de materia orgánica 7% mayor al encontrado en el páramo de Guerrero (Pinzón Pinto, 2016), posiblemente por el poco tiempo de uso para cultivo de la cobertura del páramo de Berlín con respecto al páramo de Guerrero, o también se puede deber a la aplicación de fertilizantes que mejoran las propiedades químicas del suelo (Muñoz & Lucero, 2008).

Figura 3.

Materia orgánica por uso del suelo y profundidad.



Nota: V nat baja: vegetación nativa de páramo con baja pendiente; V nat alta: vegetación nativa de páramo con alta pendiente; Arb denso: arbusto denso; Barbecho: barbecho; C cebolla: cultivo de cebolla; C papa: cultivo de papa. MOS: materia orgánica del suelo. ⊗: media; –: mediana.

4.6. Porosidad total

En la Figura 4 se observa que la porosidad disminuye a medida que la profundidad aumenta. Sin embargo, el comportamiento del barbecho es opuesto (aumenta la porosidad con la profundidad), similar a lo observado en las áreas cultivadas, por lo que se puede suponer que fue cultivada en algún momento (Godoy & Medina, 2019). Cabe mencionar que los barbechos tienen una porosidad baja (53%) con respecto a arbusto denso, esto se debe a que el suelo estuvo influenciado por las actividades antrópicas (Estupiñán, Gómez, Barrantes, & Limas, 2009). Adicionalmente, el suelo de barbecho se degrada y tarda en recuperarse por diversos factores

edáficos como: la baja disponibilidad de nutrientes, alta acidez y bajas temperaturas (Pinzón Pinto, 2016).

En la vegetación nativa en baja pendiente se registró un valor de porosidad de 57% variando en 1% con la vegetación nativa en alta pendiente. Al cambiar el uso del suelo los valores de porosidad decrecen hasta en un 7% en el barbecho, siendo los suelos de descanso los más bajos. Esta disminución puede ser una de las causas de los problemas de erosión que se presentan en la zona, ya que al reducir la porosidad se ve afectada la velocidad de infiltración, lo que puede llevar al predominio de la escorrentía (Daza, Hernández, & Alba, 2014).

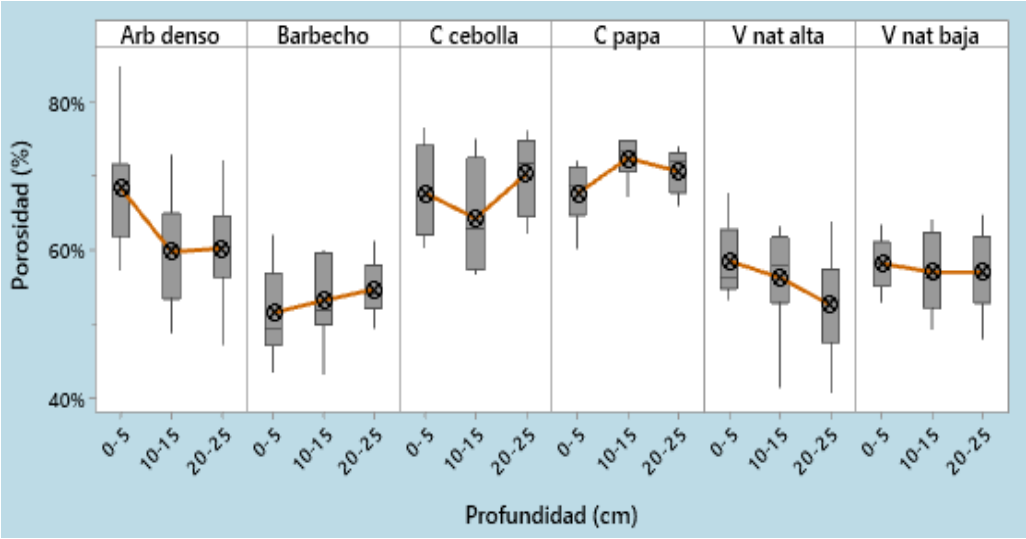
En la zona de cultivos se observan valores altos de porosidad en el cultivo de papa de 67% y en el cultivo de cebolla de 70%, esto hace referencia al cambio de la estructura del suelo debido a las actividades culturales constantes, como la labranza (Daza, Hernández, & Alba, 2014). Las prácticas de labranza afectan los procesos hidráulicos del suelo como: la permeabilidad, la relación de vacíos y la estructura del suelo (Strudley, Green, & Ascough, 2008). Cabe mencionar, que los suelos de páramos poseen alto contenido de materia orgánica y alta porosidad, lo cual indica que si se destruye la materia orgánica puede verse afectada la porosidad y así ocurrir la degradación estructural de los suelos a través de la labranza y la compactación mediante el proceso de erosión (Buytaert, y otros, 2008).

Adicionalmente, en la zona de arbustos densos la capa superficial presenta alta porosidad (63%), debido a la presencia de cobertura vegetal, este factor desarrolla un papel importante en el suelo en el proceso de erosión al protegerlo del impacto de la lluvia, mejora su estructura, aumenta la porosidad y su capacidad de infiltración, reduciendo el escurrimiento superficial y las pérdidas por arrastre (Buytaert & otros., “Human impact on the hydrology of the Andean páramos,”, 2006).

Los resultados de porosidad en cultivo de papa estuvieron alrededor del 66%, similares a los encontrados en los páramos de Sumapaz (Daza, Hernández, & Alba, 2014), Animas y Piedra de león (Diaz, Paz, Amezquita, & Rivera, s.f.): 59%, 63% y 56 %, respectivamente. Esta semejanza puede darse debido a la similitud en las caracteristicas del suelo. (Morales & otros., 2007)

Figura 4.

Porosidad total por uso del suelo y profundidad.



Nota: V nat baja: vegetación nativa de páramo con baja pendiente; V nat alta: vegetación nativa de páramo con alta pendiente; Arb denso: arbusto denso; Barbecho: barbecho; C cebolla: cultivo de cebolla; C papa: cultivo de papa.⊗: media; –: mediana.

4.7. Potencial de Hidrógeno

En la Figura 5 se observa que el pH es variable de acuerdo al uso del suelo, tomando un rango promedio de 4.2 a 5.9 en todas las zonas, similar a los encontrados en páramos de Ecuador donde el valor promedio de pH se encuentra en el rango de 3.9 a 5.8 (Buytaert, De Bièvre,

Wyseure, & Deckers, 2004). Se observa que el cultivo de cebolla tiene un pH mas alto (5.9 pH) en comparación al de los demas usos y es mayor en mas del 1.7 respecto a bosque denso, esto sucede posiblemente por la aplicación de material alcalinizante y fertilizantes para neutralizar la acidez del suelo (Pinzón Ramírez, 2004), ya que la cebolla necesita un pH entre 6 y 7 para su óptima producción (Pinzón Ramírez, 2004).

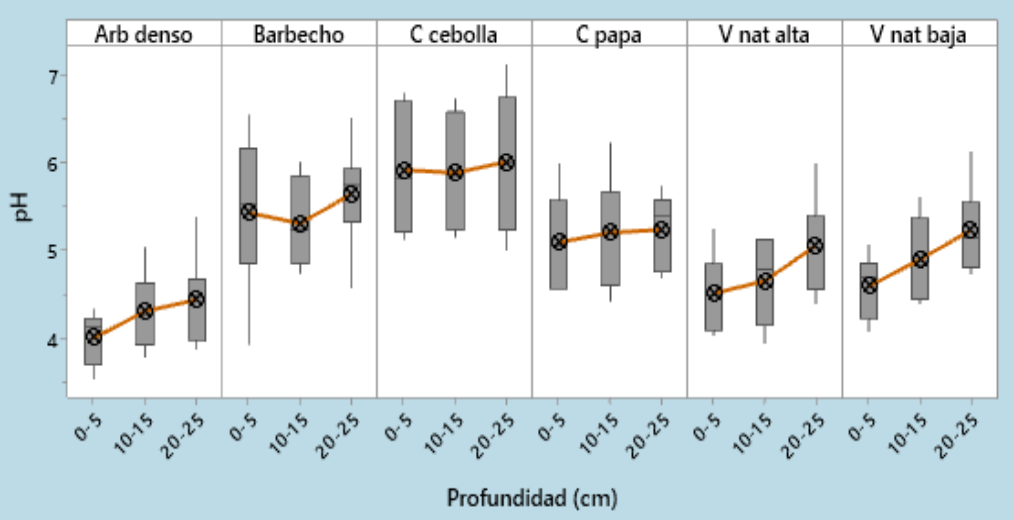
La vegetacion natural y bosque denso presenta pH mas ácido respecto a barbecho, cultivo de papa y cebolla con valores que varian entre 4.2 y 5.9. En la zona arbustiva densa se encontró el pH más bajo en comparación a los otros usos de suelo, esto puede darse por los altos niveles de concentracion de Aluminio atribuidos a factores edafogéneticos y orgánicos (P.Mena. & Medina, 2000). En el suelo de barbecho el pH aumentó en más de 0.5 respecto a la vegetacion natural y bosque denso, posiblemente se deba a quemas o fertilizantes que incrementan el pH del suelo para mejorar la fertilidad del suelo cultivable (Cuesta, 2013).

En la zona de estudio el pH aumentó 0.4 en cultivo de papa respecto a vegetacion natural, semejante a lo ocurrido en el páramo de Sumapaz (0.5) (Daza, Hernández, & Alba, 2014). Esto puede presentarse por practicas agricolas como el encalado en el suelo de cultivo,

que incrementa la disponibilidad de fósforo, potasio y molibdeno. Además promueve la lixiviacion de aluminio aumentando los niveles de pH para mejorar la produccion de papa (Montaldo & Agricultura, 1984).

Figura 5.

Potencial de hidrogeno por uso del suelo y profundidad.



Nota: V nat baja: vegetación nativa de páramo con baja pendiente; V nat alta: vegetación nativa de páramo con alta pendiente; Arb denso: arbusto denso; Barbecho: barbecho; C cebolla: cultivo de cebolla; C papa: cultivo de papa.⊗: media; –: mediana.

4.8. Textura

La textura del suelo es una de las propiedades más importantes, esta no puede cambiarse a menos que se incurra en grandes costos y esfuerzos. Posee gran influencia en los procesos físicos químicos y biológicos, como el movimiento de agua a través del suelo, resistencia del suelo y fertilidad natural (Ruiz O., Martinez I., & Figueroa C., 2015).

En la Tabla 7 se muestra que en la zona de estudio la textura se divide en dos clases texturales. Las zonas nativas y barbecho fueron franco arenosas, mientras las zonas de arbustos densos y cultivos tanto de papa y de cebolla fueron francos arcillosos. Las zonas franco-arenosas son suelos frágiles y susceptibles a cualquier tipo de alteración, como fácil compactación en las capas superficiales debido a su contenido de humedad y a la alta porosidad. Esta textura al tener mayor aireación promueve la mineralización de la materia orgánica, produciendo mayor cantidad

de nitrógeno mineral lo que disminuye los niveles de pH y aumenta la productividad de la biomasa vegetal (Lacasta Dutoit, Benítez Gilabert, Maire, & Meco, 2006).

Los suelos franco arcillosos, a diferencia de los suelos franco arenosos tienden a poseer más actividad microbiana, lo que causa aceleración en la descomposición de los residuos vegetales (Cañón-Cortázar, Avellaneda-Torres, & Torres-Rojas, 2012). Además, estos suelos al tener menos nitrógeno mineral poseen pH más básicos (Lacasta Dutoit, Benítez Gilabert, Maire, & Meco, 2006).

Tabla 7.

Textura en cada uso del suelo (arena, limo y arcilla).

Zona	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Vegetación nativa de páramo con baja pendiente	60	23	18
Vegetación nativa de páramo con alta pendiente	69	19	13
Arbusto denso	41	28	32
Barbecho	62	27	12
Cultivo de cebolla	37	25	38
Cultivo de papa	40	28	32

Las zonas franco arcillosas de arbustos densos y de cultivos son más porosas que las zonas franco arenosas, lo que permite un mayor movimiento de agua, almacenamiento de agua y de nutrientes para la vegetación. (Ramirez Carvajal, 1997)

En el cultivo de cebolla el porcentaje de arcillas es mayor que el porcentaje de arenas, lo que puede aumentar el riesgo de erosión por viento que trae consigo desprendimiento de tierras y degradación de las cuencas hidrográficas. (P.Mena. & Medina, 2000)

En el suelo con vegetación natural en el páramo de Berlín se encontraron arenas 45% mayor y arcillas, 12% menor a las encontradas en el páramo de Sumapaz (Daza, Hernández, & Alba, 2014), estas marcadas diferencias probablemente se deben a características edafogénicas del suelo (Morales & otros., 2007). Paralelamente, respecto a cultivos de papa en ambos páramos los valores de textura fueron similares, probablemente por los estandarizados procedimientos que requiere el suelo para su óptima producción (Muñoz & Lucero, 2008).

4.9. Capacidad de campo

En la Tabla 8 se muestra que la capacidad de campo en la zona de vegetación nativa en alta pendiente presenta el valor más alto, con un 68% comparado al de todos los usos del suelo, seguido de la zona de arbustos densos con un valor del 58%, lo que implica que estos suelos pueden retener cantidades altas de agua después del drenaje del agua libre. La succión con la que el suelo retiene el agua es de 33 KPa. Sin embargo, conforme el suelo se va secando, cada vez es mayor la fuerza que se necesita para extraer más agua. Esto es debido a que el agua se adhiere a las partículas del suelo con mucha fuerza (Llambi & Soto, 2012).

Estudios señalan que la reducción en la capacidad de retención de agua equivale a una reducción en el almacenamiento de agua disponible (Díaz.G, Navarrete. G, & Suárez L, 2005), (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2004) (Pinzón Pinto, 2016). Esto solo es verdad cuando la retención de agua a capacidad de campo baja más que la retención de agua al punto de marchitez permanente (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2004). En este caso, la retención de

humedad está fuertemente influenciada por la estructura del suelo y la distribución del tamaño de poros, en la cual, exhibe degradaciones más fuertes que la retención en el rango más alto de succiones (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2004). Por otro lado, la compactación de los suelos derivados de cenizas volcánicas disminuye los macroporos, pero aumentan la cantidad de poros capilares donde reside el agua capilar (Lazo, Mosquera, McDonnell, & Crespo, 2019).

Tabla 8.

Capacidad de campo en cada uso del suelo.

Zona	Capacidad de Campo
Vegetación nativa de páramo con baja pendiente	47.9%
Vegetación nativa de páramo con alta pendiente	67.6%
Arbusto denso	58.2%
Barbecho	52.3%
Cultivo de cebolla	29.1%
Cultivo de papa	35.1%

En los cultivos se presentaron los valores más bajos de capacidad de campo, siendo el cultivo de cebolla el más bajo con 29%, posiblemente por la textura franco arcillosa del suelo (Yagüe & Ministerio de Agricultura, 2003). La vegetación nativa por el contrario posee una capacidad de campo 39% mayor. Esta diferencia se puede atribuir al decrecimiento del drenaje interno ocasionado por actividades realizadas en la preparación excesiva del terreno (Poulenard, Podwojewski, & Herbillon, 2003). El arado es una actividad que puede ocasionar aumento de

erosión y disminución en capacidad de retener agua, así mismo, reducción en la fertilidad del suelo y el desarrollo de la vegetación natural (Daza, Hernández, & Alba, 2014).

La vegetación natural y el bosque de arbusto denso poseen los más altos porcentajes de capacidad de campo respecto a cultivos y barbecho, esto posiblemente es gracias al alto contenido de materia orgánica (Ramirez Carvajal, 1997). Según Buytaert (Buytaert, Iñiguez, & De Bièvre, "The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo," , Oct. 2007), el contenido de carbono orgánico y la retención de agua tienen una alta correlación. Por lo tanto, un mayor contenido de materia orgánica parece ser el factor más importante en el proceso de retención de humedad en el suelo (Buytaert, Iñiguez, & De Bièvre, "The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo," , Oct. 2007). No obstante, cuando el contenido de materia orgánica es bajo, la estructura del suelo se degrada y se favorece la erosión (Buytaert & otros., "Human impact on the hydrology of the Andean páramos,", 2006).

4.10. Comparación estadística entre los usos del suelo

En la Tabla 9 se observa la media y la desviación estándar de las propiedades hidrofísicas evaluadas en cada uso del suelo. Igualmente, se observa la agrupación de Tukey entre medias con el fin de comparar las diferencias entre los tratamientos.

Para un nivel de significancia de 5%, la humedad del suelo posee diferencias estadísticamente significativas al comparar usos naturales respecto a usos intervenidos. La zona de arbusto denso es mayor en 20% y 19% respecto a barbecho y cultivo de papa ($p<0.01$), está diferencia puede ocurrir por prácticas agrícolas en usos intervenidos lo que aumenta el drenaje y deshidrata el suelo (Buytaert & otros., "Human impact on the hydrology of the Andean páramos,", 2006).

La porosidad (Tabla 9) en vegetación natural es inferior a la encontrada en zonas de cultivo de papa y cebolla en 14.4% y 11.6% respectivamente. Esta diferencia puede deberse a los cambios estructurales que sufre el suelo al ser arado con fines agrícolas (Strudley, Green, & Ascough, 2008).

El pH en las zonas de arbusto denso y vegetación natural varió entre 4.2 y 4.9 a diferencia de los usos intervenidos con valores que rondaron entre los 5.2 y 5.9. Esta discrepancia significativa ($p<0.05$) pudo presentarse por tratamientos con cal u otros fertilizantes que aumentaron la basicidad del suelo con el fin de mejorar la producción en los cultivos (Montaldo & Agricultura, 1984). La mayor discrepancia significativa ocurrió entre arbusto denso y cultivo de papa, con valor p de 0.1%.

Tabla 9.

Análisis comparativo de rangos múltiples entre los usos del suelo.

Variables	**Usos del suelo**					
	Vegetación nativa de páramo con baja pendiente	Vegetación nativa de páramo con alta pendiente	Arbusto denso	Barbecho	Cultivo de cebolla	Cultivo de papa
Humedad de suelo (%)	47.4 ± 0.3^{A}	46.6 ± 0.2^{A}	48.5 ± 0.2^{A}	27.5 ± 0.1^{B}	35.7 ± 0.1^{AB}	29.6 ± 0.1^{B}
Materia Orgánica (%)	19.1 ± 0.1^{C}	16.2 ± 0.1^{CD}	18.5 ± 0.1^{C}	11.3 ± 0.1^{D}	16.1 ± 0.1^{CD}	19.7 ± 0.1^{C}
Porosidad (%)	57.3 ± 0.1^{G}	55.7 ± 0.1^{G}	62.7 ± 0.1^{F}	53.1 ± 0.1^{G}	67.3 ± 0.1^{EF}	70.1 ± 0.1^{E}

Tabla 9. *(Continuación)*

Variables	Usos del suelo					
	Vegetación nativa de páramo con baja pendiente	Vegetación nativa de páramo con alta pendiente	Arbusto denso	Barbecho	Cultivo de cebolla	Cultivo de papa
pH	4.9 ± 0.5^{J}	4.7 ± 0.5^{J}	4.2 ± 0.4^{K}	5.5 ± 0.6^{I}	5.9 ± 0.7^{H}	5.2 ± 0.5^{IJ}

Nota: Las letras en los superíndices significan las relaciones de igualdad entre medias de cada uso de suelo.

5. Conclusiones

A partir de la presente investigación se observa que el cambio del uso del suelo en el páramo de Berlín de estado natural a actividades antrópicas generó en los suelos del presente estudio, un impacto sobre las propiedades estudiadas (humedad, materia orgánica, porosidad, capacidad de campo, pH y textura). Es probable que estos cambios afecten la capacidad del suelo para regular y retener agua (Buytaert & otros., "Human impact on the hydrology of the Andean páramos,", 2006).

Los cambios de la vegetación natural a usos agrícolas posiblemente afectan la evapotranspiración y provocan cambios en las propiedades del suelo (Buytaert & otros., "Human impact on the hydrology of the Andean páramos,", 2006). El contenido de humedad fue una de las propiedades más afectadas por el cambio de uso de suelo nativo a intervenido, al disminuir hasta

en 20%. En materia orgánica no fue diferente, se encontraron porcentajes menores en más del 5%, en cultivo de cebolla y barbecho con respecto a vegetación natural y bosque de arbusto denso. Esta disminución del contenido de humedad y orgánico pueden generar reducción irreversible de la retención de agua en el suelo de paramo (Buytaert, Iñiguez, & De Bièvre, "The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo," , Oct. 2007).

La porosidad en los cultivos fue superior a la observada en los usos de suelo natural con valores hasta del 70%. Además, en los cultivos de papa y cebolla se presentaron los valores más bajos a capacidad de campo con respecto a vegetación natural de baja y alta pendiente en más del 12.8%, lo que puede afectar la permeabilidad del suelo, promover la erosión y disminuir la capacidad del almacenamiento hídrico (Daza, Hernández, & Alba, 2014).

Por otro lado, los resultados de la prueba de Tukey muestran diferencias significativas entre los usos de suelo intervenidos y naturales en pH y humedad. Los resultados encontrados en contenido de humedad muestran disminución de más del 10% en usos intervenidos con respecto a vegetación natural, así como incremento en el pH el cual fue superior a 0.4 en usos intervenidos respecto a usos naturales, lo que imposibilita el desarrollo de plantas nativas, amenazando el ecosistema de páramo (Ramirez Rodriguez, Duarte Colmenares, & Galeano Ardila, 2012). En general el impacto humano puede influir en las propiedades hidrofísicas del suelo en páramo, ocasionando deterioro de los ecosistemas de alta montaña, lo que afecta no solo a las poblaciones de fauna y flora presentes en estos ecosistemas, sino además a poblaciones humanas que se abastecen de sus recursos hídricos.

Referencias bibliográficas

Agudelo Restrepo, A. d., & otros. (2007). *Entorno natural de 17 ciudades de Colombia.*

ASTM International. (1992). *"ASTM D1556-82 field capacity,".* vol. 19, pp. 709–715, .

ASTM International. (2002). *"ASTM: D 422- 06, 'Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils 1,'"* pp. 1–8.

ASTM International. (2007). *ASTM, "pH of Soils 1,"* . vol. 01, no. 10, pp. 10–12, .

ASTM International. (2010). *"Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass:* . ASTM D 2216," no. November 1988, pp. 1–7, .

ASTM International. (2011). *"ASTM D7263-09 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil,"* . vol. i, pp. 1–7, .

ASTM International. (2011). *"ASTM F1647-11, Standard test methods for the organic matter content of the mixtures of the root zone of the athletic field,"* . ASTM Int., pp. 1–7, .

Braun-Blanquet, J., de Bolòs, O., & Jo, J. (1979). *Fitosociologia: bases para el estudio de las comunidades vegetales.* . H. Blume.

Buytaert, W., & et.al. (2006). *"Human impact on the hydrology of the Andean páramos,"* . Earth-Science Rev., vol. 79, no. 1, pp. 53–72.

Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2004). *"Hidrologia del paramo andino: Propiedades, importancia y vulnerabilidad,"* . Hydrol. Earth Syst. Sci.

Buytaert, W., de Bievre, B., Celleri, R., Cisneros, F., Wyseure, G., & Deckers, S. (2008). *, "Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes; discussion.,"* Geomorphology, vol. 96, no. 1–2, pp. 239–242, .

Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2004). *"The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes,"* . Hydrol. Earth Syst. Sci., vol. 8, no. 1, pp. 108–114, .

Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bièvre, B. (Oct. 2007). *"The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo,"* . For. Ecol. Manage., vol. 251, no. 1, pp. 22–30, .

Canteri, M., Althaus, R., Virgens Filho, J., Giglioti, É., & Godoy, C. (2001). *"Sasm-agri -system for analysis and mean separation in agricultural assays using scott-knott, tukey and duncan methods,".* Rev. Bras. Agrocomputação, vol. 1, pp. 18–24.

Cañón-Cortázar, R. G., Avellaneda-Torres, L. M., & Torres-Rojas, E. (2012). *Microorganismos asociados al ciclo del nitrogeno en suelos bajo tres sistemas de uso: cultivo de papa, ganaderia y paramo, en el Parque Los Nevados,* vol. 4, pp. 371–379 2.

Centro de Enseñanza e Investigación del IICA. (1969). *Panel sobre Suelos Derivados de Ceniza Volcanicas de American Latina. Bib. Orton IICA / CATIE.* Turrialba - Costa Rica.

Crespo, P., & otros. (2010). *"Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems,"* . IAHS-AISH Publ., vol. 336, pp. 71–76, .

Cuesta, J. (2013). *"Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo,"* . Cuad. Act., vol. 5, no. 2027–8101, pp. 59–67, .

Cuevas, A., Febrero, M., & Fraiman, R. (Aug. 2004). *"An anova test for functional data," Comput. Stat. Data Anal.,.* vol. 47, no. 1, pp. 111–122.

Daza, M., Hernández, F., & Alba, F. (2014). *"Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia,"* . Medellín: Rev. Fac. Nac. Agron. vol. 67, no. 1, pp. 7189–7200, .

Díaz, E. B., Paz, L. P., Amezquita, E., & Rivera, M. (2004). *"Influencia de los sistemas de uso del suelo en el comportamiento de las propiedades físicas en los páramos 'Las Ánimas' (municipio de Silvia) y 'Piedra de León' (municipio de Sotará) departamento del Cauca*. Bogotá.

Díaz-Granados Ortiz, M., Navarrete González, J., & Suárez López, T. (2005). *"Páramos: Sensitive Hydrosystems,"* . Rev. Ing., no. 22, pp. 64–75, .

Estupiñán, L. H., Gómez, J. E., Barrantes, V. J., & Limas, L. F. (2009). *"Effect Caused By Agricultural Activities on Soil Characteristics in the Paramo El Granizo".* Cundinamarca -Colombia: Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Científica, vol. 12, no. 2, pp. 79–89,.

Gionet, P. (1963). *"Analysis of variance," in SAE Technical Papers*. *Statistics for the Engineer*: https://doi.org/10.4271/630497

Godoy Chivata, D., & Medina Pinzón, H. (2019). *Caracterizacion y clasificacion de la cobertura de suelo de paramo mediante metodologia de cuencas pareadas. Caso de estudio: Paramo de Berlin (Santander).,"* . Bucaramanga: Univ. Ind. santander, UIS Ing., p. 23, .

Hofstede, R. (1995). *The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands,"* . Plant Soil, vol. 173, no. 1, pp. 111–132, Jun. .

Hofstede, R. (sf). *"Los servicios del ecosistema páramo: una visión desde la evaluación de ecosistemas del milenio."*

Hofstede, R., Segarra, P., & Vásconez, P. (2003). *Los páramos del mundo: Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. UICN ;* . Global Peatland Initiative ; Ecociencia, .

Instituto Colombiano Normas Técnicas y Certificación. (1997). *NTC 4113-1, "Guía para el diseño de programas de muestreo," ,* pp. 10, .

Jaramillo, L., Jaramillo, D. F., Restrepo, C., Sánchez, H., & Mejía, F. (2011). *"Variables fisicas que explican la variabilidad de suelo aluvial y su comportamiento espacial".* Pesqui. Agropecu. Bras., vol. 46, pp. 1707–1715.

Lacasta Dutoit, C., Benítez Gilabert, M., Maire, N., & Meco, R. (2006). *"Efecto de la textura del suelo sobre diferentes parámetros bioquímicos,".* VII Congr. SEAE Agric. y Aliment. Ecológica Trab. 110, p. 8, .

Lazo, P., Mosquera, G., McDonnell, J., & Crespo, P. (2019). *"The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in Andean Páramo catchments,"* . J. Hydrol., vol. 572, pp. 805–819, May .

Llambi, R., & Soto, A. (2012). *"Ecología , hidrología y suelos de páramos," paramo Andin.*

Llano, M. (1990). *Los páramos de los Andes: exploración ecológica integrada en la alta montaña ecuatorial.* . Montoya & Araújo.

Llorente Bousquets, J., & Morrone, J. J. (2001). *Introduccion a La Biogeografia en Latinoamerica: Teorias, Conceptos, Métodos y Aplicaciones.* . Las Prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM, .

Ministerio de Ambiente. (2001). *"Programa para el manejo sostenible y restauracion de ecosistemas de alta montaña,"* . Paramos. Plan nacional de Paramos y su implementacion.

Montaldo, A., & Agricultura, I. I. (1984). *Cultivo y mejoramiento de la papa.* Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Morales-Betancourt, J., & Estévez-Varón, J. V. (2006). *"El Paramo: Ecosistema en via de extincion,"* .

Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourth, J., Olaya, E., Posada, E., Cárdenas, L., Morales M, O. J., Van der Hammen, T., Esteban, C., Vargas, C., Andrea, C., Aguilera, F., & Gilede, E. P. (2007). *Atlas de páramos de Colombia.* Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Muñoz, L. A., & Lucero, A. M. (2008). *"Efecto de la fertilización orgánica en el cultivo de papa criolla Solanum phureja," .* Agron. Colomb., vol. 26, no. 2, pp. 340–346, .

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (sf). *Cobertura orgánica del suelo. Agricultura de conservación* .

P.Mena., C. Josse., & Medina, G. (2000). *Los suelos del páramo.* . Ecuador: Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador, .

Pinzón Pinto, A. (2016). *"Efecto en las propiedades físicas de un suelo de páramo por la acción antrópica," .* Suelos ecuatoriales, vol. 46, pp. 51–58, .

Pinzón Ramírez, H. (2004). *"La cebolla de rama (Allium fistulosum) y su cultivo." .* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, ASOHOFRUCOL, .

Poulenard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. (2003). *"Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos," .* Geoderma, vol. 117, no. 3–4, pp. 267–281, Dec. .

Ramirez Carvajal, R. (1997). *"Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos," , pp. 13–23,* . St. Fe Bogotá.

Ramirez Rodriguez, C. R., Duarte Colmenares, C. H., & Galeano Ardila, J. (2012). *"Estudio de suelos y su relación con las plantas en el páramo el verjón ubicado en el municipio de choachí cundinamarca," .* vol. 6, no. 2422–3670, p. 56,72, .

Rivera, D., & Rodríguez, C. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la determinación de páramos de Colombia.* . . Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humbolt. 68 p.

Ruiz O., A., Martinez I., D., & Figueroa C., J. (2015). *"Agricultura sostenible en ecosistemas de alta montaña.,"* . Biotecnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial, vol. 13, no. 1, pp. 129–138, .

Ruiz T., W., & Grillo F., M. (1975). *, "Determinación de la retención de humedad del suelo a capacidad de campo por el método del tanque de arena,"* . Acta Agronómica, vol. 25, pp. 31–53, .

Strudley, M., Green, T., & Ascough, J. (2008). *"Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science,"* . Soil Tillage Res., vol. 99, no. 1, pp. 4–48.

Union de Organizaciones Campesinas de Cotopaxi. (2007). *Produccion organica de cultivos andinos.*

Viviroli, D., Dürr, H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (Jul. 2007). *"Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance,".* Water Resour. Res., vol. 43, no. 7, .

Von Rothkirch, C., & Ruiz, J. (1996). *Alta Colombia: esplendor de la montaña.* . Villegas Editores.

Yagüe, J., & Ministerio de Agricultura, P. y. (2003). *Técnicas de riego*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion.

Zúñiga, F., Huertas, J., Guerrero, G., Sarasty, J., Dorner, J., & Burbano Orjuela, H. (2018). *"Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia,"* . Terra Latinoam., vol. 36, pp. 183–196

Apéndices

Apéndice A. Descripción detallada de las coberturas en la zona de estudio.

Tabla A1.

Descripción detallada de los usos de suelo en la zona de estudio

Uso del suelo	Unidad hidrográfica intervenida	Unidad hidrográfica no intervenida	Pendiente promedio	Descripción
Vegetación nativa de páramo con baja pendiente	X	X	17%	Terreno con presencia de frailejones, pajonal y afloramientos rocosos, de suelo húmedo y color negro
Vegetación nativa de páramo con alta pendiente	X	X	60%	Terreno con presencia de arbustos, herbazales y frailejones dispersos, de suelo húmedo y color pardo oscuro
Arbusto denso	X	X	35%	Terreno con presencia de arbustos de suelo de alta humedad de color negro

Uso del suelo	Unidad hidrográfica intervenida	Unidad hidrográfica no intervenida	Pendiente promedio	Descripción
Barbecho	X	X	12%	Terreno en pendiente, con cobertura de pasto, suelo color pardo oscuro
Cultivo de cebolla	X		12%	Terreno con presencia de cultivo transitorio de suelo moderadamente seco de color negro.
Cultivo de papa	X		12%	Terreno con presencia de cultivo de cebolla suelo moderadamente seco de color pardo

Nota: (Godoy & Medina, 2019). [1]

[1] Godoy Chivata, D., & Medina Pinzón, H. (2019). *Caracterización y clasificación de la cobertura de suelo de paramo mediante metodología de cuencas pareadas. Caso de estudio: Paramo de Berlín (Santander).,".* Bucaramanga: Univ. Ind. Santander, UIS Ing., p. 23,.

Apéndice B. Distribución espacial de muestras en los usos de suelo.

Figura B1.

Distribución especial de muestras en los usos de suelo estudiados.