

Evaluación del efecto del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en ecosistema de páramo asociadas a los servicios de suministro y regulación hídrica

Sebastián Elías Patiño Gutiérrez

Trabajo de grado para optar por el título de  
Magister en Ingeniería Civil

Directora

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD. En Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural

Codirectora

Martha Constanza Daza Torres

PhD. En Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

### **Agradecimientos**

Toda mi gratitud a mi familia, a mis padres y hermanas por sus consejos y apoyo. A esa fuerza que me acompaña e ilumina en espíritu por siempre. A mis amigos por esos fines de semana de voleibol que nunca voy a olvidar.

De igual forma, agradezco al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), a los profesores Isabel, Martha y Ricardo por la asesoría y conocimiento brindado durante el proceso de investigación. Al proyecto de Jóvenes Investigadores 812 y la convocatoria interna Santander Científico 2438 por la financiación.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	13
1. Formulación del Problema .....	16
2. Justificación.....	19
3. Revisión Bibliográfica.....	22
3.1 Marco Teórico.....	22
3.1.1 El ecosistema de páramo .....	22
3.1.2 Propiedades hidrofísicas del suelo.....	26
3.1.3 El suelo y el ciclo hidrológico .....	27
3.1.4 Los servicios ecosistémicos del páramo.....	28
3.2 Estado del Arte.....	30
3.2.1 Principales actividades antrópicas en el ecosistema de páramo .....	30
3.2.2 Transformación del paisaje de páramo .....	31
3.2.3 Principales características del suelo de páramo.....	33
3.2.4 El cambio de uso y el suelo de páramo .....	34
3.2.5 El servicio de regulación hidrológica en páramo .....	35
4. Objetivos .....	38
4.1 Objetivo General.....	38
4.2 Objetivos Específicos .....	38
5. Metodología.....	39
5.1 Fase 1: Selección de las unidades hidrológicas .....	40
5.1.1 Selección de las unidades hidrográficas potenciales .....	40

5.1.2	Validación de la selección de las unidades hidrográficas.....	41
5.2	Fase 2: Identificación de las unidades de muestreo .....	42
5.2.1	Reconocimiento en campo de las unidades de muestreo.....	42
5.2.2	Cartografía de las unidades hidrográficas experimentales .....	43
5.2.3	Caracterización preliminar del suelo en las unidades de muestreo potenciales .....	43
5.2.4	Selección de las unidades de muestreo experimentales.....	45
5.3	Fase 3: Monitoreo de las propiedades hidrofísicas del suelo.....	45
5.3.1	Monitoreo hidrológico.....	46
5.3.2	Monitoreo del suelo .....	48
5.4	Fase 4: Análisis de datos.....	50
5.4.1	Efecto del cambio de uso del suelo y régimen de lluvia sobre las propiedades hidrofísicas del suelo .....	51
5.4.2	Efecto del cambio de uso del suelo sobre el servicio de regulación hidrológica ....	52
6.	Alcance .....	54
7.	Resultados y Discusión .....	55
7.1	Sistema de Cuencas Pareadas .....	55
7.1.1	Selección del área de estudio.....	55
7.2	Validación y Selección de las Unidades de Muestreo .....	57
7.2.1	Reconocimiento en campo.....	57
7.2.2	Características de los usos dominantes del suelo .....	60
7.2.3	Caracterización inicial del suelo.....	62
7.2.4	Textura y densidad real del suelo .....	68
7.3	Efecto del Cambio de Uso del Suelo sobre las Propiedades Hidrofísicas .....	71
7.3.1	Contenido de humedad .....	71

7.3.2	Materia orgánica del suelo.....	73
7.3.3	Densidad aparente.....	76
7.3.4	pH .....	79
7.3.5	Conductividad eléctrica .....	81
7.3.6	Estabilidad estructural .....	82
7.3.7	Capacidad de infiltración y conductividad hidráulica .....	84
7.4	Efecto del Régimen de Lluvia Sobre las Propiedades Hidrofísicas.....	88
7.4.1	Propiedades hidrofísicas del suelo bajo vegetación natural y régimen de lluvia ....	88
7.4.2	Propiedades hidrofísicas en el suelo intervenido y el régimen de lluvia.....	91
7.4.3	El cambio de uso del suelo frente al régimen de lluvia .....	93
7.5	Relación entre el Suelo y los Servicios Hidrológicos.....	94
7.5.1	Capacidad de retención de humedad .....	94
7.5.2	Precipitación, propiedades hidrofísicas del suelo y rendimiento hídrico .....	101
7.5.3	Regulación de flujos de agua superficial.....	106
8.	Conclusiones .....	111
9.	Recomendaciones .....	114
	Referencias .....	115
	Anexos.....	140

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades del suelo evaluadas en el cambio de uso en páramo.....	26
Tabla 2. Mapas empleados en la selección de las unidades hidrográficas potenciales. ....	40
Tabla 3. Salidas de campo en la selección de las unidades hidrográficas. ....	42
Tabla 4. Diseño del muestreo de las unidades de muestreo potenciales. ....	44
Tabla 5. Variables seleccionadas en la investigación del suelo de páramo.....	46
Tabla 6. Equipos instalados para el componente hidrológico. ....	47
Tabla 7. Plan de muestreo del suelo. ....	50
Tabla 8. Características geomorfológicas de las unidades hidrográficas potenciales. ....	56
Tabla 9. Características de las unidades de muestreo.....	61
Tabla 10. Resumen estadístico de la caracterización preliminar del suelo. ....	63
Tabla 11. Variabilidad respondida por cada uno de los componentes. ....	64
Tabla 12. Estabilidad estructural en las unidades de muestreo. ....	83
Tabla 13. Conductividad hidráulica en las unidades de muestreo.....	86
Tabla 14. Propiedades del suelo en usos naturales por régimen de lluvia.....	90
Tabla 15. Propiedades del suelo en usos intervenidos por régimen de lluvia. ....	92
Tabla 16. Capacidad de retención de humedad en los usos dominantes del suelo.....	95
Tabla 17. Rendimiento hídrico por temporada de precipitación. ....	105
Tabla 18. Rendimiento hídrico dos horas después de un evento de precipitación. ....	110

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Estructura general de metodología de investigación.....	39
Figura 2. Equipos y estructuras para el monitoreo hidrológico.....	48
Figura 3. Ubicación de las unidades hidrográficas potenciales en la cuenca del río Tona. ....	55
Figura 4. Unidades de muestreo experimentales y puntos de reconocimiento en campo. ....	57
Figura 5. Fisionomía característica de los usos del suelo dominantes en el área de estudio.....	58
Figura 6. Distribución espacial de los puntos de muestreo en la caracterización inicial. ....	62
Figura 7. Vectores propios de variabilidad de las propiedades del suelo (dos componentes). ....	65
Figura 8. Dispersión de los datos por unidad de muestreo en dos componentes de variabilidad. ....	67
Figura 9. Textura del suelo en las unidades de muestreo. ....	69
Figura 10. Densidad real del suelo sobre en las unidades de muestreo.....	70
Figura 11. Contenido de humedad por unidad de muestreo y profundidad. ....	72
Figura 12. Contenido de materia orgánica del suelo por unidad de muestreo y profundidad. ....	74
Figura 13. Densidad aparente del suelo por unidad de muestreo y profundidad.....	77
Figura 14. pH del suelo por unidad de muestreo y profundidad. ....	80
Figura 15. Conductividad eléctrica del suelo por unidad de muestreo y profundidad. ....	81
Figura 16. Porcentaje de masa retenido en tamizado húmedo. ....	84
Figura 17. (a) Curva de infiltración en los usos dominantes del suelo.....	85
Figura 18. Curva de retención de humedad para los usos dominantes identificados. ....	97
Figura 19. Relación entre el rendimiento hídrico, precipitación y contenido de humedad del suelo en el tiempo. ....	102

Figura 20. Distribución de frecuencia de la precipitación diaria en el área de estudio. .... 106

Figura 21. Distribución de frecuencia del rendimiento hídrico diario. .... 108

**Lista de Anexos**

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Principales propiedades hidrofísicas en la investigación del suelo de páramo.....	140
Anexo B. Búsqueda, selección, caracterización y resumen de la revisión de literatura.....	142
Anexo C. Reporte de las principales propiedades hidrofísicas del suelo de páramo natural. ....	154
Anexo D. Fechas de extracción de especímenes de suelo para ensayo de capacidad de retención de humedad. ....	158
Anexo E. Formato de identificación de las unidades de muestreo potenciales.....	159
Anexo F. Determinación del régimen de lluvia en el área de estudio.....	161
Anexo G. Localización de los puntos de caracterización inicial del uso del suelo.....	162
Anexo H. Resumen de las observaciones en campo en la caracterización inicial.....	163
Anexo I. Características organolépticas de la textura del suelo en el área de estudio.....	165
Anexo J. Ubicación espacial de los puntos de muestreo del suelo.....	166

**Glosario**

A.d: arbustivo denso.

EE: estabilidad estructural.

A: alterada (muestra de suelo alterada).

IA: inalterada (muestra de suelo inalterada).

B: barbecho.

Ks: conductividad hidráulica saturada.

C.c: cultivo de cebolla.

MO: materia orgánica.

C.p: cultivo de papa.

MOS: materia orgánica del suelo.

CC: capacidad de campo.

N.a: natural de alta pendiente.

CE: conductividad eléctrica.

N.b: natural de baja pendiente.

CH: contenido de humedad.

PMP: punto de marchitez permanente.

CI: capacidad de infiltración.

Pt: porosidad total.

COS: carbono orgánico del suelo.

SE: servicios ecosistémicos.

CRH: capacidad de retención de humedad.

UH: unidad hidrográfica.

CSE: Cascada de servicios ecosistémicos.

UM: unidad de muestreo.

Da: densidad aparente.

VNP: vegetación natural de páramo.

## Resumen

**Título:** Evaluación del efecto del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en ecosistema de páramo asociadas a los servicios de suministro y regulación hídrica \*

**Autor:** Sebastián Elías Patiño Gutiérrez \*\*

**Palabras clave:** Páramo, suelo, regulación hidrológica, propiedades hidrofísicas, uso del suelo

**Descripción:** El páramo andino es un ecosistema estratégico en la provisión de servicios ambientales, como la regulación y suministro de agua producto de un clima, vegetación y suelo particulares. No obstante, el cambio de uso del suelo amenaza la provisión de estos servicios. Esta investigación evaluó el efecto del cambio de uso del suelo y la estacionalidad del clima sobre las propiedades hidrofísicas del suelo, paralelamente, estas propiedades fueron relacionadas con el servicio de regulación hidrológica sobre dos unidades (control e intervenida), a través del rendimiento hídrico y precipitación. El estudio se llevó a cabo en un páramo seco, sobre dos unidades hidrológicas con seis usos del suelo dominantes: vegetación natural de páramo (baja pendiente, alta pendiente y arbustivo denso) e intervenido (cultivo de cebolla, cultivo de papa y barbecho). Mediante un muestreo aleatorio estratificado en profundidad (0-5, 10-15 y 20-25 cm) se completaron 10 monitoreos durante siete meses para un total de 384 especímenes de suelo recolectados. Se cuantificaron propiedades como: contenido de humedad (CH), densidad aparente (Da), materia orgánica del suelo (MOS), capacidad de retención de humedad (CRH), entre otras. Se comprobó que el régimen de lluvia no influencia significativamente las propiedades del suelo bajo vegetación natural; sin embargo, en usos antrópicos se observan diferencias (CH, MOS y Da). Por otro lado, el cambio de uso del suelo influye sobre todas las propiedades evaluadas, reflejado en una reducción en CH, MOS y CRH y un aumento en Da y pH. Se encontró que un cambio del 24% de la cobertura natural produjo una reducción en el rendimiento hídrico (57%) y un aumento de flujos pico en la unidad intervenida, generando así un impacto relevante sobre el servicio de regulación hidrológica proporcionado por el ecosistema de páramo.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, Maestría en Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez, PhD. Codirectora: Martha Constanza Daza Torres, PhD.

### Abstract

**Title:** Evaluation of the effect of the use of soil on its hydrophysical properties in páramo ecosystem associated with the supply and water regulation services. \*

**Author:** Sebastián Elías Patiño Gutiérrez \*\*

**Key words:** Páramo, soil, hydrological regulation, hydrophysic properties, soil use.

**Description:** The Andean páramo is a strategic ecosystem in the provision of environmental services, such as water regulation and supply as result of a particular climate, vegetation and soil. However, land use change threatens the provision of these services. This research assessed the effect of land use change and rainfall regime on the hydrophysical properties of the soil. In parallel, these properties were related to the hydrological regulation service on two units (control and intervened), through water yield and rainfall. The study was carried out in a dry páramo, on two hydrological units with six dominant land uses: natural páramo vegetation (low slope, high slope and dense shrub) and intervened (onion cultivation, potato cultivation and fallow). By means of a random depth stratified sampling (0-5, 10-15 and 20-25 cm), 10 monitoring campaigns were completed during seven months for a total of 384 collected soil specimens. Properties such as: water content (WC), bulk density (BD), soil organic matter (SOM), water retention capacity (WRC), among others, were quantified. It was found that the rainfall regime does not significantly influence the soil properties under natural vegetation; however, in anthropic uses differences are observed (CH, MOS and Da). On the other hand, land use change influences all the properties analyzed, reflected in a reduction in WC, SOM and WRC, and an increase in BD and pH. It was found that a change of 24% in the natural cover produced a reduction in water yield (57%) and an increase in peak flows in the intervened unit, thus generating a relevant impact on the hydrological regulation service provided by the páramo ecosystem.

---

\* Master Thesis

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Civil Engineering Department, Master of Science in Civil Engineering. Advisor: Isabel Cristina Domínguez, PhD. Co-advisor: Martha Constanza Daza Torres, PhD.

## Introducción

El páramo es un bioma que consiste en una colección de ecosistemas de pastizal húmedo de alta montaña dominado por vegetación herbácea y arbustiva (Tovar et al., 2013). Estos ecosistemas se caracterizan por un estado de permanente humedad dando origen a una variedad de lagos y turberas (J. Benavides, 2014). El páramo andino se extiende principalmente sobre la región norte de los Andes en Suramérica en elevaciones por encima de la línea de bosque (3,000-3,500 msnm) (Marulanda & Villa, 2015; Podwojewski et al., 2002a) y presenta un clima frío, alta variación diaria en la temperatura y precipitaciones anuales altamente variables (700-3,000 mm), que dependen de su localización (W. Buytaert, Deckers, et al., 2002; B.F. Ochoa-Tocachi et al., 2016). Por otro lado, el suelo de páramo se caracteriza por una estructura abierta, friable y granular (W. Buytaert, Deckers, et al., 2006), con un alto contenido de materia orgánica lo que le confiere una alta porosidad (W. Buytaert, De Bievre, et al., 2002). La vegetación, el suelo y clima del páramo le proporcionan un alto potencial en la provisión de servicios hidrológicos (suministro y regulación de flujos de agua) a comunidades andinas (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006), (WWF, 2006)|.

El páramo ha sido tradicionalmente habitado por pequeñas comunidades campesinas (i.e. aproximadamente 10 millones de personas) (R. Hofstede, 2013) que derivan su sustento principalmente de actividades agrícolas. Para el desarrollo de estas actividades se elimina la vegetación natural y se cambian las características del suelo, a través de prácticas como la quema, el arado (manual y mecanizado), la fertilización (orgánica y sintética), el cultivo y el pastoreo (M. L. Gutiérrez & Gutiérrez, 2015; Quichimbo et al., 2012). Estas actividades modifican las propiedades hidrofísicas del suelo como estructura, porosidad, capacidad de retención de humedad

y contenido de materia orgánica (Avellaneda-Torres et al., 2018; Dorel et al., 2006) y repercuten sobre el ciclo del agua en el páramo (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006), reflejándose en un aumento de la escorrentía y una reducción en la descarga (Jérôme Poulenard et al., 2001). Por lo tanto, la gestión del suelo es un elemento clave en el ciclo hidrológico del páramo para garantizar la prestación de servicios hídricos ofertados por éste (W. Buytaert, De Bievre, et al., 2002).

Esta investigación estudió el efecto del cambio de uso del suelo por actividades agropecuarias en páramo sobre las principales propiedades hidrofísicas del suelo. Las propiedades estudiadas fueron: contenido de humedad, materia orgánica del suelo, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, capacidad de infiltración, capacidad de retención de humedad, conductividad hidráulica saturada y estabilidad estructural. De igual forma, se analizó el efecto del cambio del régimen de lluvia (temporada de alta y baja precipitación) sobre las propiedades hidrofísicas. Finalmente, se integró el análisis del efecto del cambio de uso del suelo y el servicio de regulación hidrológica (capacidad de suministro y regulación de flujos de agua) en páramo de forma indirecta a través de la capacidad de retención de humedad y el rendimiento hídrico.

La investigación se realizó en un contexto particular, en un área atmosféricamente seca (precipitación anual <1196 mm) (Rangel et al., 2000), con una baja representación en Colombia (6.0%) y Ecuador (1.4%), del total de área de páramo (R. Hofstede et al., 2003). Por otro lado, el cultivo de cebolla junca (*Allium fistulosum*), dominante en el área de estudio, es un uso cuyo efecto no ha sido estudiado en páramo hasta la fecha. Estas dos condiciones (páramo seco y cultivo de cebolla) son subrepresentadas en la investigación del páramo andino por lo que su evaluación contribuye para mejorar la comprensión de la complejidad de estos ecosistemas. Así mismo, existe literatura que evalúa el efecto del cambio del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas (W.

Buytaert, De Bievre, et al., 2002; Daza, Flórez, Triana, et al., 2014; Jérôme Poulénard et al., 2003), suministro de agua (W. Buytaert, 2004; B.F. Ochoa-Tocachi et al., 2016) y regulación de flujos de agua (W. Buytaert et al., 2005a; Jérôme Poulénard et al., 2001) en páramo. Sin embargo, la diversidad de condiciones hidrológicas y de tipo de suelo derivan en resultados variables (Patiño et al., 2020), lo que pone de manifiesto la necesidad de realizar estudios específicos para cada territorio (B.F. Ochoa-Tocachi et al., 2018).

## 1. Formulación del Problema

La amplitud longitudinal y la diferencia en altitud de los ecosistemas de montaña les confiere una gran diversidad. Estos se extienden desde el ecuador hasta los polos (20% de la superficie continental) y albergan el 12% de la población humana (FAO, 2012). Los ecosistemas de montaña proporcionan diversos servicios ambientales (e.g. regulación y el suministro de agua) que no solo benefician a los organismos que habitan estas regiones, sino también a millones de individuos de zonas bajas (FAO, 2012). Su orografía acentuada y vegetación particular regulan los flujos de humedad verticalmente y aporta hasta un 60% del escurrimiento total en zonas húmedas, cifra que se eleva al 95% en zonas áridas y semiáridas (Messerli et al., 2004). Los ecosistemas de alta montaña tienen especial atención desde la Cumbre de la Tierra en Rio (1992) debido a su rol clave en el desarrollo mundial (Naciones Unidas, 1992), sumado a la potencial crisis de agua, alimentos y energía que exponen la prioridad en el desarrollo sostenible de los ecosistemas de alta montaña (Messerli et al., 2004).

De esta forma, la gestión sostenible de las regiones de alta montaña, incluyendo el páramo, plantea retos en su protección debido a la alta presión antrópica (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006). En la región andina donde tiene asiento cerca de 85 millones de personas (45% de su población) (Devenish et al., 2012), destaca el páramo como el mayor proveedor de agua (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006). No obstante, el cambio de las propiedades hidrofísicas del suelo debido a la introducción de actividades agropecuarias (e.g. cultivo y ganadería), forestación con especies exóticas (pino o eucalipto) y prácticas culturales de preparación agrícola (e.g. quema y arado) (R. Hofstede, 2001), incide en la capacidad del suelo de retener y liberar agua (Daza, Flórez, Triana, et al., 2014; C. P. Harden, 2006; R. Hofstede, 1995; Podwojewski & Germain, 2005), y,

consecuentemente, sobre el servicio de regulación hidrológica proporcionado por el páramo (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006; B.F. Ochoa-Tocachi et al., 2016).

Los diferentes intereses económicos sobre el páramo en Colombia han acelerado su proceso de delimitación que hasta el momento se ha completado para 30 de los 37 complejos de páramo (Pérez-Escobar et al., 2018). No obstante, la delimitación del complejo Santurbán fue derogada por la Corte Constitucional debido a falencias en el componente participativo del proceso (Colprensa, 2018). En una iniciativa para proteger la integridad del páramo en Colombia se formuló la Ley de Páramos que prohíbe el desarrollo de actividades de alto impacto y alienta la coalición entre las autoridades ambientales y la comunidad académica para definir estas actividades (DGIPC, 2018). Este complejo problema socio-ambiental enfrenta a la comunidad autóctona de este territorio, con sus actividades de explotación primaria tradicionales (e.g. cultivo, ganadería, piscicultura y minería), y la preservación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el páramo (e.g. regulación hidrológica).

El páramo de Berlín (Santander) pertenece al complejo Santurbán y es el segundo productor de cebolla junca en el país, del cual económicamente depende el 72% de sus pobladores (Restrepo et al., 2008). El cultivo de cebolla emplea el 10% del área de páramo de Berlín, mientras otros usos como: cultivo de papa, pastos y rastrojos ocupan el 2% de la misma. Hasta la fecha no se encuentra literatura sobre el efecto del cultivo de cebolla junca sobre el suelo de páramo, así como estudios locales sobre el cambio de uso del suelo y el impacto sobre la regulación hidrológica. En este contexto, esta investigación aborda la siguiente pregunta: ¿Qué impacto tiene el cambio del uso del suelo natural por actividades agropecuarias sobre las propiedades hidrofísicas

del suelo en ecosistema de páramo, en relación con el servicio de regulación hidrológica en régimen de alta y baja precipitación?

## 2. Justificación

América Latina y el Caribe concentran el 30% de los suelos arables, el 30% de las reservas de agua renovable, el 25% de la superficie de bosque y el 33% de la biodiversidad mundial (PNUMA, 2002). Más de un 50% de las áreas de montaña son esenciales en el soporte ambiental de regiones ubicadas en tierras bajas (Viviroli et al., 2007). No obstante, las corrientes de agua de los Andes son amenazadas por actividades socioeconómicas (e.g. cultivo, ganadería, forestación, minería y expansión urbana) (W. Buytaert et al., 2005a). Estas actividades plantean riesgos en la integridad de la alta montaña y sus servicios ecosistémicos (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006; R. Hofstede, 2001; R. Hofstede et al., 2014), lo que genera cambios en el suelo (Daza, Flórez, Triana, et al., 2014; M. C. R. García et al., 2008; Podwojewski & Poulénard, 2000) y en el ciclo del agua (R. Hofstede, 1997; Stonestrom et al., 2009).

El páramo es el mayor proveedor de agua de la región andina (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006) dado que un gran número de los sistemas fluviales de los países andinos septentrionales nacen en páramo, y los sistemas de riego, agua potable e hidroelectricidad dependen de éste (Malagon & Pulido, 2000; Jérôme Poulénard, 2000). Un 1.7% del territorio colombiano (1'932,987 ha) se cataloga como ecosistema de páramo (M. Morales et al., 2007) y la producción de agua en este tipo de cuencas en Colombia se estima en 1400 mm/año (4% oferta hídrica) (MMA (Ministerio de Medio Ambiente), 2005), sin embargo, éstas cuencas suministran el 70% del agua del país (Hincapié et al., 2002) dado que allí nacen de los grandes ríos del país (e.g. Magdalena, Cauca, Patía y Meta) (M. Morales et al., 2007). El servicio de regulación hidrológica es una de las principales funciones ambientales del suelo de páramo, pues éste retiene grandes volúmenes de agua y controla su flujo (Daza, Flórez, Triana, et al., 2014; De Bièvre et al., 2006; Pombo, 1989;

Roa-García et al., 2011). Este servicio que puede ser crucial en Colombia dado los escenarios futuros donde se estima que más de un 60% de la población podría estar sujeta a condiciones de escasez de agua (IDEAM, 2001).

La región andina montañosa alberga el 37% de la población colombiana (DANE, 2018), en la cual el 86% de su suelo presenta algún grado de erosión (Blackman & Sánchez-Triana, 2007), que no es ajena a los ecosistemas de páramo, relacionada con la acelerada expansión de la frontera agrícola (Sandoval, 2004). Diversas publicaciones encuentran una relación directa entre el cultivo y la capacidad de retención de humedad en ecosistemas de páramo (W. Buytaert et al., 2005a; Carol P. Harden et al., 2013; B.F. Ochoa-Tocachi et al., 2016). No obstante, la mayoría de estas investigaciones se centran en contextos climáticos e hidrológicos diferentes a Colombia (e.g. Ecuador). Por esta razón, es necesario aunar esfuerzos en la comprensión del ecosistema de páramo en un contexto nacional, asociado a la influencia de cultivos y prácticas agrícolas locales, y así generar incentivos para la innovación rural sostenible.

El páramo de Berlín hace parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, bajo la figura de Distrito de Manejo Integrado (DMI) (Decreto 2372, 2010), y actualmente es objeto de delimitación (Resolución 2090, 2014). El complejo Santurbán-Berlín tiene una importancia local dado que surte al distrito de riego Asozulia (1400 concesiones), a la central térmica Tasajero y a poblaciones: Bucaramanga y el 30% de la ciudad de Cúcuta (C. Sarmiento & Ungar, 2014). De esta forma, el páramo de Berlín es una región estratégica en la provisión de servicios hidrológicos; no obstante, el cambio de uso del suelo plantea retos para su conservación, dado que no existe información primaria en esta zona sobre el impacto que puede tener la introducción de actividades agropecuarias en la regulación hidrológica. En este contexto, esta investigación propone generar

información que vincule el uso del suelo y el servicio de regulación hidrológica en el páramo, a través de las propiedades hidrofísicas del suelo, para la concepción integral de planes de ordenamiento territorial que orienten a mediano y largo plazo el empleo eficiente y sostenible del suelo.

### 3. Revisión Bibliográfica

#### 3.1 Marco Teórico

En este apartado se presentan: i) generalidades del ecosistema de páramo (clima, hidrología, vegetación y suelo); ii) propiedades hidrofísicas del suelo relacionadas con la regulación hidrológica; iii) rol específico del suelo en el ciclo hidrológico; y iv) definición del servicio de regulación hidrológica.

##### 3.1.1 *El ecosistema de páramo*

El páramo se localiza cerca de la línea ecuatorial, en elevaciones por encima del límite superior de bosque y es considerado el último cinturón de vegetación en ecosistemas tropicales. En términos generales, el páramo se caracteriza por un clima frío y húmedo, vegetación arbustiva y herbácea, ausencia de formaciones forestales densas, alta radiación solar y suelo de turba. Además, el balance hídrico positivo junto con la altura permiten diferenciar el páramo andino de ecosistemas adyacentes (R. Hofstede, 2013). Sin embargo, la disimetría de los Andes introduce patrones de humedad diferentes entre la cuenca amazónica y pacífica (la primera es más húmeda respecto a la segunda) (Van der Hammen et al., 2002), e introduce diferentes patrones de precipitación.

En América Latina, el ecosistema de páramo se distribuye entre 3000-4800 msnm en un área aproximada de 35,000 km<sup>2</sup> (1% del paisaje americano) (Verweij, 1995). El páramo en América Latina se extiende desde la cordillera de Mérida en Venezuela hasta la depresión de Huancabamba (norte del Perú), con dos complejos aislados (Santa Martha -Colombia- y Cordillera de Talamanca -Panamá-). El páramo andino se distribuye en Ecuador (39.8%), Colombia (30.5%), Perú (24.6%) y Venezuela (5.2%), en una corología disyunta calificada como insular (R. Hofstede

et al., 2003). En Colombia, la distribución departamental de páramo es: Boyacá (18.3%), Cundinamarca (13.3%), Santander (9.4%), Cauca (8.1%), Tolima (7.9%) y Nariño (7.5%) (MMA (Ministerio de Medio Ambiente), 2001). La cordillera Oriental, desde Tamá hasta el complejo de páramos del Macizo de Sumapaz (1540 km<sup>2</sup>), es una región perhúmeda por las corrientes de aire del lado oriental (Orinoquía-Amazonía), se presentan índices de humedad inferiores en Boyacá y centro de Santander (M. Morales et al., 2007). Por otro lado, la influencia de cenizas volcánicas en el suelo de páramo colombiano no se limita a zonas volcánicas sino también a la cordillera Oriental de carácter no volcánico (R. Hofstede et al., 2014).

### **Hidroclimatología**

El páramo posee una alta infiltración y baja intensidad de lluvia lo que genera una baja escorrentía. De esta forma, el flujo superficial en el páramo es producto del exceso de saturación y no por exceso de infiltración como ocurre normalmente en otros ecosistemas (R. Hofstede et al., 2014). El clima en páramo se caracteriza por: permanente humedad, variación prácticamente nula de la temperatura anual, elevada amplitud térmica diaria, alto nivel de radiación UV, fuertes vientos, baja presión atmosférica, alta nitidez atmosférica, heladas frecuentes, humedad permanentemente alta, clima frío, neblina, rocío y lloviznas frecuentes (Troll, 1968).

En Colombia, gran parte de la precipitación es producto de fenómenos convectivos locales, ocasionados por la colisión de las corrientes de aire húmedo de la selva Amazónica y los océanos Atlántico y Pacífico con masas de aire frío de la Sierra Nevada de Santa Marta. Por otro lado, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) marca la estacionalidad del país, fenómeno que, junto con la dirección de los aportes de humedad desde los océanos, la Orinoquia y Amazonía marcan la estacionalidad de la lluvia en el país (monomodal y bimodal) (M. Morales et al., 2007). De esta

forma, los páramos de la cordillera Oriental presentan altas precipitaciones durante gran parte del año de carácter bimodal, con meses húmedos de marzo a mayo y septiembre a noviembre. Según Rangel, (2000), los páramos colombianos varían desde secos (<1200mm/año) hasta pluviales ( $\approx$ 4050mm/año). Es así que la distribución de los páramos en Colombia es: secos (6%), húmedos (89% -entre 1770 y 2350mm/año-) y superhúmedos (5% -entre 2950 y 3500mm/año-) (MMA & Geoingeniería, 1999).

### **Vegetación**

La vegetación de páramo es de tipo herbazal (pajonal) y en condiciones particulares existen formaciones arbustivas relativamente compactas que pueden llegar a superar los dos metros de altura sin llegar a conformar una entidad densa (Josse et al., 2009; Sierra, 1999). La evolución de la vegetación de páramo ha desarrollado diferentes adaptaciones para contrarrestar el clima extremo (Hedberg & Hedberg, 1979). Algunas de las adaptaciones fisiológicas de la vegetación de páramo son: rosetas que sirven de defensa contra el frío y el viento; la enanificación arbustiva y hojas coriáceas que reducen la pérdida de agua por transpiración; cubierta de pelos en las hojas para captar el agua de lluvia, rocío o neblina; la permanencia de hojas muertas sobre los tallos (resguardar la temperatura, atrapar residuos orgánicos y almacenar agua); macollas (trampa de materia orgánica y humedad); y la agrupación de plantas pequeñas en cojines, entre otros (Salamanca, 1986). En consecuencia, la vegetación en general evolucionó para protegerse de las heladas y la radiación extrema, retener agua, atrapar la neblina y limitar la evapotranspiración.

## Suelo

El suelo de páramo es húmedo, ácido, rico en humus, desaturado (baja concentración de nutrientes), enmohecido, de color pardo oscuro y con una lenta descomposición orgánica (Guhl, 1982). El suelo de páramo es relativamente joven y poco evolucionado (inicio de su formación entre el Plioceno -5'000,000 de años a atrás- y el Holoceno -10,000 años atrás-). La reciente constitución del suelo paramuno, en términos geológicos, hace que su perfil sea poco diferenciado en horizontes. De esta forma las clases, subclases y grupos de suelos tienen características comunes en todo el conjunto latitudinal y son menos diversos que otros suelos de la alta y media montaña andina con cobertura boscosa (R. Hofstede et al., 2014). Existe una relación entre el suelo de páramo y las cenizas volcánicas, sin embargo, esta particularidad no es excluyente, dado que existen zonas de páramo con ausencia de una clara capa de cenizas volcánicas (Jérôme Poulénard et al., 2003).

El suelo de páramo tiene un elevado contenido de carbono orgánico producto de la lenta descomposición de la materia orgánica debido a la baja temperatura y alta humedad (Podwojewski et al., 2002a). Este suelo presenta una estructura abierta, porosa con una baja densidad aparente y un alto índice de infiltración, lo que le confiere un alto potencial para retener agua (Serrano Giné & Galárraga Sánchez, 2015). Según la taxonomía de suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007) (el orden equivalente de acuerdo al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos -USDA & NRCS- se especifica en paréntesis) (USDA & NRCS, 2014), los órdenes de suelo común en páramo son: Andosol (Andisol), Regosol (Entisol), Umbrisol (Inceptisol) e Histosol (Histosol).

### 3.1.2 *Propiedades hidrofísicas del suelo*

Las propiedades hidrofísicas del suelo son un conjunto de variables que describen la interacción entre el suelo y el agua: ingreso (capacidad de infiltración), fuerzas que interactúan (capacidad de retención de humedad) y la resistencia a la erosión hídrica (estabilidad estructural) (Cresswell et al., 1992); así mismo, existen otras propiedades que ayudan a dar una imagen más clara sobre esta interacción. En la Tabla 1 se definen las propiedades hidrofísicas del suelo evaluadas en la presente investigación. Así mismo, se incluyen propiedades como la textura, densidad real y pH, que son empleadas para caracterizar el suelo y son cuantificadas una sola vez en la mayoría de las investigaciones sobre el suelo de páramo. La selección de propiedades hidrofísicas para esta investigación fue realizada a partir de una revisión sistemática de literatura en este tema que aparece sintetizada en el Anexo A.

**Tabla 1**

*Propiedades del suelo evaluadas en el cambio de uso en páramo.*

<b>Propiedad</b>	<b>Definición</b>
Capacidad de infiltración	Es la velocidad máxima con la que el agua penetra en el suelo. Depende de la condición superficial del suelo, cubierta vegetal, propiedades del suelo (porosidad y conductividad hidráulica) y contenido de humedad presente.
Textura del suelo	Es la proporción relativa de partículas minerales con diámetro promedio inferior a 2mm. La fracción sólida de un suelo está constituida por tres partes: Arenas ( $\phi$ 50-2000 $\mu\text{m}$ ), Limos ( $\phi$ 2-50 $\mu\text{m}$ ) y Arcillas ( $\phi$ <2 $\mu\text{m}$ ).
Contenido de humedad	Es una medida puntual (espacio y tiempo) de la cantidad de agua en el suelo expresada en términos de porcentaje (gravimétrica o volumétrica). Depende de la textura, materia orgánica, fracciones minerales y orgánicas e hidrología de la zona (interacción precipitación- evaporación). Interviene en procesos ecológicos, físicos y químicos e influye sobre otros parámetros del suelo.

Densidad del suelo	Es la relación entre la masa y el volumen del suelo. Densidad de partícula o real: no tiene en cuenta la organización del suelo (el espacio ocupado por los poros es ignorado). Densidad aparente: tiene en cuenta la organización del suelo (el espacio ocupado por los poros es considerado).
Constantes de humedad	Coeficiente higroscópico (31000 kPa): agua que retiene el suelo secado al aire; Punto de marchitez permanente (PMP; 1500 kPa): agua que retenida por el suelo con una fuerza superior a la succión de las plantas; Capacidad de campo (CC; 10-33 kPa): cantidad máxima de agua que un suelo puede retener, bajo condiciones de humedecimiento total -saturación-, seguido de drenaje libre -gravitacional; y Agua aprovechable o disponible: humedad retenida entre el PMP y la CC.
Conductividad hidráulica	Es la velocidad del agua en la masa de suelo. Depende del contenido de humedad, estructura, textura y composición mineralógica de las arcillas. Encuentra su valor máximo cuando el suelo está saturado y desciende rápidamente a medida que pierde humedad.
Porosidad	Es el porcentaje de poros (espacios) en un volumen de suelo. Microporosidad o porosidad textural (poros en los pedos) y Macroporosidad o porosidad estructural (poros entre los pedos). La dinámica del agua en el suelo es influenciada por la relación entre la porosidad textural y estructural. Macroporosidad -circulación de agua en estado saturado-, y microporosidad -retención de agua por capilaridad-.
Contenido de materia orgánica	Es la fracción de restos vegetales y animales que por la acción de la microbiota son descompuestos y reservados en el suelo. Puede ser: no húmicos (restos orgánicos identificables) y húmicos (material descompuesto por medios no bióticos).
Contenido de carbono orgánico	Es el porcentaje de carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material orgánico. Influye en la estructura del suelo, la infiltración y el almacenamiento de agua.

*Adaptado de:* Jaramillo, (2002); Osman, (2013); Valenzuela & Armando, (2010).

### **3.1.3 El suelo y el ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico es el proceso de circulación del agua en la hidrosfera. Está conformado por distintas fases que ocurren de forma continua donde el agua se traslada entre éstos o cambia

de estado físico. El sol es la principal fuente de energía en el ciclo del agua, éste calienta el líquido del océano, así como la superficie terrestre, y la evapora; en la atmósfera el vapor se enfría, condensa y precipita sobre la superficie o los océanos; el agua que precipita puede ser interceptada por la vegetación, infiltrarse, convertirse en flujo superficial, subsuperficial o percolar y convertirse en recarga para acuíferos. Un porcentaje del agua que es interceptada o presente como flujo superficial regresa a la atmósfera al ser evaporada nuevamente. Finalmente, el agua superficial y parte del flujo subsuperficial-subterráneo, regresa al océano y el ciclo se reinicia (Chow et al., 1994).

El movimiento de agua en el suelo, conceptualmente, tiene dos partes: i) móvil (agua retenida temporalmente en los macroporos); e ii) inmóvil (agua retenida en capilares muy delgados o microporos) (Valenzuela & Armando, 2010). El potencial de retención de agua en el suelo está relacionado con la estructura edáfica (textura, porosidad, materia orgánica, entre otros) y condiciones hidrológicas locales (Agudelo et al., 2016). El movimiento de agua a horizontes inferiores inicia con la infiltración, por lo tanto, la buena condición física de la capa superficial del suelo garantiza el movimiento vertical del agua. La protección que brinda la vegetación natural evita el deterioro y encostramiento del suelo ocasionado por procesos naturales o mecánicos. Es así que la vegetación cumple dos funciones importantes: i) protege el suelo de la exposición directa a las condiciones climáticas (evita su degradación física, y garantiza su conservación) y ii) proporciona biomasa y sustenta los organismos del suelo encargados de la descomposición y estabilización de la materia orgánica (I. F. Benavides et al., 2018).

#### ***3.1.4 Los servicios ecosistémicos del páramo***

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio definió formalmente el concepto de servicios ecosistémicos (SE) como los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas (Reid et al., 2005) y su interpretación crea un vínculo entre el estado de los ecosistemas y el bienestar humano (Martín-López et al., 2012). El páramo es ampliamente reconocido por los servicios hídricos proporcionados (e.g. suministro de agua y regulación hídrica) (R. Hofstede et al., 2003). A continuación, se definen estos dos servicios ecosistémicos (Reid et al., 2005):

- *Suministro de agua*: es la cantidad y calidad de agua proporcionada por un ecosistema.
- *Regulación hídrica*: capacidad del ecosistema de regular los flujos de humedad (sostener un flujo base en época de baja precipitación y regular los eventos extremos de precipitación), a través de diferentes estructuras (e.g. suelo).

El concepto de Cascada de Servicios Ecosistémicos (CSE) conecta de forma lógica las estructuras, procesos y beneficios otorgados por un ecosistema (R.S. de Groot et al., 2010), distinguiendo los medios de los fines. De esta forma, siguiendo el concepto de CSE, los servicios de suministro de agua y regulación hídrica están estrechamente relacionados, dado que una buena capacidad de regulación hídrica garantiza un suministro de agua constante y, por el contrario, un deterioro en el servicio de regulación hídrica influye negativamente sobre el suministro de agua. Por lo tanto, la regulación hídrica es un servicio de orden superior, con un vínculo más cercano al suelo, es así que para englobar de forma general estos dos servicios (suministro de agua y regulación hídrica), en esta investigación se adopta el término: servicio de regulación hidrológica (Patiño et al., 2020); siguiendo el concepto de CSE.

El servicio de regulación hidrológica tiene como funciones principales: almacenamiento estacional de humedad y su posterior liberación en las corrientes superficiales (Patiño et al., 2020), regulación del flujo superficial (amortiguación de zonas de inundación), regulación de periodos extremos (sequia) y el suministro de agua (Rudolf S. De Groot et al., 2002). Estos beneficios son derivados de una combinación de características entre el suelo, vegetación y clima particular del páramo, por lo que el tipo de cobertura, el uso del suelo y prácticas de manejo pueden incidir directamente sobre el servicio de regulación hidrológica.

### **3.2 Estado del Arte**

En este apartado se sintetizan los principales hallazgos del cambio de uso del suelo sobre las propiedades hidrofísicas y su efecto sobre el servicio de regulación hidrológica en páramo. El proceso de búsqueda y selección de literatura, así como las principales características de cada investigación se exponen en el Anexo B.

#### ***3.2.1 Principales actividades antrópicas en el ecosistema de páramo***

La forestación y las actividades agropecuarias (e.g. cultivo y ganadería extensiva) son los usos del suelo de carácter antrópico más extendidos en páramo (R. Hofstede, 2001). Se han relacionado estos usos con un cambio en la estructura del suelo, pérdida en la capacidad de retención de humedad y disminución de la materia orgánica (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006). Por ejemplo, se ha encontrado que la forestación con especies exóticas (pino o eucalipto) deseca el suelo (W. Buytaert, Célleri, et al., 2007); el pastoreo no permite la regeneración de una capa vegetal compacta y densifica el suelo por pisoteo (R. Hofstede, 1995); la preparación del suelo para cultivo genera un desecamiento superficial, agregados hidrofóbicos-desaturados e invierte los horizontes (W. Buytaert, De Bievre, et al., 2002). En términos generales, el uso intensivo, la sobre

explotación, el uso de agroquímicos, la expansión de la frontera agrícola y su posterior desuso (barbecho) influyen sobre el servicio de regulación hidrológica al modificar las características naturales del suelo de páramo (R. Hofstede, 2001). Existen otras actividades antrópicas como el turismo y minería que han tomado fuerza en el ecosistema de páramo en la última década que pueden también representar una amenaza (Ramírez & Bautista, 2018), (Alonso et al., 2020). De acuerdo con la literatura consultada, el principal cultivo reportado es la papa (*Solanum tuberosum*) (Avellaneda-Torres et al., 2018; W. Buytaert, Iñiguez, et al., 2007; Daza, Flórez, Triana, et al., 2014; Montes-Pulido et al., 2017; Peña-Quemba et al., 2016), y no se encuentran estudios sobre el efecto de la cebolla junca (*Allium fistulosum*) en el suelo de páramo hasta la fecha.

### **3.2.2 Transformación del paisaje de páramo**

El análisis espacial y temporal del cambio del uso del suelo en páramo es limitado (Curatola et al., 2015; Wigmore & Gao, 2014) debido a la compleja topografía y condiciones atmosféricas que limitan la adquisición de imágenes satelitales (Colby & Keating, 1998; Conese & Maselli, 1991). Sin embargo, existen estudios locales que analizan este fenómeno, principalmente en Ecuador y Colombia.

Hofstede et al., (2002) argumentan que el páramo ecuatoriano ha presentado el mayor cambio en la región andina. En Ecuador central, en el periodo 1963-1991, el páramo y bosque nativo presentaron reducciones en área de 0.8 y 2.1% por año, respectivamente (Balthazar et al., 2015). Por otro lado, en Ecuador del sur, Curatola et al., (2015) observaron un aumento de la extensión de pastos en páramo y una fragmentación del bosque nativo (1975-2001). Ross et al., (2017) en la cuenca Chambo reportaron una tasa de pérdida de 2.1 y 0.4 % de área por año en bosque nativo y páramo, respectivamente, entre los años 1979-2014. Además, encontraron que

solo el 22% del ecosistema de páramo se conserva intacto. Los principales impulsores del cambio del uso del suelo en Ecuador están asociados a la Reforma Agraria y de Colonización, y las políticas de forestación (Ross et al., 2017).

En Colombia, el uso antrópico que domina el paisaje de páramo es el mosaico de pastos y cultivos (Humboldt, 2014). Para el año 2002, se estimó que el 24.9% del área de páramo fue transformada a cultivos y el 55.5% puede ser afectada por el cambio climático (Hincapié et al., 2002). En Colombia central, en el periodo 1979-1990, el páramo de Laguna verde registró un aumento de los cultivos en 106%, pastizales en 164% y un descenso del bosque nativo en 32% (Van der Hammen et al., 2002). En Colombia oriental, en el páramo de Berlín se observó un aumento del mosaico de pastos y cultivos en 49% y un descenso del bosque ripario en 94%, en el lapso 1997-2015 (Macías & Omaña, 2018). Por otro lado, se reportan transformaciones bajas, como en el páramo de Paja Blanca con un cambio de 7.5% por actividades antrópicas (Muñoz Guerrero, 2017), similar a otros paramos colombianos: Guanacas-Puracé-Conucos (7.3%), Chilí-Barragán (6.9%) y Chingaza (6.7%) (Humboldt, 2014).

A diferencia de otros ecosistemas tropicales, el páramo puede ser adaptado fácilmente con la quema (J. A. Morales & Estévez, 2006). No obstante, es un suelo que no presenta condiciones favorables para el cultivo por lo cual requiere una gran intervención (R. Hofstede et al., 2003). El rápido abatimiento del suelo y su abandono obligan a ocupar áreas cada vez más altas, desplazando la frontera agrícola a mayores alturas (Sandoval, 2004). Las políticas de uso del suelo, deforestación, urbanización y movimiento de personas son los principales impulsores de la degradación en el ecosistema de páramo (T. Peters et al., 2013).

### 3.2.3 *Principales características del suelo de páramo*

El suelo de páramo es húmedo, ácido, rico en humus, desaturado, enmohecido, de color pardo oscuro y con una lenta descomposición orgánica (Guhl, 1982). Los Andosoles tienen una alta capacidad de retener agua debido a la presencia de minerales amorfos de arcilla como alófono e imogolita (Rousseaux & Warkentin, 1976; S. Shoji et al., 1993; Sadao Shoji & Fujiwara, 1984). La acumulación de MOS por el clima y la complejización organometálica resulta en características hidrofísicas similares a un suelo con alófono debido a la interacción entre la porosidad textural y los coloides orgánicos, lo que da lugar a un suelo con alta capacidad de retención de humedad a diferentes succiones (W. Buytaert et al., 2005a). En el Anexo C se presenta un resumen de las principales propiedades hidrofísicas del suelo de páramo bajo vegetación natural en horizontes superficiales (H, O u A); con base en dicha información, a continuación, se sintetizan las principales características del suelo de páramo:

- Posee una estructura abierta, porosa granular, friable, baja densidad aparente y alta tasa de infiltración que le confiere una alta capacidad de retención de humedad (4.1-7.5 mL/g) (W. Buytaert et al., 2005a; Serrano Giné & Galárraga Sánchez, 2015). El suelo de páramo presenta una alta capacidad de infiltración, que limita la generación de escorrentía superficial (L. Sarmiento, 2000); se reportan tasas de infiltración de 50-60 mm/h (Jérôme Poulénard et al., 2001) y 10-20 mm/h (W. Buytaert et al., 2005a) en páramo.
- Alto contenido de carbono orgánico y humedad (Podwojewski et al., 2002a). De acuerdo con Buytaert et al. 2007 (W. Buytaert, Célleri, et al., 2007), el carbono puede ser de hasta 40% en regiones húmedas (>900 mm/año), mientras en regiones secas (<600 mm/año) es de aproximadamente 7% (Podwojewski et al., 2002a).

- Alta capacidad de retención en estado saturado que puede exceder 4 g/g y decrece rápidamente a 0.1-2.0 g/g a 1500 kPa (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006). El contenido de humedad disminuye con la profundidad, siendo mayor en los primeros 30 cm de suelo (61.7% del volumen total) (I. F. Benavides et al., 2018).
- Alta conductividad hidráulica que varía con la profundidad: 5.3 mm/h a 3 cm y 0.52 mm/h a 15 cm (W. Buytaert et al., 2005a).
- La densidad aparente es altamente variable y depende de las condiciones locales de humedad, con valores que típicamente oscilan entre 0.15-0.90 g/cm<sup>3</sup> (W. Buytaert et al., 2005).

### ***3.2.4 El cambio de uso y el suelo de páramo***

El cambio de uso del suelo repercute en el servicio de regulación hidrológica proporcionado por el páramo, relacionado paralelamente con una alteración de las propiedades hidrofísicas del suelo (Patiño et al., 2020). El cambio de uso del suelo en páramo provoca una reducción en el carbono y materia orgánica del suelo producto de su exposición directa a las condiciones atmosféricas; esta materia orgánica se oxida y es liberada a la atmosfera en forma de CO<sub>2</sub> (Peña-Quemba et al., 2016). Las actividades de preparación del suelo (arado y quema) aumentan la disponibilidad de bases intercambiables con altos rendimientos en las primeras cosechas (R. Hofstede, 2001), no obstante, promueven la generación de agregados hidrofóbicos (Piccolo & Mbagwu, 1999), lo que a largo plazo produce el abatimiento del suelo y su abandono (Daza, Flórez, Triana, et al., 2014). Por otro lado, se presenta una reducción en el contenido de humedad del suelo de aproximadamente 34% (Patiño et al., 2020) que puede llegar a ser irreversible producto del arado (Jérôme Poulénard et al., 2001). La forestación con especies exóticas disminuye la materia orgánica del suelo, promueve la pérdida de la capacidad de retención

de humedad y un cambio en la distribución de la porosidad (W. Buytaert, Célleri, et al., 2007; Patiño et al., 2020).

Se ha reportado que se presenta un incremento de la densidad aparente y reducción de la porosidad del suelo por la introducción de actividades agrícolas (Patiño et al., 2020). El pastoreo es el uso que genera mayores cambios en la distribución de la porosidad del suelo (R. Hofstede, 1995), producto de la lenta regeneración vegetal, agravado por el pisoteo que compacta el suelo (R. Hofstede, 1995). En parcelas cultivadas, el arado puede aumentar la aireación y porosidad del suelo, sin embargo, a largo plazo se observa que el arado recurrente provoca un fenómeno conocido como ‘pie de arado’ (Strudley et al., 2008) y un aumento de la densidad aparente (Daza, Flórez, Triana, et al., 2014). El cambio en la distribución de la porosidad en el suelo influye sobre la conductividad hidráulica que generalmente reduce la velocidad del agua en el suelo, sin embargo, en algunos casos sobre parcelas recientemente aradas, se puede observar un aumento (Patiño et al., 2020). Por otro lado, algunos autores evaluaron la capacidad de retención de humedad en un amplio rango de presiones y reportan una mayor degradación a altas succiones (Camargo García et al., 2012; Daza, Flórez, Triana, et al., 2014; Farley et al., 2004; Quichimbo et al., 2012).

### ***3.2.5 El servicio de regulación hidrológica en páramo***

El ecosistema de páramo es reconocido como eje articulador en el desarrollo Andino, principalmente como proveedor de agua (R. Hofstede et al., 2003). En este apartado se sintetizan los principales hallazgos en el servicio de regulación hidrológica (regulación hídrica y suministro de agua) proporcionados por el ecosistema de páramo.

### **Regulación hídrica**

La topografía de páramo en sí misma actúa como regulador de agua con humedales y lagos que aportan capacidad de regulación (Hungerbühler et al., 2002; Kehrer & Van der Kaaden, 1979). En Colombia, en la cordillera Oriental y Central, son comunes las lagunas de páramo, y son prácticamente ausentes en la cordillera Occidental (M. Morales et al., 2007). Por otro lado, la estructura edáfica y las características particulares del suelo de páramo le proporciona una alta capacidad para regular flujos de agua (Luteyn & Balslev, 1992; Mena et al., 2001; Jérôme Poulenard et al., 2003).

Buytaert et al. (2004) (W Buytaert et al., 2004) investigaron los flujos de descarga en pequeñas cuencas de páramo ( $\approx 2 \text{ km}^2$ ) y encontraron una razón de flujo pico/flujo base de 5 para una cuenca no intervenida y 11.9 para una cuenca cultivada. Por otro lado, Buytaert et al. (2005) (W. Buytaert et al., 2005a) encuentran una reducción del 40% en la regulación hídrica de una cuenca intervenida frente a una natural. Por otro lado, Sarmiento (2000) (L. Sarmiento, 2000) no encuentra una diferencia significativa en la escorrentía superficial por el cambio de uso del suelo inferior al 2%. Estos resultados exponen la alta variabilidad de los resultados de la función reguladora ante el cambio de uso del suelo en ecosistema de páramo, el cual depende de las condiciones particulares de cada localidad (Patiño et al., 2020). Sin embargo, el aumento de los flujos pico en cuencas cultivadas es asociado con un aumento del drenaje e interconexión de las depresiones superficiales que anulan el efecto de almacenamiento (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006; R. Hofstede & Rossenaar, 1995).

### **Suministro de agua**

Existe una relación entre el rendimiento hídrico y la precipitación, sin embargo, este vínculo no es limitante en el ecosistema de páramo como ocurre en áreas con baja precipitación y balance hídrico positivo (Brooks et al., 2003). Esta particularidad probablemente se deba a la baja tasa de evapotranspiración (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006) estimada en 0.8 y 1.5 mm/día (páramo natural) (García et al., 2004) y la baja estacionalidad del clima con una distribución equitativa de la lluvia a lo largo del año generando un flujo base sostenido (Célleri et al., 2010). Otras entradas de humedad como la neblina y el rocío pueden aumentar la humedad total en el sistema hidrológico (R. Hofstede, 1997). En bosque de niebla, este mecanismo de intercepción de humedad representa una adición de 5-20% de la precipitación (Ataroff & Rada, 2000; Bruijnzeel & Proctor, 1995) y en páramo se ha estimado en un ingreso de 18% (Bruijnzeel & Proctor, 1995) y 7-28% (M. F. Cárdenas et al., 2017), respecto a la precipitación. Sin embargo, no existe un procedimiento estándar para cuantificar la intercepción de neblina. Por lo tanto, los resultados pueden variar a causa del mecanismo empleado en la cuantificación (Gonzalez, 2000). En Colombia se estima que la producción de agua de las cuencas de páramo es de 1400 mm/año (4% oferta hídrica) (MMA (Ministerio de Medio Ambiente), 2005), sin embargo, son naciente de los principales ríos que suministran el 70% de la demanda hídrica.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo General**

Evaluar el efecto del cambio en la cobertura natural de páramo por cultivo en las propiedades hidrofísicas del suelo relacionadas con los servicios de regulación y suministro de agua en Berlín (Santander).

### **4.2 Objetivos Específicos**

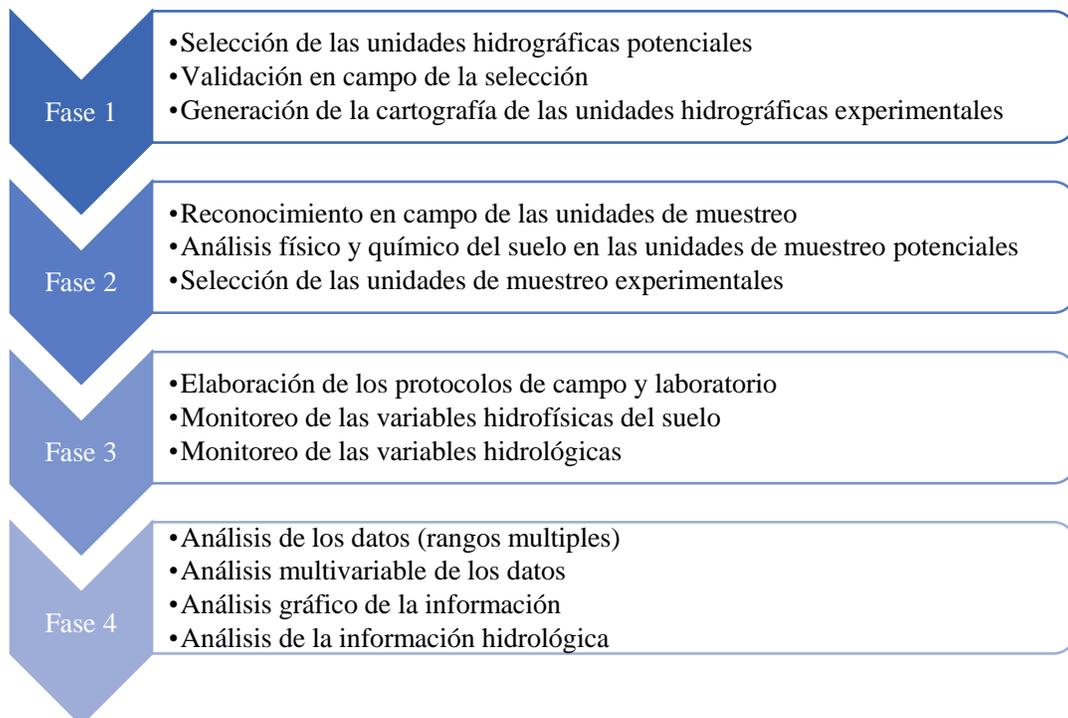
- Comparar la transformación de las propiedades hidrofísicas del suelo de páramo natural frente a cultivo en un sistema de cuencas pareadas.
- Determinar la influencia del régimen de lluvia en las propiedades hidrofísicas del suelo de páramo natural e intervenido.
- Relacionar el impacto del cultivo sobre el servicio de regulación y suministro de agua de una unidad hidrográfica en páramo de forma indirecta a través de las propiedades hidrofísicas del suelo.

## 5. Metodología

La presente investigación fue desarrollada bajo el enfoque metodológico de cuencas pareadas sobre dos unidades hidrográficas. Una unidad hidrográfica se considera como intervenida, es decir, con presencia de actividades agrícolas. La otra unidad se considera como control, es decir, dominada por vegetación natural de páramo. Este enfoque permite analizar el efecto del cambio de uso del suelo separando la variabilidad climática, efecto de la topografía, edafogénesis regional y geomorfología, de los resultados. De esta forma, es posible atribuir las conclusiones con una mayor certeza al cambio del uso del suelo y no a otro factor que pueda intervenir sobre los resultados. En la Figura 1 se sintetiza la metodología ejecutada en la presente investigación desarrollada en cuatro fases: i) selección y caracterización de las unidades hidrográficas (UH); ii) identificación de las unidades de muestreo (UM) experimentales; iii) monitoreo de las propiedades hidrofísicas del suelo y iv) análisis de datos.

**Figura 1**

*Estructura general de metodología de investigación.*



En los numerales a continuación se precisa cada una de las fases de la metodología de investigación.

## 5.1 Fase 1: Selección de las unidades hidrológicas

### 5.1.1 Selección de las unidades hidrográficas potenciales

La selección de las UH potenciales se realizó con base en información secundaria de la cuenca del Río Tona (Tabla 2) disponible en ese momento (junio del 2018). La búsqueda del área de estudio se centró en la parte alta de la cuenca del Río Tona donde existe una mayor extensión de vegetación natural de páramo junto con algunos cultivos (principalmente papa y cebolla junca), mientras, en la parte media y baja, la vegetación natural ha sido reemplazada casi totalmente por usos agrícolas.

**Tabla 2**

*Mapas empleados en la selección de las unidades hidrográficas potenciales.*

<i>Mapa</i>	<i>Escala</i>	<i>Fuente</i>
Cartografía e hidrografía	1:100000	(Duarte, -referencia personal-)
Mapa de usos del suelo 2015	1:25000	(Macías & Omaña, 2018)
Mapa de tipos de suelo	1:100000	(IGAC, 2003)

El procedimiento para elegir las UH potenciales fue:

- i. En el software ArcGis se cruzó la información del mapa de usos del suelo de 2015 y el mapa de tipos de suelo para generar unidades de respuesta (áreas con el mismo uso y tipo de suelo).
- ii. Mediante inspección visual se eligieron pares de UH bajo una misma unidad de respuesta con usos del suelo diferentes (natural e intervenido).

- iii. De estos pares de UH preliminares se determinaron sus parámetros geomorfológicos, así como el porcentaje de uso natural e intervenido para cada UH.
- iv. Se eliminaron los pares de UH que presentaron una de las siguientes situaciones: características geomorfológicas disimiles, ubicación en zona alejada o de difícil acceso y ausencia de un uso del suelo (natural o intervenido) claramente dominante.
- v. Se seleccionaron los pares de UH potenciales que cumplieron en mayor medida los requerimientos descritos anteriormente.

Las características geomorfológicas en la selección de las UH potenciales fueron: área, forma, elevación máxima y mínima, pendiente promedio del terreno y el cauce principal, tipo de suelo y características geológicas generales (Boris F Ochoa-Tocachi et al., 2017). De esta forma, se buscó seleccionar dos UH similares en términos geomorfológicos (adyacentes entre sí), diferenciadas principalmente por el uso del suelo: UH intervenida (presencia de actividades agrícolas) y UH control (dominada por la vegetación natural de páramo).

### ***5.1.2 Validación de la selección de las unidades hidrográficas***

Las características de las UH potenciales fueron validadas en dos salidas de campo (Tabla 3) para inspeccionar los usos del suelo, características de la zona y la disponibilidad de los propietarios de los predios existentes en las UH. Para este primer acercamiento, se contó con el apoyo de funcionarios de la Autoridad Ambiental regional conocedores de la zona y relacionados con los propietarios.

**Tabla 3**

*Salidas de campo en la selección de las unidades hidrográficas.*

<i>Salida</i>	<i>Fecha</i>	<i>Propósito</i>
1	21/07/2019	Validación de la información secundaria en las UH potenciales. Asesoría de los habitantes de la zona en la verificación de la información. Validación de los usos dominantes del suelo y facilidad de acceso.
2	03/08/2019	Verificación de la disponibilidad de los propietarios de los predios para efectuar la investigación. Recorrido detallado de las UH con mayor potencial para realizar el proyecto de investigación.

\*Nota. UH: unidad hidrográfica.

Luego de las visitas de validación destacaron las siguientes observaciones: i) la UH control presentó una extensa área natural, sin embargo, hacia su cierre exhibía una zona de barbecho y ii) la UH intervenida presentó tres parcelas cultivadas hacia su cierre (una de papa –mayor extensión- y las restantes dos de cebolla junca), por otro lado, esta UH hacia su parte media y alta exhibía vegetación natural de páramo.

## **5.2 Fase 2: Identificación de las unidades de muestreo**

### **5.2.1 Reconocimiento en campo de las unidades de muestreo**

Mediante recorrido en zigzag (Schoeneberger et al., 2002) fueron exploradas las UH experimentales para identificar y corroborar los usos del suelo reportados por Macías & Omaña (2018) (Macías & Omaña, 2018). Se inició en la parte alta de las UH y se descendió con este patrón. Las principales características como: uso dominante, pendiente y atributos del suelo (estado de humedad, consistencia, color, entre otros) (Schoeneberger et al., 2002) fueron registradas en el formulario de identificación de las UM potenciales (Anexo E). Se tomaron 35 puntos representativos (homogéneos en uso del suelo, topografía y características del suelo),

localizados mediante la aplicación Avenza Maps (<https://www.avenza.com/avenza-maps/>), fotografiados e identificados mediante estaca dispuesta en sitio. Adicionalmente, se incluyeron puntos donde las condiciones naturales cambiaron por efecto antrópico, topográfico o natural. Finalmente, cada una de las áreas con características comunes, en términos de uso, pendiente y características del suelo, pertenecientes a cada UH, fue identificada como una UM potencial.

### ***5.2.2 Cartografía de las unidades hidrográficas experimentales***

Del par de UH experimentales se generó la cartografía detallada mediante fotogrametría empleando vehículo aéreo no tripulado (dron) tipo Tuffwing de ala fija. Se realizaron dos vuelos con una duración promedio de 20 minutos cada uno el día 23/01/2020. Como resultado se capturaron 304 fotografías a una altura promedio de 224 m; paralelamente se tomaron 10 puntos de georreferenciación en suelo como control. Las fotografías cuentan con una resolución de 7.4 cm/píxel con un error de reproyección de 1.28 píxeles. El procesamiento y análisis de las imágenes se realizó en el software Agisoft (<https://www.agisoft.com/>). La captura y procesamiento de las imágenes estuvo a cargo del grupo de Estudios en Paisajes Socio-Ecológicos de la Universidad Industrial de Santander (UIS), adscrito a la Escuela de Biología. A partir de los modelos generados, se sustrajeron las características geomorfológicas, porcentajes de uso del suelo y drenajes.

### ***5.2.3 Caracterización preliminar del suelo en las unidades de muestreo potenciales***

Se realizó una campaña de muestreo mediante un diseño discreto estratificado en profundidad (0-5, 10-15 y 20-25 cm) para caracterizar propiedades como: Contenido de humedad (CH), Materia orgánica del suelo (MOS), Densidad aparente (Da), Porosidad total (Pt) pH, Conductividad eléctrica (CE), Textura y Densidad real (Dr) sobre cada UM potencial. En la Tabla 4 se señala la norma utilizada para el análisis de cada propiedad. Se procuró seleccionar puntos

que estuvieran distribuidos sobre toda la UM para obtener resultados representativos de cada uno de los usos dominantes. Para esta caracterización preliminar del suelo, se recolectaron 30 y 57 muestras inalteradas y alteradas, respectivamente; de 29 perforaciones a tres profundidades (0-5, 10-15 y 20-25 cm).

La muestra inalterada se obtuvo mediante barreno manual (saca núcleos de muestras inalteradas marca Maser) en anillo de pared delgada de 100 cm<sup>3</sup> (tipo Kopecky). De igual forma, se extrajeron dos réplicas alteradas con una masa de 250-300 g, manualmente conservadas en bolsa hermética. Las muestras de suelo fueron preservadas en el anillo con tapas plásticas en bolsa hermética rotulada y fueron transportadas en cava plástica protegidas de la vibración mediante láminas de espuma (foamboard), de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D4220-95 (ASTM, 2007a). Los ensayos se realizaron en el laboratorio del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) hasta máximo dos días después de la recolección de las muestras.

**Tabla 4**

*Diseño del muestreo de las unidades de muestreo potenciales.*

<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Variables</i>	<i>Norma</i>	<i>NM (NR)</i>
	Contenido de humedad	ASTM D2216-10 (ASTM, 2005)	
	Materia orgánica del		
0-5	suelo	ASTM F1647-11 (ASTM, 2011a)	
10-15	pH	ASTM D4972-01 (ASTM, 2001)	1(2)
20-25	Conductividad		
	eléctrica	SSETM ECC1A3 (USDA, 2011)	
	Densidad aparente	ASTM D854-14 (ASTM, 2014b)	
	Porosidad total	ASTM D422-63 (ASTM, 2007b)	

Densidad real	ASTM D7263-09 (ASTM, 2011a)	1*
Textura	ASTM F1815-11 (ASTM, 2011b)	

\*Nota. Corresponde a una muestra compuesta por tres sub-muestras de suelo. NM: número de muestras. NR: número de réplicas.

Se usó una muestra y dos replicas inalteradas para las variables de: Contenido de humedad (CH), Densidad aparente (Da), Materia orgánica del suelo (MOS), Porosidad total (Pt), pH y Conductividad eléctrica (CE). La textura y la Densidad real (Dr) se determinaron a partir de un espécimen compuesto formado a partir de las tres sub-muestras.

#### 5.2.4 Selección de las unidades de muestreo experimentales

La caracterización preliminar del suelo en las UM potenciales junto con el reconocimiento en campo del área de estudio permitió seleccionar las UM experimentales para la ejecución del proyecto de investigación. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con las propiedades: CH, MOS, Da, Pt, pH y CE; lo que permitió comparar las diferencias entre las UM a través de la variabilidad respondida por cada propiedad. De esta forma, se eligieron las UM experimentales (definitivas) mediante la reconstrucción de las observaciones en campo y el ACP.

### 5.3 Fase 3: Monitoreo de las propiedades hidrofísicas del suelo

De acuerdo con el propósito de la investigación y la revisión de literatura (Anexo A), se cuantificaron las propiedades hidrofísicas y variables hidrológicas que se muestran en la Tabla 5. Estas variables pueden ser divididas en dos grupos: i) relacionadas con el servicio de regulación hidrológico y ii) relacionadas con las propiedades hidrofísicas del suelo.

**Tabla 5**

*Variables seleccionadas en la investigación del suelo de páramo.*

<i>Componente</i>	<i>Variable / Propiedad</i>	<i>Unidades</i>
<i>Hidrológico</i>	Precipitación	mm/día
	Caudal	L/s
<i>Suelo</i>	Contenido de humedad	%
	Capacidad de infiltración	mm/h
	Materia orgánica del suelo	%
	Capacidad de retención de humedad	%
	Conductividad hidráulica saturada	mm/h
	Densidad aparente	gr/cm <sup>3</sup>
	pH	-
	Densidad real	gr/cm <sup>3</sup>
	Porosidad total	%
	Textura	%
	Conductividad eléctrica	μS/cm

El plan de muestreo del suelo, la recuperación de la información hidrológica, los equipos/normas, la periodicidad y otros detalles sobre el monitoreo se detallan a continuación.

### **5.3.1 Monitoreo hidrológico**

La precipitación y el caudal fueron las variables seleccionadas para vincular el servicio de regulación hidrológica y las propiedades hidrofísicas del suelo. Los equipos que se muestran en la Tabla 6 fueron los empleados para la cuantificación de las variables hidrológicas. La instalación de los equipos se efectuó de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. La estación meteorológica (Figura 2a) se empleó para la captura de la precipitación y el canal en acrílico, barómetro y transductor de presión, para el registro del caudal (Figura 2b).

**Tabla 6***Equipos instalados para el componente hidrológico.*

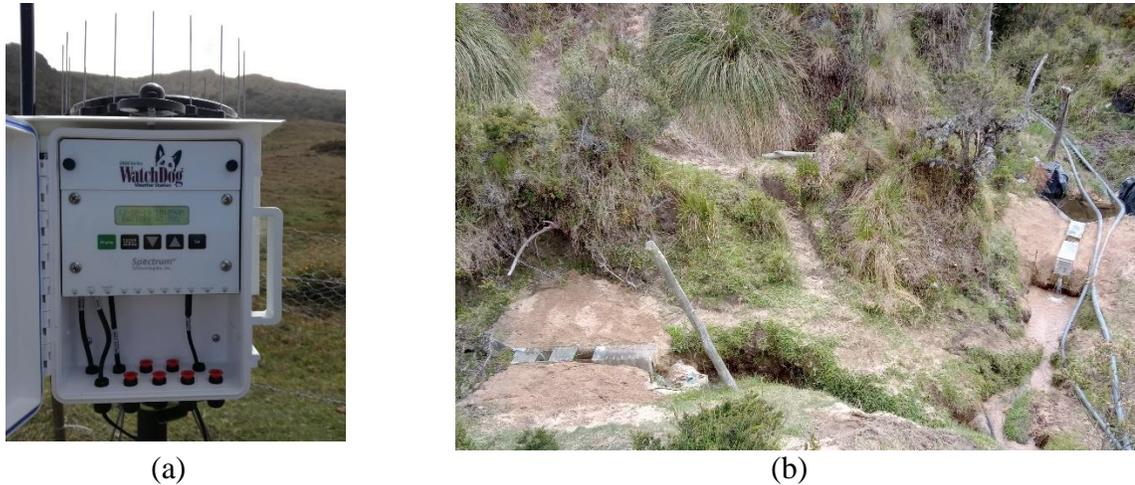
<i>Equipo</i>	<i>Referencia (Marca)</i>	<i>UH control</i>	<i>UH intervenida</i>	<i>Variable hidrológica asociada</i>
Estación meteorológica	WatchDog WD 2700 (Spectrum Technologies)	X		Precipitación
Canal acrílico	Elaboración GPH	X	X	Caudal
Barómetro	U20L-04 (Onset)	X		Presión atmosférica
Transductor de presión	U20L-04 (Onset)	X	X	Presión de columna de agua

*\*Nota.* Todos los datos fueron registrados con una frecuencia de cinco minutos; UH: unidad hidrográfica.

La instalación de los equipos para el monitoreo hidrológico se efectuó dos semanas antes del primer monitoreo del suelo para correlacionar las variables hidrológicas con las propiedades hidrofísicas del suelo. La precipitación se midió con una resolución de 0.2 mm y precisión de 2%; por otro lado, el caudal fue cuantificado con una estructura de aforo en acrílico (vertedero triangular) y tres medidores automáticos de presión absoluta (resolución de 0.14 cm y precisión de 0.4 cm). La captura de información hidrológica, para todos los equipos, se realizó cada cinco minutos y su recuperación fue mensual de forma manual. Para mayor información sobre el monitoreo hidrológico puede ser consultado el trabajo de Celis, (2020).

**Figura 2**

*Equipos y estructuras para el monitoreo hidrológico; (a) estación meteorológica y (b) canales en acrílico.*

**5.3.2 Monitoreo del suelo**

La textura y  $D_r$  fueron cuantificadas en la caracterización preliminar de las UM potenciales dado que son propiedades que no varían por efecto natural en un periodo corto de tiempo (Jaramillo, 2002), por lo tanto, fueron medidas en una sola ocasión. Para la textura y  $D_r$  se recolectaron muestras alteradas con una masa representativa de 200-250 g por profundidad, para conformar una muestra compuesta de 600-750 g (ASTM, 2014a) conservadas en bolsa hermética rotulada. La capacidad de infiltración (CI) se cuantificó en campo mediante un ensayo de infiltración de doble anillo acompañado de una réplica, en un área inmediatamente adyacente, sobre cada uso dominante. Las pruebas fueron efectuadas en temporada de baja precipitación, evitando una subestimación de la CI (Jaramillo, 2002). Debido a la dificultad de acceso, poca disponibilidad de agua en la parte media-alta y alta de las UH, sumado al tiempo de ensayo, se realizó únicamente una prueba por uso dominante. La conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) fue aproximada mediante el modelo empírico de Kostiaikov utilizado para estimar la lámina de

infiltración a partir de la tasa de infiltración. Más información sobre este modelo puede consultarse en Ravi et al., (1998).

El monitoreo del suelo se realizó con una frecuencia de tres semanas, durante siete meses (agosto 2019 - marzo 2020), y se cuantificaron las propiedades hidrofísicas que en la literatura se encontró que presentan una mayor variación asociada al cambio de uso del suelo (CH, COS, Pt, Da, pH y CE), vinculadas con el estado de humedad del suelo (Weil, Raymond R; Brady, 2016). Por otro lado, la Capacidad de retención de humedad (CRH) y Estabilidad estructural (EE) se cuantificaron con una muestra y réplica, obtenida en un área adyacente, de forma superficial (0-10 cm). Se realizaron dos rondas de muestreo en las fechas especificadas en el Anexo D, paralelo al monitoreo del suelo, para cuantificar la CRH y EE sobre cada UM, dado que son propiedades con una estabilidad temporal sobre usos de suelo homogéneos (Novelli et al., 2013).

Los especímenes de suelo obtenidos en la caracterización preliminar y en el monitoreo del suelo cada tres semanas se basaron en un diseño discreto aleatorio estratificado en profundidad (0-5, 10-15 y 20-25 cm). Las muestras fueron extraídas mediante barreno manual (saca núcleos – muestra inalterada- Maser) en anillo de pared delgada de 100 cm<sup>3</sup> (tipo Kopecky). Las muestras inalteradas superficiales (0-10 cm) para el ensayo de la CRH fueron obtenidas en anillo de pared delgada de 250 cm<sup>3</sup> insertados y extraídos manualmente. Las muestras fueron preservadas como se especifica en la sección 5.2.3, así como el tiempo de ejecución de los ensayos. En la Tabla 7 se resume el plan de muestreo descrito anteriormente (profundidad, frecuencia, número de muestras y réplicas).

**Tabla 7***Plan de muestreo del suelo.*

<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Propiedad</i>	<i>Tipo de muestra</i>	<i>Norma/Método</i>	
Superficial	Caracterización inicial	CI	C	ASTM D3385-18	Infiltrómetro de doble anillo Modelo Kostiakov
		Ks		ASTM F1815-11	
Compuesta	Caracterización inicial	Textura	A	ASTM D422-63	Granulometría/Hidrometría Picnómetro
		Dr	A	ASTM D854-14	
0-5	Tres semanas	CH	IA	ASTM D2216-10	Gravimetría
		MOS	A	ASTM F1647-11	Ignición
10-15	Tres semanas	Da	IA	ASTM D7263-09	Peso unitario
20-25		Pt	IA	ASTM F1815-11	Peso unitario
		pH	A	ASTM D4972-01	Potenciómetro
		CE	A	SSETM ECC1A3	Potenciómetro
0-10	Seis semanas	EE	I	Método de Yoder	Tamizado húmedo
		CRH**	IA	ASTM D6836-02	Evaporación de Schindler

*\*Nota.* IA: Inalterada; A: alterada; C: campo; CI: capacidad de infiltración; Dr: densidad real; CH: contenido de humedad; MOS: materia orgánica del suelo; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; CE: conductividad eléctrica; EE: estabilidad estructural; Ks: conductividad hidráulica saturada; CRH: curva de retención de humedad. \*\* Curva de retención de humedad en rango húmedo (0-100 kPa), estimado mediante modelo de van Genuchten de Durner para succiones superiores. Todos los especímenes de suelo contaron con una muestra y su respectiva réplica.

#### **5.4 Fase 4: Análisis de datos**

El análisis de datos se dividió en tres componentes: i) efecto del cambio del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas, ii) efecto del régimen de lluvia sobre las propiedades del suelo y iii) relación entre las propiedades hidrofísicas del suelo, el rendimiento hídrico y la precipitación.

Los diferentes análisis estadísticos y/o gráficos fueron realizados en el software R (<https://www.r-project.org/>) y MiniTab 18 (<http://www.minitab.com>).

La determinación del régimen de lluvia se obtuvo con el comportamiento de la precipitación multianual de la zona de estudio (Anexo F). La información de lluvia fue tomada de las estaciones Picacho y Berlín con códigos IDEAM 23190300 y 37015030, respectivamente (IDEAM, 2020); ubicadas dentro de la cuenca del Río Tona en el periodo 1973-2018. La temporada de alta precipitación se presenta entre los meses de marzo-mayo y septiembre-noviembre; el resto de tiempo corresponde a la temporada de baja precipitación. Exactamente, el periodo de alta y baja precipitación trabajado en la presente investigación fue: 19/08/2019 - 30/11/2019 y 01/12/2020 - 15/03/2020; respectivamente.

#### ***5.4.1 Efecto del cambio de uso del suelo y régimen de lluvia sobre las propiedades hidrofísicas del suelo***

La información de las propiedades del suelo en el análisis del cambio de uso del suelo y régimen de lluvia (alta precipitación y baja precipitación), se evaluaron a las tres profundidades en las que los especímenes de suelo fueron extraídos (0-5, 10-15 y 20-25 cm), evitando encubrir posibles fenómenos de compactación, distribución de la humedad y de la materia orgánica. Se aplicaron las siguientes pruebas y análisis estadísticos en los dos componentes de análisis (efecto de cambio de uso del suelo y del régimen de lluvia), todas las pruebas fueron realizadas con un nivel de significativa de 5%:

- Estadística descriptiva: medidas de tendencia central, dispersión y coeficientes adimensionales. Gráficos de Box-Plot en el análisis del efecto del cambio de uso del suelo.

Este nivel de análisis se realizó con el objeto de resumir estadísticamente la información obtenida.

- Análisis de varianza en un diseño completamente al azar: ANOVA (verificación de normalidad con prueba de Shapiro-Wilk). La hipótesis de la prueba ANOVA parte de la igualdad de las medias, por lo que al ser significativa se considera que las muestras son estadísticamente iguales (H. Gutiérrez & De la Vara, 2012). Se probó la igualdad de las propiedades hidrofísicas debido al cambio de régimen de lluvia, así como la igualdad entre las UM producto del cambio de uso del suelo, para los dos componentes de análisis de forma independiente.
- Prueba de rangos múltiples: Fisher-LSD. La prueba de rangos múltiples permite examinar cuáles medias son diferentes en un grupo de datos ordenado por niveles (grupos de información), así mismo, cuantifica el grado de diferencia mediante el Valor p (H. Gutiérrez & De la Vara, 2012). De esta forma, se compararon las UM para cada propiedad hidrofísica por profundidad y se obtuvo la igualdad o, por el contrario, disimilitud entre los usos del suelo evaluados. La evaluación estadística del pH fue realizada con la concentración del ion H.
- Análisis de correlación entre las propiedades hidrofísicas del suelo.

#### ***5.4.2 Efecto del cambio de uso del suelo sobre el servicio de regulación hidrológica***

Se evaluó la relación entre las propiedades hidrofísicas del suelo y el servicio de regulación hidrológica (abastecimiento y regulación de flujos superficiales) proporcionado por las UH, de forma indirecta a través de los siguientes análisis.

- Relación entre la precipitación, rendimiento hídrico y el CH del suelo (promedio de las tres profundidades evaluadas) sobre cada UH. De forma general, este análisis permitió observar la respuesta de las UH ante los eventos de precipitación ocurridos en el periodo de estudio. De forma paralela, se relacionó el estado de las propiedades hidrofísicas del suelo con esta respuesta hidrológica para cada UH.
- Se comparó el rendimiento hídrico mediante un análisis de frecuencia entre las UH y se relacionó el cambio del uso del suelo sobre la respuesta observada. Así mismo, se vinculó el rendimiento hídrico con el cambio del régimen de lluvia. Esto permitió comprender el efecto del cambio del uso del suelo sobre la regulación hidrológica.
- Se evaluó el rendimiento de las UH después de un evento de precipitación (hasta dos horas después de finalizada la lluvia (Roa-García et al., 2011)). Este análisis proporcionó información sobre la capacidad de regulación de flujos superficiales de las UH y el cambio de uso del suelo.
- Se comparó la CRH del suelo a bajas succiones (responsable del agua disponible a corto plazo -agua gravitacional-) y a altas succiones (responsable del agua disponible a largo plazo -agua capilar-) entre las UM y su efecto sobre la regulación hidrológica del suelo. Las curvas de retención de humedad fueron obtenidas con el software HYPROP-FIT (<https://www.metergroup.com/>) y ajustadas a la función bimodal de van Genuchten de Durner empleando el modelo PDI (Peters-Durner-Iden) (A. Peters, 2013).

## 6. Alcance

El alcance de la presente investigación respecto a los objetivos fue:

- *Objetivo específico 1:* Se cuantificaron las propiedades hidrofísicas del suelo durante siete meses, abarcando una temporada de baja precipitación y una temporada de alta precipitación, en páramo natural e intervenido antrópicamente y se compararon los resultados mediante pruebas estadísticas y análisis gráfico.
- *Objetivo específico 2:* Se evaluó el cambio de las propiedades hidrofísicas del suelo de páramo producto del efecto del cambio de régimen de lluvia (alta y baja precipitación), mediante pruebas estadísticas.
- *Objetivo específico 3:* Se relacionaron las propiedades hidrofísicas del suelo con el servicio de regulación hidrológica (abastecimiento y regulación de flujos superficiales) de forma indirecta a través hidrograma, precipitación, rendimiento hídrico y respuesta ante un evento de precipitación.

## 7. Resultados y Discusión

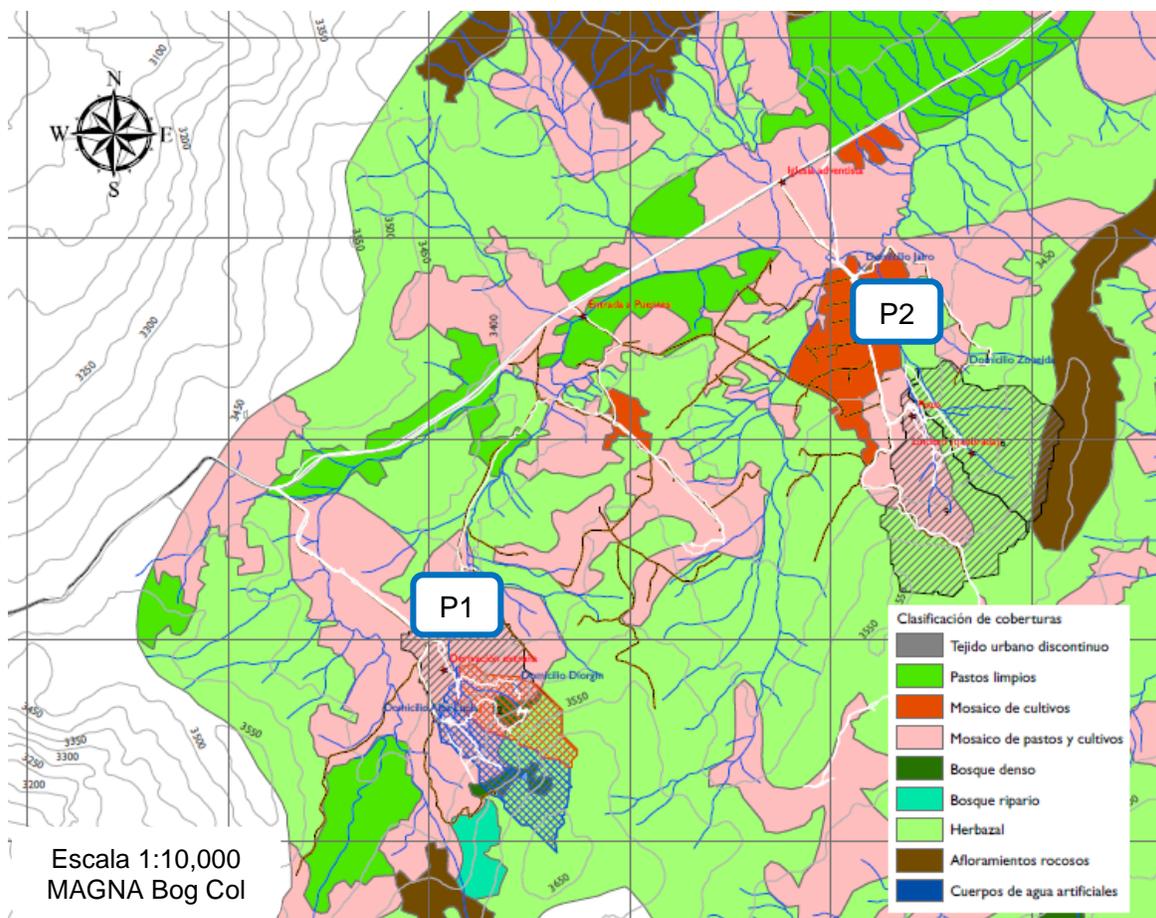
### 7.1 Sistema de Cuencas Pareadas

#### 7.1.1 Selección del área de estudio

En la Figura 3 se muestran las UH potenciales (P1 y P2) que cumplieron en mayor medida los requerimientos de la metodología de cuencas pareadas (descritos en la sección 5.1.1 y 5.1.2). El par de UH uno (P1) se encuentra ubicado al sur de la cuenca del Río Tona, mientras que el par de UH dos (P2) se encuentra más al norte.

**Figura 3**

*Ubicación de las unidades hidrográficas potenciales en la cuenca del río Tona.*



Las características geomorfológicas de las UH potenciales se muestran en la Tabla 8. La UH intervenida corresponde aquella que presenta una mayor intervención antrópica (i.e. cultivos, pastoreo), mientras la UH control atañe a la unidad con uso dominante natural.

**Tabla 8**

*Características geomorfológicas de las unidades hidrográficas potenciales.*

<i>Unidad hidrográfica</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Perímetro (m)</i>	<i>Características de la corriente principal</i>				
			<i>E. Máxima (msnm)</i>	<i>E. Mínima (msnm)</i>	<i>Longitud (m)</i>	<i>Pendiente promedio (%)</i>	
<i>P1</i>	Intervenida	20.9	3275	3565	3431	772	17.4
	Control	15.9	2225	3501	3431	448	15.6
<i>P2</i>	Intervenida	40.1	4050	3511	3385	1176	10.7
	Control	32.6	3300	3461	3385	744	10.2

*Nota.* E: elevación.

Se identificaron los siguientes patrones en la distribución de las actividades productivas:

- La parte alta de las UH suele ser protegida por los pobladores con el fin de garantizar el continuo abastecimiento hídrico.
- La distribución de los cultivos tiende a ser a lo largo de los cursos superficiales de agua y vías secundarias para facilitar el riego y comercialización.
- Hay una concentración de actividades agrícolas alrededor de la vía principal, posiblemente para facilitar el transporte y comercialización de los productos.

Es por esto que las UH potenciales no presentan áreas totalmente cultivadas o completamente naturales, sino una mezcla de ambas. De esta forma, se eligió el par P1 dado que exhibe una mayor área cultivada en la UH intervenida y un área natural extensa en la UH control

así cumple, en mayor medida, los requerimientos de la metodología de cuencas pareadas (Boris F Ochoa-Tocachi et al., 2017).

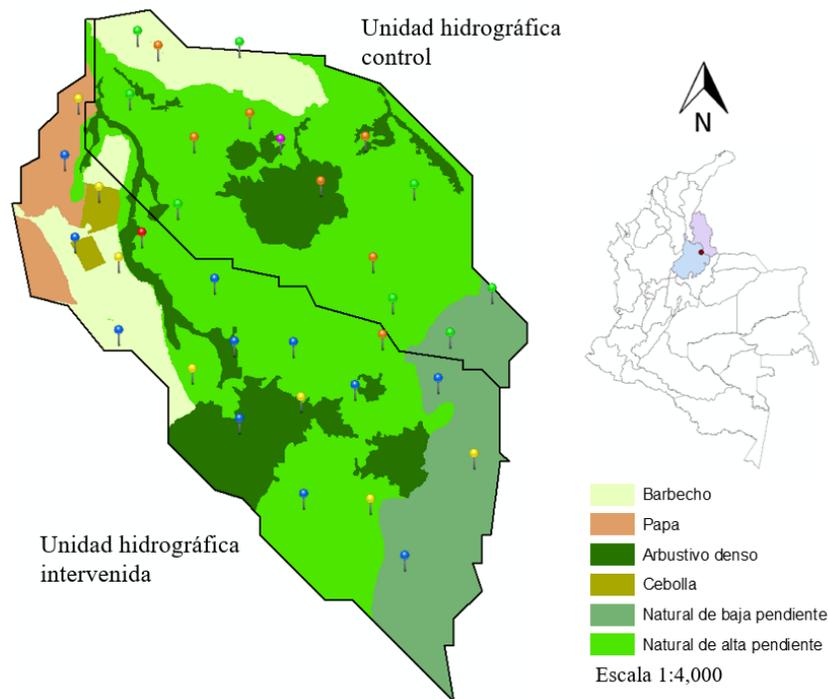
## 7.2 Validación y Selección de las Unidades de Muestreo

### 7.2.1 Reconocimiento en campo

En la Figura 4 se muestran las unidades de muestreo (UM) y los puntos tomados como referencia en el reconocimiento en campo de las UH. Se tomaron en total 35 puntos distribuidos de la siguiente forma: 19 en la UH intervenida (20.93 ha) y 16 en la UH control (15.67 ha), con una densidad promedio de un punto por hectárea. La localización exacta de los puntos de referencia se especifica en el Anexo G.

#### Figura 4.

*Unidades de muestreo experimentales y puntos de reconocimiento en campo.*



*Nota.* Sistema de referencia espacial MAGNA Bogotá Colombia.

**Descripción del área de estudio.**

En la Figura 5 se observa una fotografía para cada uso dominante observado en el área de estudio: natural de baja pendiente (N.b), natural de alta pendiente (N.a), arbustivo denso (A.d), barbecho (B), cultivo de cebolla (C.c) y cultivo de papa (C.p). En el Anexo H se resumen las anotaciones realizadas en la caracterización inicial del área de estudio, donde se buscó registrar el tipo de cobertura, aproximación de la pendiente y las principales características del suelo.

**Figura 5**

*Fisionomía característica de los usos del suelo dominantes en el área de estudio.*



(a): natural de baja pendiente



(b): natural de alta pendiente



(c): arbustivo denso



(d): barbecho



(e): cultivo de cebolla



(f): cultivo de papa

A continuación, se describen brevemente las principales características de cada uno de los usos. Las especies vegetales fueron caracterizadas por Löwer, (2020):

- *Natural de baja pendiente (N.b)*: se presenta vegetación natural de páramo con frailejones, arbustos de baja altura (30 cm), pajonal, musgo y líquenes. Es un área con una pendiente moderadamente inclinada (15-25%) y se presentan algunos afloramientos rocosos. El suelo es enmohecido, de color negro oscuro, friable y húmedo. Las especies vegetales dominantes en esta área son: *Calamagrostis effusa*, *Cortaderia nitida*, *Diplostephium* y *Lycopodium clavatum* (Figura 5a).
- *Natural de alta pendiente (N.a)*: se presenta vegetación natural de páramo con frailejones, arbustos de baja altura (30 cm), pajonal, musgo y líquenes. Es un área con una pendiente fuertemente empinada (50-75%) y se presentan algunos afloramientos rocosos. El suelo es enmohecido, de color negro, friable y húmedo. Las especies vegetales dominantes en esta área son: *Arcytophyllum nitidum*, *Sporobolus lasiophyllus*, y *Agrostis mertensii* (Figura 5b).
- *Arbustiva densa (A.d)*: se presenta una alta densidad de vegetación arbustiva de hasta 2.5 m de altura, gran cantidad de musgos y líquenes que cubren el suelo. Es un área con una pendiente ligeramente empinada (25-50%). El suelo es enmohecido, de color pardo oscuro,

friable y muy húmedo. Las especies vegetales dominantes en esta área son: *Myrsine dependens*, *Dicranum*, *Breutelia*, *Polylepis quadrijuga* y *Festuca tolucensis* (Figura 5c).

- *Barbecho (B)*: se presentan pastos naturales en una zona anteriormente cultivada (surcos de arado). Se observan algunos arbustos de baja altura (30 cm), pajonales y, ocasionalmente, musgo. Es un área con una pendiente moderadamente inclinada (15-25%). El suelo es de color pardo oscuro, moderadamente compactado y húmedo. Las especies vegetales son: *Lachemilla orbiculata*, *Agrostis tolucensis* y *Anthoxanthum odoratum* (Figura 5d).
- *Cultivo de cebolla (C.c)*: se presenta cultivo intensivo de cebolla junca. Es un área con una pendiente ligeramente inclinada (5-15%). El suelo es negro, muy friable y moderadamente seco. Especie vegetal dominante: *Allium fistulosum* (Figura 5e).
- *Cultivo de papa (C.p)*: se presenta cultivo intensivo de papa. Es un área con una pendiente ligeramente inclinada (5-15%). El suelo es de color negro, muy friable y moderadamente seco. Especie vegetal dominante: *Solanum tuberosum* (Figura 5f).

### 7.2.2 Características de los usos dominantes del suelo

Los usos dominantes se diferencian esencialmente por la vegetación y pendiente, otras características relacionadas con el clima y tipo de suelo son muy similares debido a la proximidad, por lo tanto, los cambios observados en las propiedades hidrofísicas del suelo pueden ser atribuidos con una mayor certeza a la transformación del uso del suelo y no a otro fenómeno hidrológico. En la Figura 4 se muestra la distribución de los usos identificados sobre las UH; de forma descendente se encuentran las UM: natural de baja pendiente (N.b), natural de alta pendiente (N.a), arbustiva densa (A.d), barbecho (B), cultivo de cebolla (C.c) y cultivo de papa (C.p). los primeros cuatro usos mencionados son compartidos por ambas UH (N.b, N.a, A.d y B).

En la Tabla 9 se resumen las principales características los usos dominantes identificados. Las áreas cultivadas son preparadas con cal agrícola una vez al año ( $0.4 \text{ kg/m}^2$ ), la aplicación se hace manualmente en seco directamente sobre el suelo.

**Tabla 9**

*Características de las unidades de muestreo.*

<i>UM</i>	<i>Vegetación dominante**</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Pendiente (%)</i>	<i>Tiempo de Uso (años)</i>	<i>Observaciones</i>
N.b	Calamagrostis effusa, Cortaderia nitida, Diplostephium y Lycopodium clavatum	5.9	24	$\infty$	Uso destinado a la conservación. Se presenta estiércol de bovino.
N.a	Arcytophyllum nitidum, Sporobolus lasiophyllus y Agrostis mertensii	18.8	50	$\infty$	Uso destinado a la conservación. Se presenta estiércol de bovino
A.d	Myrsine dependens, Dicranum, Breutelia, Polylepis quadrijuga y Festuca toluensis	5.7	31	$\infty$	Vegetación presente en áreas colindantes a la corriente superficial (vegetación riparia).
B	Lachemilla orbiculata, Agrostis toluensis y Anthoxanthum odoratum	4.2	21	30	Pastoreo ocasional de bovinos (densidad promedio de 1.26 animales/ha) (Löwer, 2020)
C.c	Allium fistulosum	0.4	20	15	Riego por aspersión (3h cada 7 días). Fertilización con pollinaza ( $0.4 \text{ kg/m}^2$ cada 3 meses)
C.p	Solanum tuberosum	1.6	14	<1***	Riego por aspersión (24 h durante 10 días -inicio cosecha-).

\*Nota. UM: unidad de muestreo; N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa. \*\* Fuente: (Löwer, 2020); \*\*\* Se alterna con ciclos de descanso de tres años.

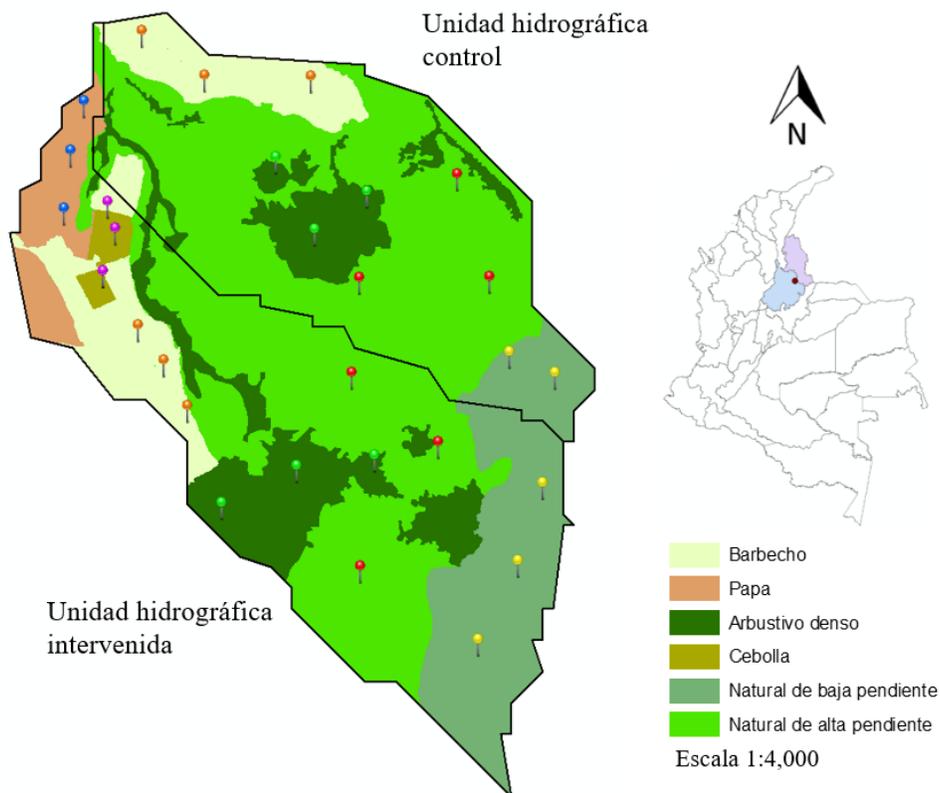
Dado que no se contaba con información preliminar del suelo se propuso realizar una caracterización inicial sobre los usos dominantes identificados en el reconocimiento del área de estudio. Esto se realizó con el propósito de corroborar la selección de las UM basándose en información primaria del suelo y visitas de campo.

### 7.2.3 Caracterización inicial del suelo

En la Figura 6 se observa la localización de los puntos muestreados en la caracterización inicial del suelo, para corroborar de la selección de las UM observadas en el reconocimiento en campo.

**Figura 6**

*Distribución espacial de los puntos de muestreo y réplicas en la caracterización inicial.*



\*Nota. Sistema de referencia espacial MAGNA Bogotá Colombia.

En la Tabla 10 se resumen los resultados de la caracterización inicial del suelo sobre las UM por UH. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las UM compartidas por ambas UH (N.b, N.a, A.d y B) en las propiedades evaluadas. De acuerdo con estos resultados se pudo inferir que las características del suelo son iguales para un mismo uso a pesar que se encuentren en diferentes UH. Este comportamiento obedece a la similitud en términos de vegetación, tipo de suelo, pendiente y clima, producto de su proximidad.

**Tabla 10**

*Resumen estadístico de la caracterización preliminar del suelo.*

UM	UH	CH (%)	Da (g/cm <sup>3</sup> )	P (%)	MOS (%)	pH	CE (μS/cm)
		μ ± σ (CV)	μ ± σ (CV)	μ ± σ (CV)	μ ± σ (CV)	μ ± σ (CV)	μ ± σ (CV)
N.b	I	57 ± 18 (31)	1.10 ± 0.24 (22)	51 ± 4 (7)	22 ± 8 (38)	4.4 ± 0.2 (5)	96 ± 41 (43)
	C	66 ± 13 (20)	0.94 ± 0.13 (14)	56 ± 5 (10)	26 ± 9 (33)	4.5 ± 0.2 (4)	125 ± 57 (45)
N.a	I	47 ± 15 (32)	1.06 ± 0.18 (17)	55 ± 4 (7)	14 ± 7 (47)	4.6 ± 0.3 (6)	86 ± 73 (65)
	C	52 ± 21 (40)	0.96 ± 0.05 (5)	58 ± 4 (8)	19 ± 10 (50)	4.5 ± 0.3 (7)	108 ± 46 (42)
A.d	I	45 ± 15 (34)	0.77 ± 0.15 (19)	70 ± 6 (9)	14 ± 7 (50)	4.6 ± 0.8 (17)	159 ± 159 (100)
	C	45 ± 12 (26)	0.94 ± 0.21 (22)	57 ± 6 (10)	19 ± 6 (30)	4.1 ± 0.2 (6)	170 ± 93 (55)
B	I	42 ± 16 (38)	1.02 ± 0.02 (2)	57 ± 4 (6)	13 ± 7 (53)	4.6 ± 0.4 (8)	105 ± 80 (77)
	C	43 ± 12 (28)	1.01 ± 0.03 (3)	53 ± 3 (5)	24 ± 14 (59)	4.7 ± 0.3 (6)	135 ± 74 (55)
C.c	I	37 ± 9 (25)	0.98 ± 0.24 (25)	60 ± 7 (12)	13 ± 4 (27)	5.3 ± 0.5 (9)	173 ± 71 (41)
C.p	I	37 ± 10 (27)	0.81 ± 0.06 (7)	66 ± 2 (3)	14 ± 7 (51)	4.9 ± 0.3 (7)	101 ± 71 (71)

\*Nota. UM: unidad de muestreo; UH: unidad hidrográfica; I: intervenida; C: control; CV: coeficiente de variación; CH: contenido de humedad; P: porosidad total; MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa. x: medias significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ; Fisher LSD).

Por otro lado, a excepción de la CE en A.d, todos los resultados provienen de muestras homogéneas (CV<80%), por lo que su media es representativa para cada UM. El alto CV en A.d se puede deber a la acumulación de iones libres durante la descomposición materia orgánica fresca (Martinez et al., 2009), por lo tanto, la distribución heterogénea de la vegetación puede causar el

alto coeficiente de variación observado en esta propiedad. Sin embargo, estadísticamente la CE no difiere de los resultados observados en la UH control. De esta forma, las UM que son compartidas por ambas UH (N.b, N.a, A.d y B) son considerados usos iguales debido a su similitud en las propiedades del suelo.

### Selección de las unidades de muestreo

Se realizó un análisis de componente principales (ACP) con la información de la caracterización preliminar del suelo (CH, Da, P, MOS, pH y CE) para corroborar la selección de las UM con base en información primaria del suelo. En la Tabla 11 se muestra la variabilidad total respondida y la correlación de las propiedades del suelo en el ACP para tres componentes, los cuales responden el 91.3% de la variabilidad en el fenómeno estudiado. Se examinó la diferencia entre las UM con base en la variabilidad respondida por las propiedades evaluadas.

**Tabla 11**

*Variabilidad respondida por cada uno de los componentes.*

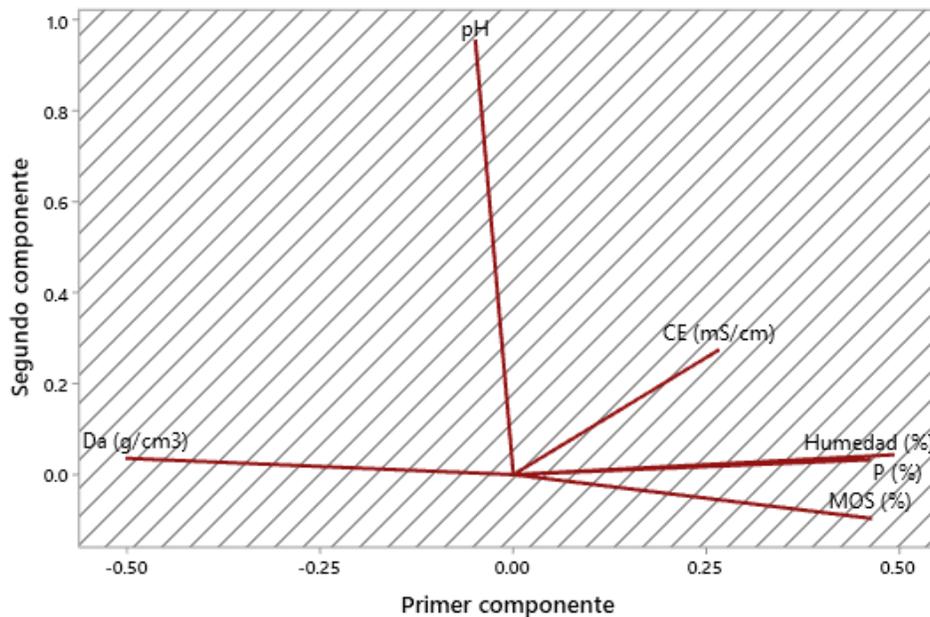
	<i>CP1</i>	<i>CP2</i>	<i>CP3</i>
<i>Proporción</i>	0.605	0.170	0.138
<i>Acumulada</i>	0.605	0.775	0.913
<b><i>Vectores propios</i></b>			
<i>Contenido de humedad (%)</i>	0.463	0.033	0.303
<i>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</i>	-0.502	0.036	0.006
<i>Porosidad total (%)</i>	0.494	0.044	-0.006
<i>Materia orgánica del suelo (%)</i>	0.465	-0.096	0.245
<i>pH</i>	-0.049	0.955	0.268
<i>Conductividad eléctrica (μS/cm)</i>	0.267	0.274	-0.881

\*Nota. CP: componente principal.

Las propiedades que presentan una mayor correlación con el primer componente (60.5 % de la variabilidad) son CH, Da, Pt y MOS, las cuales se relacionan tanto con el estado de humedad como con la gestión del suelo (W. Buytaert, Céleri, et al., 2006); el segundo (17.0 %) y tercer componente (13.8 %) se correlacionan en mayor medida con el pH y CE, respectivamente (Tabla 11), vinculados principalmente con las prácticas culturales.

### Figura 7

*Vectores propios de variabilidad de las propiedades del suelo (dos componentes).*



\*Nota. Da: densidad aparente; P: porosidad total; MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica.

En la Figura 7 se observan los ejes principales de variabilidad y los vectores propios de las propiedades del suelo evaluadas para dos componentes principales. El CH y la Pt tienen correlaciones y efectos similares en el ACP, esto se puede deber al nexo entre estas dos propiedades en fenómenos como: permeabilidad de agua en el suelo (garantiza la entrada y distribución de la humedad en la masa de suelo), así mismo, la Pt establece la cantidad máxima de

agua que el suelo puede adsorber; por lo que se puede establecer que la Pt y CH son dependientes. Por lo tanto, para efectos de la presente investigación la porosidad fue eliminada de los análisis, de esta forma, las propiedades del suelo seleccionadas para el monitoreo fueron: CH, MOS, Da, pH y CE.

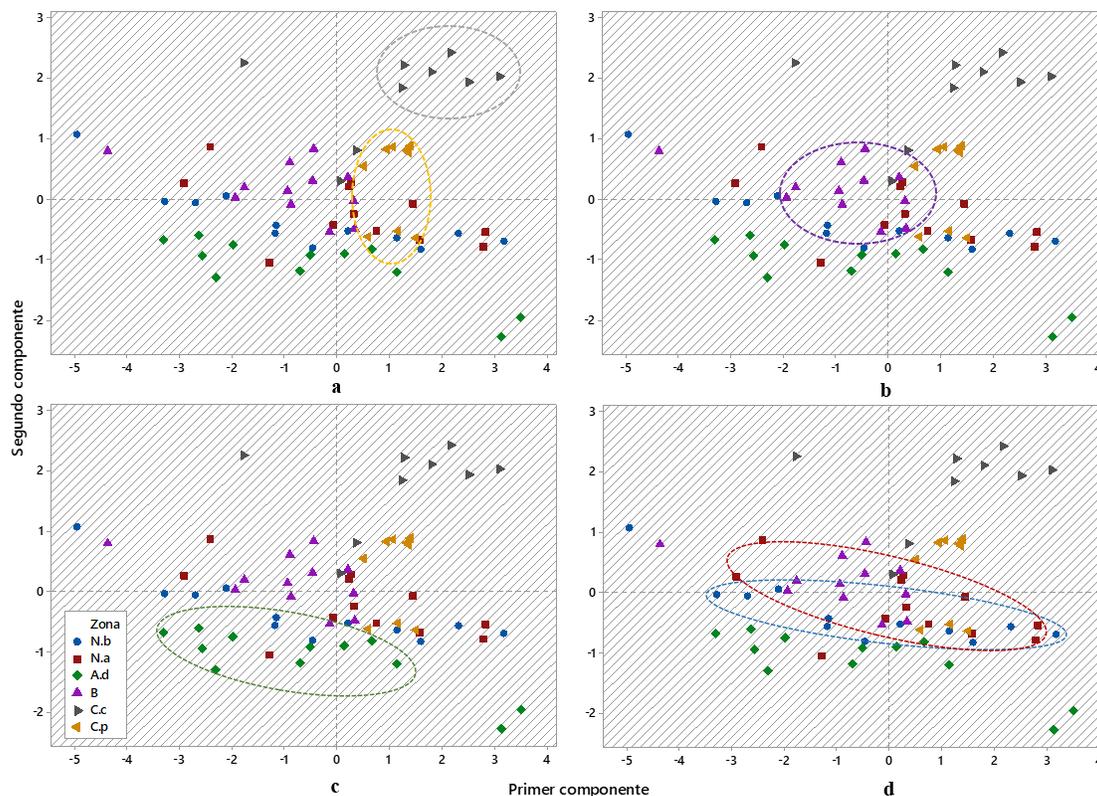
En la Figura 8 se observan la dispersión de los datos obtenidos en la caracterización inicial del suelo para dos componentes principales de variabilidad, en los cuales se representó la información y puede ser observada la similitud o diferencia de las UM fundado en la variabilidad respondida por las propiedades evaluadas. Se resalta con círculos la información para las diferentes UM: C.c/C.p (Figura 8a), B (Figura 8b), A.d (Figura 8c) y páramo abierto (N.b y N.a; Figura 8d).

Los patrones de distribución de los datos permitieron establecer diferencias o similitudes entre las UM con base en las propiedades evaluadas. A partir del análisis se puede indicar que:

- Los cultivos exhiben una pauta de distribución clara (Figura 8a); el C.c se agrupa en la parte superior derecha de la gráfica, asociado a valores de un pH más neutro y CE alta. Los datos del C.p se reúnen en la parte central derecha sin aparente efecto del segundo componente (pH y CE), lo cual está asociado a su reciente transformación a cultivo. Sin embargo, el cambio sobre la Da en áreas de cultivo tiende agrupar los puntos en el cuadrante derecho del gráfico, opuesto al vector propio de Da (menor Da; Figura 8a).
- El patrón de distribución de B es similar al observado para C.p (Figura 8b), no obstante, difieren en el primer componente en términos de CH y Da. El uso prolongado y el abatimiento del suelo en el área de B probablemente compactaron el suelo, por lo cual, presenta una Da superior respecto de los cultivos, reflejado en una nube de puntos que tiende más hacia el sector izquierdo del gráfico (Figura 8b).

**Figura 8**

*Dispersión de los datos por unidad de muestreo en dos componentes de variabilidad.*



\*Nota. N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa.

- El patrón de distribución del área A.d (Figura 8c) es similar a N.b y N.a (Figura 8d); sin embargo, los datos obtenidos en la zona A.d se alinean más hacia la parte inferior del gráfico, vinculado al segundo componente, asociado con un pH más ácido y CE más alta, respecto de las áreas de páramo abierto (N.b y N.a) que tienden a estar en la parte central del gráfico. Sin embargo, en términos generales exhiben distribuciones similares.
- De acuerdo con la evaluación del ACP, las zonas intervenidas antrópicamente (B, C.c y C.p) mostraron claras diferencias en las propiedades evaluadas. Por otro lado, las UM de

vegetación natural de páramo (N.b, N.a y A.d) exhibieron distribuciones similares, salvo A.d que difirió ligeramente en el segundo componente. De esta forma, con base en los resultados del ACP, se validó la selección hecha mediante observación en campo de las seis UM (N.b, N.a, A.d, B, C.c y C.p) para ser analizadas en la presente investigación.

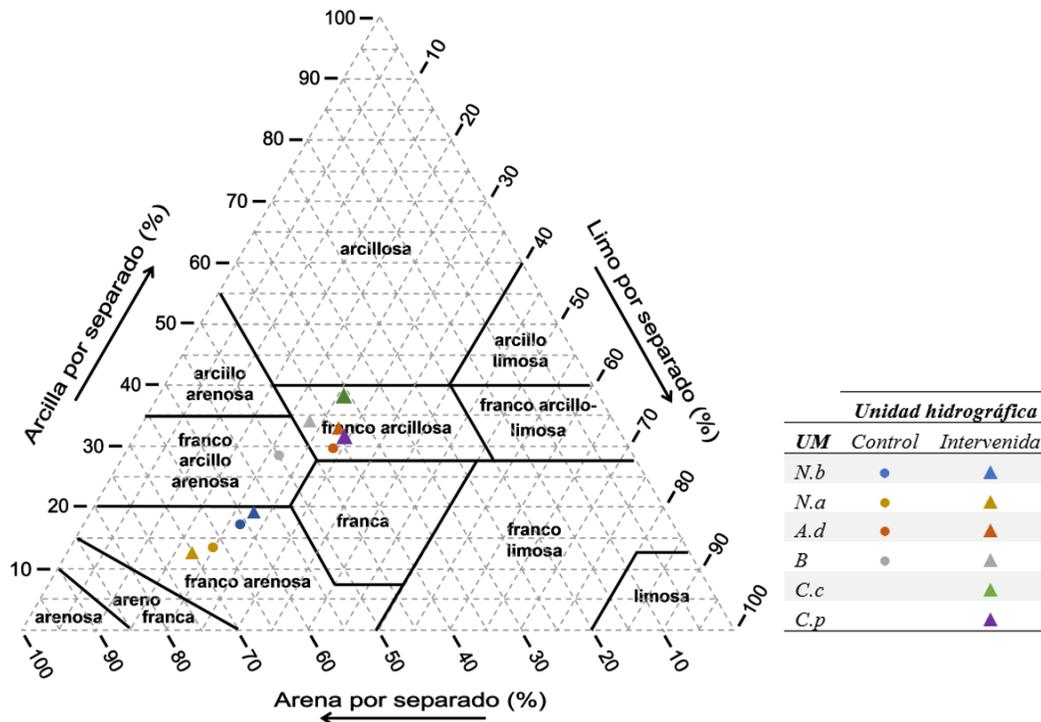
#### **7.2.4 *Textura y densidad real del suelo***

En esta sección se analiza la textura y densidad real del suelo, dentro de la caracterización inicial del área de estudio, dado, como se explicó en la metodología, son propiedades estables en el tiempo y solo fueron cuantificadas una vez durante el periodo de monitoreo. En la Figura 9 se muestra la clasificación textural para las UM evaluadas en el diagrama USDA (USDA, 2020). En términos generales, se puede observar que la textura del suelo en el área de estudio oscila entre clases franco arenoso, observada en áreas de páramo abierto (N.b y N.a), y franco arcilloso, presente en áreas intervenidas antrópicamente (B, C.c y C.p) y A.d. Estas dos clases texturales poseen características organolépticas detalladas en el Anexo I.

La agrupación de las clases texturales en el área de estudio obedece al uso del suelo: franco arenoso para usos naturales (excepto A.d) y franco arcilloso para áreas intervenidas antrópicamente. Este patrón probablemente se deba a la ubicación geomorfológica de las UM intervenidas (parte baja de las UH) y el arado frecuente que remueve horizontes superficiales y homogeniza las características del suelo con horizontes más profundos, de textura diferente, al mismo tiempo que rompe su estructura, aumenta la aireación y arcillas dispersas, producto de la disminución en la MOS y grado de floculación debido al cambio sobre las cargas coloidales superficiales de las partículas de suelo (J. Poulénard et al., 2004).

**Figura 9**

*Textura del suelo en las unidades de muestreo.*



\*Nota. UM: unidad de muestreo; N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa.

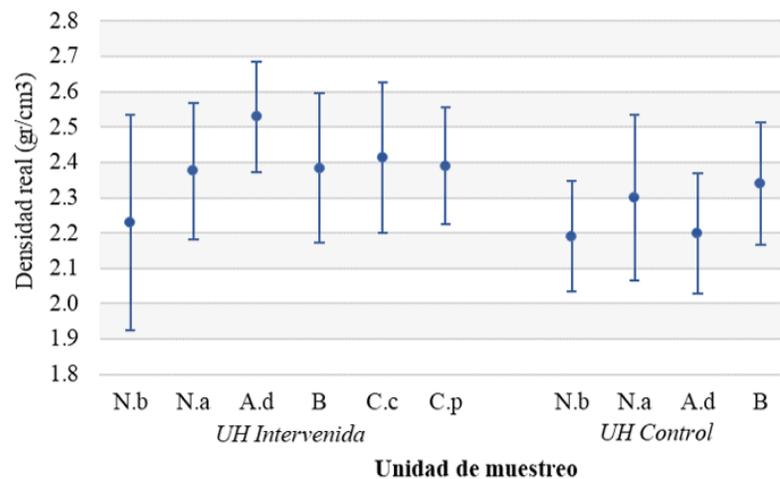
En otros casos, la variación puede asociarse a materiales arenosos transportados por el viento, con una mayor incidencia en época seca debido a la menor cohesión del suelo (menor humedad) y la acción de los vientos Alisios; o por materiales franco limosos, transportados por aguas de riego ricas en lodos (Cañón-Cortázar, Roger Guillermo; Avellaneda-Torres, Lizeth Manuela; Torres-Rojas, 2012). Así mismo, se ha reportado que la quema en páramo influye en el cambio textural del suelo en horizontes superficiales, donde tienden a ser más gruesas con una mayor susceptibilidad a la erosión (Camargo García et al., 2012). Por otro lado, la introducción de materia orgánica inestable (pollinaza fresca), usualmente combinada con aserrín, para la fertilización de parcelas cultivadas ( $0.4 \text{ kg/m}^2$  cada tres meses) puede tener una influencia en la

textura del suelo, debido a la constante adición de material externo (de apariencia fina), sin embargo, es un tópico que requiere mayor investigación.

En la Figura 10 se muestran los resultados de densidad real ( $D_r$ ) para la UM evaluadas. Se puede observar que la  $D_r$  para UM compartidas para ambas UH es similar, excepto para A.d ( $\Delta=0.3 \text{ g/cm}^3$ ) cuya diferencia puede estar asociada a variaciones locales del suelo dentro de la misma zona (dependiendo de su proximidad con la corriente superficial). Por otro lado, las áreas intervenidas antrópicamente exhiben una  $D_r$  ligeramente superior respecto a la VNP, producto de la labranza intensiva que disminuye la estabilidad estructural, pérdida de partículas finas, materia orgánica y volumen de suelo, lo que puede aumentar la  $D_r$  del suelo (Volverá Mambuscay et al., 2016).

### Figura 10

*Densidad real del suelo sobre en las unidades de muestreo.*



\*Nota. N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa; UH: unidad hidrográfica; —: desviación estándar.

### **7.3 Efecto del Cambio de Uso del Suelo sobre las Propiedades Hidrofísicas**

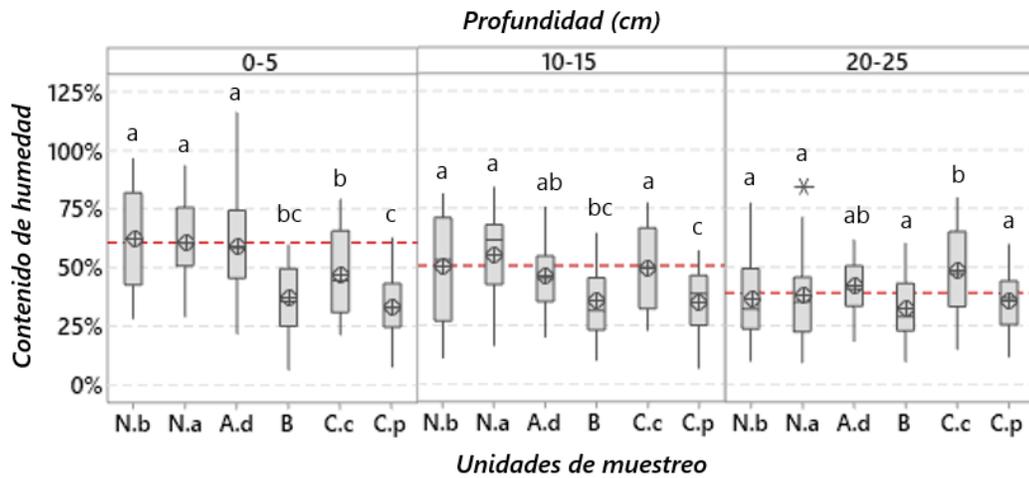
En esta sección se compara la transformación de las propiedades del suelo entre las UM por profundidad (0-5, 10-15 y 20-25 cm). En otras palabras, se analiza la transformación de las propiedades hidrofísicas producto del cambio de uso del suelo por actividades agropecuarias (C.c, C.p y B) con respecto al suelo bajo vegetación natural de páramo (VNP; N.b, N.a y A.d), lo cual atañe al primer objetivo específico de investigación. En el Anexo J se muestra la ubicación de los 120 puntos de muestreo que fueron perforados durante el monitoreo del suelo.

#### **7.3.1 Contenido de humedad**

En la Figura 11 se resumen los resultados para Contenido de Humedad (CH) en las UM identificadas para las tres profundidades evaluadas. Se observaron dos patrones del CH respecto a la profundidad, el primero, vinculado con la VNP mostró un gradiente negativo, es decir, una reducción de la humedad respecto a la profundidad. En relación con la profundidad, la diferencia promedio en el CH entre 0 y 25 cm para la VNP fue de 22%, a lo cual Benavides et al., (2018) encontraron que el CH en páramo natural tiende a disminuir rápidamente con la profundidad, siendo mayor los primeros 30 cm de suelo. El segundo patrón, relacionado con los usos intervenidos antrópicamente, no mostró un gradiente respecto a la profundidad y mantuvo un valor aproximadamente constante para cada uso. La máxima diferencia (0-25 cm) se presentó en B (7%), seguido de los cultivos (3%). Respecto al segundo patrón, Benavides et al. (2018) afirman que el arado del suelo puede cambiar la distribución del tamaño de poro, aumentar temporalmente la porosidad y favorecer las condiciones de transmisión de agua a estratos inferiores, sin embargo resaltan que es una hipótesis que requiere mayor investigación.

**Figura 11**

Contenido de humedad por unidad de muestreo y profundidad.



\*Nota: N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa;  $\oplus$ : mediana;  $-$ : media;  $--$ : promedio vegetación natural de páramo; \*: dato atípico; Medias que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ; Fisher LSD).

Por otro lado, en los primeros centímetros de suelo se observaron dos grupos de humedad con diferencias estadísticamente significativas ( $p<0.05$ ), el primero corresponde a VNP y el segundo a usos intervenidos antrópicamente. A medida que aumenta la profundidad, estas diferencias se atenuaron debido a la reducción del CH en VNP, producto de su gradiente natural (I. F. Benavides et al., 2018) y todas las UM llegaron a ser estadísticamente iguales en 20-25 cm, a excepción del C.c (Figura 11).

La VNP presentó el mayor CH en el área de estudio, tiene su máximo los primeros centímetros de suelo con un valor promedio de 61%, así mismo, se registraron humedades de hasta 115% en suelo de bosque ripario (A.d), un área permanentemente húmeda. Por otro lado, en áreas intervenidas el C.c tiene el CH más alto (47%; 0-5 cm), con una alta dispersión en la información posiblemente asociada al riego. Otras investigaciones en páramo han reportado reducciones en el

CH de 30% (Avellaneda-Torres et al., 2018; Peña-Quemba et al., 2016) y 15% (Estupiñán et al., 2009), asociadas al cambio de uso del suelo con VNP a cultivo de papa similar a lo encontrado en la presente investigación (28%). En B se encontró una disminución en el CH de 19% los primeros 15 cm de suelo, ligeramente superior a lo reportado por Estupiñán et al., (2009) (12%). Es posible que los cambios observados en el CH sean atenuados por el riego que se presenta en las áreas cultivadas, siendo mayor el CH para el C.c relacionado con una mayor frecuencia de riego.

### **7.3.2 *Materia orgánica del suelo***

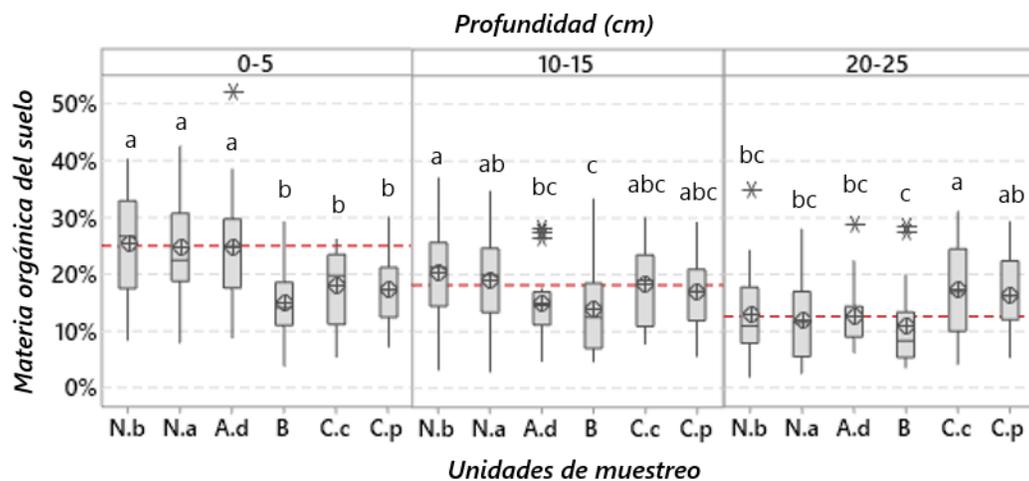
En la Figura 12 se presentan los resultados de la Materia Orgánica del Suelo (MOS) sobre las UM para las tres profundidades evaluadas. La MOS exhibió los mismos dos patrones observados en el CH respecto a la profundidad (gradiente negativo en VNP y tendencia constante en usos intervenidos). Este comportamiento se pudo evidenciar en el mayor contenido de MOS los primeros centímetros de suelo y su progresivo descenso a medida que aumenta la profundidad en VNP, con una diferencia entre 0-5 y 20-25 cm de 12%; mientras que para usos intervenidos esta diferencia fue menor: B (4%), C.c (1%) y C.p (1%). El gradiente de la MOS observado en la VNP puede estar relacionado con la limitación de la actividad microbiana con el aumento de la profundidad debido a las limitaciones de oxígeno, temperatura y nutrientes (Dungait et al., 2012). En cambio, para usos intervenidos, la introducción de materia orgánica fresca junto con el arado puede homogenizar la materia orgánica del suelo en el perfil labrado.

Montes-Pulido et al., (2017) afirman que los mayores cambios en la MOS por efectos externos se reflejan a nivel superficial, como ocurre en el área de estudio. La VNP exhibió de 0-5 cm una MOS de 25%, en promedio; así mismo, se registraron valores de hasta 52% en la zona de bosque ripario (A.d), cerca al nacimiento del cauce superficial, siendo éste el uso con el mayor

contenido de MOS en el área de estudio. En páramo seco natural se reportan valores de MOS de 23-39% (Peña-Quemba et al., 2016), similar a lo encontrado en el presente estudio. Por otro lado, en páramo húmedo natural la MOS es mayor y llega a ser hasta de 43% (Agudelo et al., 2016), posiblemente debido a la relación de retroalimentación positiva entre el CH y MOS (Patiño et al., 2020). Podwojewski et al., (2002) atribuyen el alto contenido de MOS en páramo natural a tres factores: i) la materia orgánica fresca proveniente de la descomposición vegetal, ii) condiciones de frío e inhibición microbiana y iii) protección de la mineralización por complejos organometálicos.

**Figura 12**

*Contenido de materia orgánica del suelo por unidad de muestreo y profundidad.*



\*Nota: N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa; ⊕: mediana; -: media; --: promedio vegetación natural de páramo; \*: dato atípico; Medias que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ; Fisher LSD).

La UM más afectada por el cambio del uso del suelo en términos de MOS fue B, que exhibió una reducción de 10% respecto a la VNP, así mismo, fue menor en 3% respecto a los cultivos (Figura 12). Algunas investigaciones han reportado una disminución de hasta 35-40% en

parcelas intensamente pastoreadas (Podwojewski et al., 2002a; Quichimbo et al., 2012). La UM de B ha sido pastoreada ocasionalmente por bovinos (máximo 4), sin efectos sobre el ecosistema de páramo como lo afirma Hofstede, (1995) (cambio apreciable >10 unidades de ganado/hectárea). Por esta razón es probable que no se haya observado en B un grado de deterioro tan alto como el presentado en zonas intensamente pastoreadas. No obstante, el deterioro del suelo durante su etapa productiva y su lenta recuperación produjo su abandono.

La fertilización desempeña procesos contrarios en la dinámica de la MOS, esta puede reducir la actividad microbiana y por lo tanto, la estabilización de la materia orgánica, lo que resulta en una disminución de la MOS (Coonan et al., 2020) y, de forma antagónica, la aplicación de nitrógeno puede incrementar el carbono del suelo en sistemas agrícolas (3.5%) (Lu et al., 2011), por esta razón, una fertilización inadecuada puede representar un riesgo en la consolidación de la materia orgánica en el suelo. Esto se vio reflejado en el área de estudio, donde a pesar de introducir materia orgánica inestable (pollinaza fresca) en las áreas cultivadas la MOS no logró ser igual a la observada en VNP, probablemente debido al aplacamiento de los microorganismos estabilizadores, sumado a la rápida oxidación de la materia orgánica debido a la desprotección del suelo.

Por otro lado, las áreas cultivadas mostraron una reducción máxima en MOS de 7% (Figura 12) respecto a la VNP, similar a lo reportado por Daza et al., (2014) en C.p (6%). El aumento de la tasa de descomposición (Henry et al., 2013), la rápida oxidación en áreas desprotegidas (Jérôme Poulénard et al., 2003), el aporte deficiente de biomasa (C. P. Harden, 2006) y la mineralización de los residuos orgánicos (Sainju et al., 2003) pueden reducir la MOS como se observó en las áreas cultivadas. Por otro lado, los sistemas agrícolas en páramo ocasionan una pérdida en la estabilidad

del suelo y, consecuentemente, una reducción en el almacenamiento de carbono (Coonan et al., 2020) como resultado del cambio en la dinámica biológica (Avellaneda-Torres et al., 2018) y la actividad enzimática del suelo (Karaca et al., 2010; Li et al., 2018), favorable para el rendimiento de los cultivos.

En el área de estudio es común el uso de materia orgánica inestable (pollinaza fresca) en la fertilización de las parcelas cultivadas. Esta práctica puede influir en el contenido de MOS, así como otras propiedades físicas del suelo, debido a los procesos de transformación que sufre la pollinaza durante su estabilización (calentamiento térmico, incremento de la actividad biológica, deterioro de la biota, alteración de los nutrientes y lixiviación) (Hernandez, 2017). Se han estudiado prácticas agrícolas alternativas como el uso de compost (Sebastiana Melero et al., 2007) y la reducción o no práctica del arado (López-Bellido et al., 2010; Sainju et al., 2003), que muestran un aumento de la actividad enzimática y carbono orgánico superficial, sin alterar excesivamente la estructura del suelo, regeneran la agregación y preservan el suelo de la erosión (S. Melero et al., 2011).

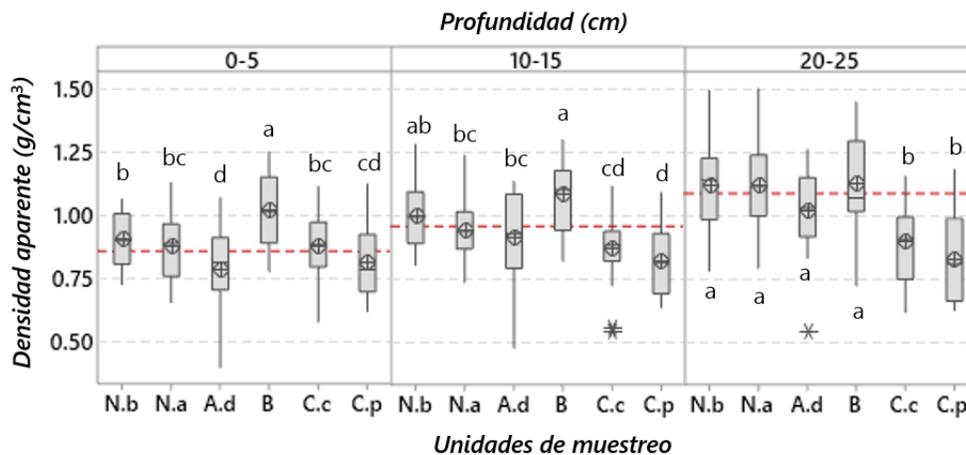
### **7.3.3 Densidad aparente**

En la Figura 13 se resumen los resultados para Densidad aparente ( $D_a$ ) en las UM identificadas para las tres profundidades evaluadas. Se observó un gradiente positivo respecto a la profundidad en  $D_a$  para VNP, evidente en el incremento entre 0-5 y 20-25 cm de  $0.11 \text{ g/cm}^3$ . Este resultado fue correlacionado inversamente con la MOS (disminuye con la profundidad) como lo reportó Alvarado & Forsythe, (2005) en Andosoles de Costa Rica. Por el contrario, en UM intervenidas, la  $D_a$  mantuvo un valor aproximadamente constante en el perfil evaluado. La mayor variación en  $D_a$  en usos antrópicos respecto a la VNP se presentó en los primeros centímetros de

suelo en B ( $0.16 \text{ g/cm}^3$ ), seguido de los cultivos ( $<0.05 \text{ g/cm}^3$ ). Es probable que el volcamiento del suelo, la redistribución del tamaño de poro y el aumento temporal de la aireación en parcelas aradas (I. F. Benavides et al., 2018) puede conducir a un descenso y uniformización de la Da como se observó en las UM con cultivos en el perfil estudiado.

### Figura 13

*Densidad aparente del suelo por unidad de muestreo y profundidad.*



\*Nota: N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa;  $\oplus$ : mediana;  $-$ : media;  $--$ : promedio vegetación natural de páramo; \*: dato atípico; Medias que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ; Fisher LSD).

En la profundidad 0-5 cm se pueden observar cuatro grupos estadísticamente diferentes en Da: el primero con vegetación de páramo abierto (N.a y N.b;  $0.89 \text{ g/cm}^3$ ), el segundo por A.d ( $0.78 \text{ g/cm}^3$ ), el tercero por B ( $1.02 \text{ g/cm}^3$ ), y el cuarto por el C.c y C.p ( $0.84 \text{ g/cm}^3$ ). Este agrupamiento puede estar relacionado con las características que la vegetación y la gestión imprimen sobre el suelo (e.g. enraizamiento y la porosidad) (Aggarwal et al., 2006), que pueden repercutir en la Da observada. A la mayor profundidad evaluada (20-25 cm), se conforman dos grupos disímiles estadísticamente, el primero conformado por: N.b, N.a, A.d y B; y el segundo por

los cultivos. La asociación observada en el primer grupo se puede deber al dominio de la génesis del suelo a esta profundidad (>20 cm), mientras la del segundo a la distancia de arado desde la superficie (30 cm).

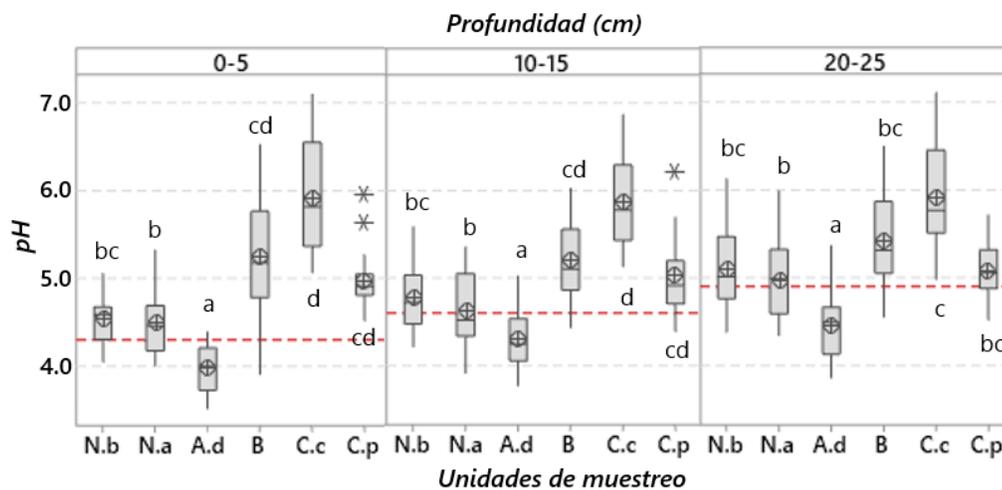
La VNP exhibió una Da en el perfil evaluado entre 0.86-1.09 g/cm<sup>3</sup>, coherente con los valores usuales encontrados en páramo seco (W. Buytaert et al., 2005), así mismo, fue similar a los resultados observados por Farley et al., (2004) (Farley et al., 2004) en páramo natural (1.17 g/cm<sup>3</sup>), con una precipitación promedio anual de 1130 mm. La Da en cultivos (0.82-0.87 g/cm<sup>3</sup>) es ligeramente menor a la observada en VNP, probablemente debido al arado de estas parcelas. Por el contrario, el B fue la UM con mayor Da en el área de estudio (1.03-1.17 g/cm<sup>3</sup>), un 20% mayor respecto a la VNP, consistente con lo observado por Daza et al., (2014) (23%) y Estupiñán et al., (2009) (35%). La mayor Da en áreas con B se puede deber al uso de estas parcelas para pastoreo, el cual puede aumentar la Da en hasta 0.8 g/cm<sup>3</sup> (Podwojewski et al., 2002b).

El arado favorece inicialmente la productividad de los cultivos al aumentar la aireación, disponibilidad de nutrientes, mineralizar la MOS y disminuir la Da (Strudley et al., 2008). Sin embargo, la rápida oxidación de la MOS (sin protección física) y la baja concentración de bases intercambiables obliga a arar cada vez más profundo (R. Hofstede, 2001). Esta práctica a largo plazo puede desencadenar un efecto contrario: abatimiento del suelo y aumento de la Da (Daza, Flórez, Triana, et al., 2014; Podwojewski et al., 2002a); lo que provoca el agotamiento de las parcelas y su posterior abandono. Este fenómeno se pudo observar en el área de estudio: suelo de menor Da en cultivos debido a su reciente transformación hace 15 años y menos de 1 año para C.c y C.p, respectivamente; y B con Da más alta debido a una historia de uso de 1 y 30 años de C.p y posterior abandono situación similar a lo observado por Quichimbo et al., (2012).

#### 7.3.4 pH

En la Figura 14 se presentan los resultados de pH sobre las UM para las tres profundidades evaluadas. Se observa un ligero gradiente del pH respecto a la profundidad en VNP, el cual aumenta 0.3 unidades entre 0-5 y 20-25 cm. Este patrón se puede deber a tres factores: precipitación (lavado de las bases del suelo), MOS (formación de bicarbonatos solubles que son arrastrados en profundidad, produciendo la eliminación de bases) y actividad microbiana (mineralización de la materia orgánica en la superficie que incluye la transformación del nitrógeno a amonio, nitritos y nitratos, lo que genera acidez). Estos tres factores en conjunto pueden reducir el pH del suelo debido a la eliminación de bases (S. Cárdenas, 2015), con un mayor efecto a nivel superficial. Este comportamiento contrasta con los usos intervenidos en los que el pH se mantuvo aproximadamente constante, probablemente debido al volteo del suelo y la homogenización de sus propiedades (Espinosa & Molina, 1999).

La VNP presentó el suelo más ácido en el área de estudio (4.6), siendo menor en A.d con un pH de 3.9 a nivel superficial. El bajo pH que exhibe la zona A.d se puede deber a la acumulación de ácidos orgánicos débiles (fúlvicos y húmicos) en el proceso de degradación de la materia orgánica fresca (Eduardo Martínez et al., 2008), abundante en esta área. En términos generales, el suelo de páramo natural se caracteriza por ser ácido debido a la alta concentración de aluminio (de origen volcánico u orgánico) (Estupiñán et al., 2009) y ácidos orgánicos (carboxilos y fenólicos) (Jaramillo, 2002) que pueden disminuir el pH del suelo (Eduardo Martínez et al., 2008), así como inhibir la actividad microbiana (Tonnejck et al., 2010). Así mismo, la alta permeabilidad, drenaje y lixiviación de clases texturales arenosas (típicas en páramo), pueden provocar una pérdida de cationes (S. Cárdenas, 2015), disminución gradual de nutrientes y reducción de cationes basificantes (J Porta et al., 2010), lo cual puede resultar en la acidificación del suelo.

**Figura 14***pH del suelo por unidad de muestreo y profundidad.*

\*Nota: N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa;  $\oplus$ : mediana;  $-$ : media;  $--$ : promedio vegetación natural de páramo;  $*$ : dato atípico; Medias que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ; Fisher LSD).

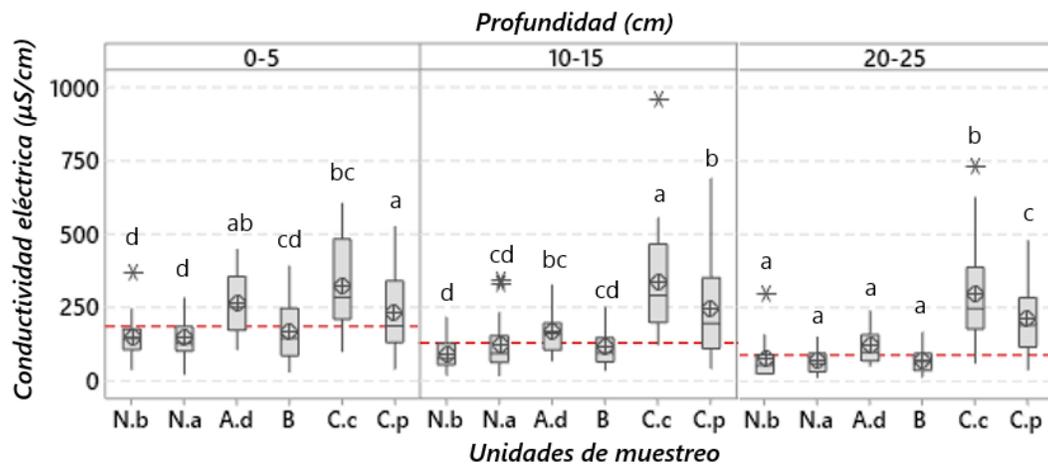
El pH en las UM intervenidas tiende a ser más neutro, asociado a la aplicación de enmiendas (Estupiñán et al., 2009) como la cal para incrementar la retención e intercambio de cationes (Hernández et al., 2009) y la asimilación de nutrientes. Se destaca la alta variabilidad del pH en el C.c, el cual puede estar vinculado a la ineficacia de las prácticas agrícolas (e.g. aplicación heterogénea de fertilizantes-enmiendas y cambio en las geoformas) (Wei et al., 2009). Esto no se observa en el C.p probablemente debido a su reciente transformación y los pocos ciclos de fertilización a los que ha sido sometido. El pH en usos intervenidos antrópicamente fue similar a lo observado por Daza et al., (2014). Finalmente, el pH ácido del suelo de páramo es un inconveniente para los agricultores, por ende, la adecuación de las parcelas requieren una gran intervención del terreno, lo que conlleva a aumentar la transformación intensiva en este ecosistema (W. Buytaert, Céleri, et al., 2006).

### 7.3.5 Conductividad eléctrica

En la Figura 15 se resumen los resultados para Conductividad Eléctrica (CE) en las UM para las tres profundidades evaluadas. En términos generales, el suelo en el área de estudio es no salino ( $CE < 2 \text{ dS/cm}$ ) (Hoorn & Alphen, 1994). La vegetación de páramo abierto (N.b y N.a) exhibió la menor CE ( $108 \mu\text{S/cm}$ ) y, entre la VNP, la zona A.d es ligeramente superior ( $185 \mu\text{S/cm}$ ). La mayor CE en A.d se puede deber a la mejor capacidad del suelo para retener nutrientes y agua (Martinez et al., 2009), de igual forma, debido a la mejor agregación del suelo con macroporos continuos que favorecen la conducción de corriente eléctrica (R. Lal, 1997).

**Figura 15**

*Conductividad eléctrica del suelo por unidad de muestreo y profundidad.*



\*Nota: N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa;  $\oplus$ : mediana;  $-$ : media;  $--$ : promedio vegetación natural de páramo; \*: dato atípico; Medias que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ; Fisher LSD).

Las áreas cultivadas presentaron la CE más elevada de  $321$  y  $231 \mu\text{S/cm}$  para C.c y C.p, respectivamente. El manejo y la gestión del suelo con fertilizantes pueden aumentar la

concentración de sales en el suelo (Cortés et al., 2013) y, consecuentemente, su CE. La alta variabilidad observada en áreas cultivadas se puede deber a la ineficacia de las prácticas de manejo (e.g. aplicación desigual de enmiendas-fertilizantes y el cambio en las geoformas) (Wei et al., 2009). Por otro lado, el área de B presenta una CE cercana a la VNP, la cual se puede deber a un empobrecimiento de iones del suelo por excesiva extracción, durante su etapa productiva, y lenta recuperación.

### **7.3.6 Estabilidad estructural**

En la Tabla 12 se muestra el diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados estables a la erosión hídrica para los usos del suelo analizados. Este indicador busca cuantificar la resistencia de los agregados ante la degradación hídrica producto de la precipitación (Valenzuela & Armando, 2010). Los agregados más estables ante la erosión hídrica se presentan en la VNP (2.7-3.2 mm), en contraste con los usos bajo cultivo que exhiben un menor DMP (2.3-2.5 mm); destaca el área de B que tiene un DMP similar a VNP (2.8 mm; moderadamente estable). La menor estabilidad de los agregados a la erosión hídrica en áreas cultivadas se puede deber a las actividades de laboreo que rompen la estructura natural del suelo y desintegran los agregados dejando, en su mayoría, partículas sueltas susceptibles a la erosión (Novelli et al., 2013). Por otro lado, en B su suelo moderadamente estable se puede deber al empaquetamiento de los agregados por las raíces y la compactación del suelo debido a la pisada de bovinos, derivando en un suelo más denso, con agregados más compactos (Gabioud et al., 2011; Mambuscay & Collazos, 2009), lo cual puede indicar un signo de recuperación física.

**Tabla 12***Estabilidad estructural en las unidades de muestreo.*

<i>UM</i>	<i>DMP (mm)</i>
<i>Natural de baja pendiente</i>	2.9
<i>Natural de alta pendiente</i>	2.7
<i>Arbustivo denso</i>	3.2
<i>Barbecho</i>	2.8
<i>Cultivo de cebolla</i>	2.5
<i>Cultivo de papa</i>	2.3

\*Nota. DMP: diámetro medio ponderado. Todos los usos clasifican como moderadamente estables, con excepción de arbustivo denso que su agregación es estable.

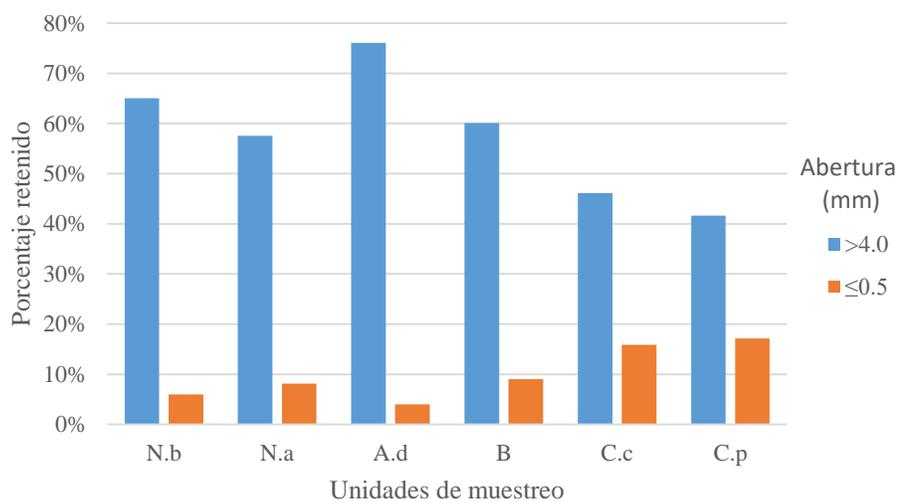
Los agregados del suelo de la VNP son de difícil ruptura ante la erosión hídrica (e.g. A.d con DMP de 3.2 mm) se puede deber al alto contenido de MOS, la vegetación y la densidad de raíces (Ballesteros et al., 2002), sumado a otros factores como el alto contenido de complejos órgano-minerales, agentes cementantes (Bronick & Lal, 2005), coloides orgánicos y la actividad microbiana (Chenu et al., 2000; Cosentino et al., 2006). Estos resultados son congruentes con lo observado por Camargo García et al., (2012) que encontraron una mayor estabilidad del suelo en páramo natural respecto a parcelas que fueron sometidas a quema.

En la Figura 16 se muestra el porcentaje de agregados considerados estables (>4.0 mm), en contraste, con aquellos altamente susceptibles a la erosión hídrica ( $\leq 0.5$  mm) (Camargo García et al., 2012). La VNP presenta el mayor porcentaje de agregados estables en el área de estudio 58-76%; coherente con el bajo porcentaje de agregados de diámetro menor a 0.5 mm (4-8%), por lo que se puede inferir que la permanencia del suelo es mayor ante procesos de erosión en el área de VNP. Por el contrario, en parcelas cultivadas el porcentaje de agregados estables fue inferior al

46% y un alto porcentaje de agregados altamente susceptibles a la erosión hídrica (16-18%), lo que puede indicar un signo de degradación en estas áreas, posiblemente asociado a prácticas de labranza convencional donde predomina la macroporosidad mecánica, propensa a la rápida disgregación por la falta de cementantes orgánicos (Camargo García et al., 2012).

**Figura 16**

*Porcentaje de masa retenido en tamizado húmedo.*



**\*Nota.** N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa.

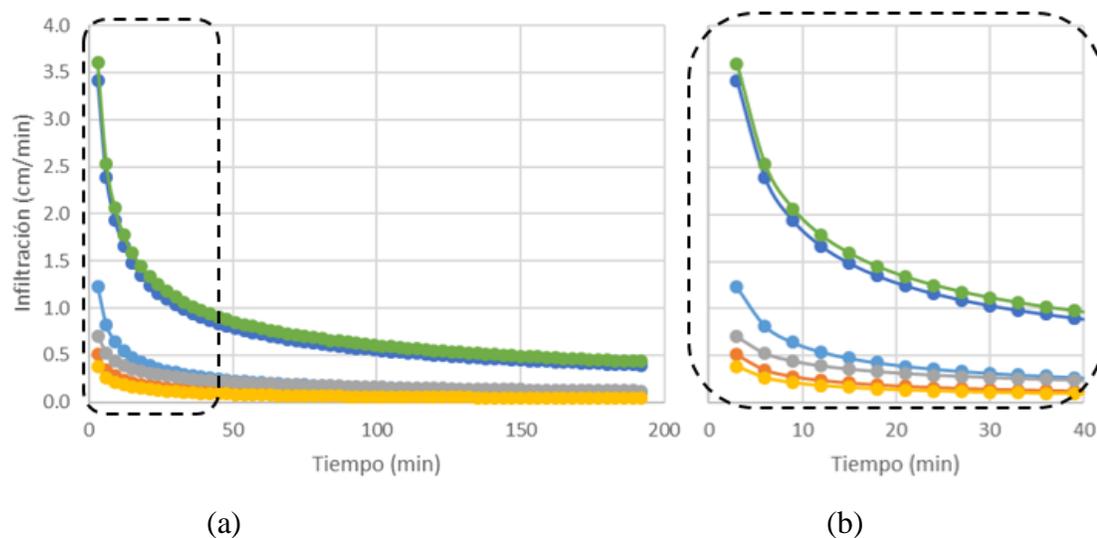
### 7.3.7 Capacidad de infiltración y conductividad hidráulica

En la Figura 17 se observa la curva de infiltración de los usos dominantes identificados. Se observan dos conjuntos de curvas de infiltración en el área de estudio, el primero con una alta tasa de infiltración inicial (>1 cm/min; <40 min) conformado por las áreas cultivadas; el resto de UM conforman el segundo grupo con una tasa de infiltración inicial inferior (Figura 17b). Durante los primeros minutos de ensayo, la VNP presentó una tasa de infiltración de 0.4-1.4 cm/min, mientras las áreas cultivadas exhibieron un valor de 3.5-2.0 cm/min. Este resultado está relacionado

posiblemente con el estado superficial y la humedad inicial del suelo, en este caso, la VNP presentó un estado de humedad inicial superior a los usos intervenidos, independiente del régimen de lluvia, lo que pudo disminuir la velocidad inicial de infiltración debido al menor gradiente piezométrico (Jaime Porta et al., 2003). Por otro lado, en las parcelas cultivadas el horizonte superficial es altamente friable y poroso, que favorece la adsorción rápida de agua, sumado al estado inicial seco del suelo, el cual promueve una velocidad de infiltración elevada debido a la alta sortividad del suelo que llena el máximo de poros interconectados.

**Figura 17**

(a) Curva de infiltración en los usos dominantes del suelo; (b) acercamiento lapso 0-40 min.



\*Nota. N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa.

El suelo sometido a cultivo exhibió la mayor capacidad de infiltración (CI) en el área de estudio, se destaca la alta velocidad de infiltración durante su saturación (0.7-3.5 cm/min; <50 minutos). Luego, cuando el suelo se satura, la velocidad de infiltración se estabiliza en 0.31 y 0.34 cm/min para C.c y C.p, respectivamente. Estos resultados pueden estar asociados a la labranza

sobre las parcelas cultivadas que rompe la estructura del suelo, aumentando su aireación/porosidad (Machiwal et al., 2006), lo que resulta en un aumento de la CI (Napoleón et al., 2008). Sin embargo, a largo plazo, la generación de agregados hidrofóbicos, pérdida de MOS, encostramiento, aumento de la Da, partículas finas y arcillas dispersas pueden ocasionar una disminución en la CI (J. Poulénard et al., 2004).

En la Tabla 13 se expone la conductividad hidráulica saturada y tiempo básico en los usos dominantes identificados. El tiempo básico de infiltración es el lapso en el cual el suelo se satura, en este sentido, las áreas de páramo abierto (N.a y N.b) exhibieron el mayor tiempo en saturarse (332-356 minutos), en contraste con las áreas intervenidas antrópicamente (306-323 min). Este menor tiempo observado en las parcelas intervenidas, relacionado con el laboreo sobre el suelo, es coherente con el aumento del drenaje artificial observado en campo, responsable de los problemas de erosión en las zonas de ladera.

**Tabla 13**

*Conductividad hidráulica y tiempo de infiltración básico en las unidades de muestreo.*

<i>Unidad de muestreo</i>	<i>Ks (cm/h)</i>	<i>Tiempo de infiltración básica (min)</i>
<i>Natural de baja pendiente</i>	4.35	356
<i>Natural de alta pendiente</i>	2.27	332
<i>Arbustivo denso</i>	6.27	256
<i>Barbecho</i>	1.85	323
<i>Cultivo de cebolla</i>	18.36	312
<i>Cultivo de papa</i>	20.44	306

\*Nota. Ks: conductividad hidráulica saturada.

La conductividad hidráulica saturada (Ks), estimada con el modelo de Kostiakov a partir de la infiltración básica (Ravi et al., 1998), es una propiedad compleja que depende de la humedad,

estructura, textura y tortuosidad del suelo (Osman, 2013). Así mismo, presenta una alta correlación con propiedades como la Pt, Da y MOS (Rienzner & Gandolfi, 2014). Adicionalmente, factores bióticos como la descomposición de raíces muertas o la presencia de fauna en el suelo (e.g. lombrices) que pueden generar redes de macroporos e influir en el movimiento de agua en el suelo (Chan, 2001; Lichner et al., 2011).

Destaca la baja Ks del área N.a (2.27 cm/h; Tabla 13), la cual se puede deber a la pendiente de esta zona que ocasiona un horizonte orgánico delgado (mayor CI) y un estrato mineral más superficial de mayor profundidad (menor CI), que en conjunto pueden resultar en una disminución de la Ks. Así mismo, el efecto de la pendiente ocasiona que el agua sea drenada rápidamente de forma superficial, dificultando la adsorción por el suelo. Por el contrario, el área A.d presentó una Ks más alta en VNP (6.27 cm/h), congruente con las características del suelo observadas en campo: estructura abierta, friable, poroso, alta MOS y bien protegido por la vegetación. El área de B exhibió un valor de 1.85 cm/h (menor Ks en el área de estudio), el pisoteo ocasional de bovinos presentes en esta zona puede causar el cerramiento superficial del suelo e impedir el ingreso del agua, deteriorando su capacidad de infiltración (Podwojewski et al., 2002a).

Las diferencias observadas en la CI y Ks entre la VNP y las áreas cultivadas se pueden atribuir al laboreo del suelo: ruptura de los agregados, aumento de la aireación y porosidad (Silva, 2007) reflejado en una mayor tasa de infiltración en áreas cultivadas. No obstante, el arado regular conduce a la compactación del suelo, taponamiento de los poros (Shaxson & Barber, 2008), aumento de arcillas dispersas (Machiwal et al., 2006) y reducción de la macroporosidad del suelo lo que puede disminuir, a largo plazo, la tasa de infiltración (Hernández et al., 2009).

#### **7.4 Efecto del Régimen de Lluvia Sobre las Propiedades Hidrofísicas**

En esta sección se estudian las variaciones que el cambio del régimen de lluvia ocasiona sobre las propiedades hidrofísicas del suelo para cada UM de forma independiente y profundidad evaluada (0-5, 10-15 y 20-25 cm). En este apartado se resuelve lo planteado para el segundo objetivo específico de investigación.

##### **7.4.1 *Propiedades hidrofísicas del suelo bajo vegetación natural y régimen de lluvia***

La Tabla 14 muestra el efecto del cambio de régimen de lluvia sobre las propiedades del suelo seleccionadas sobre las UM con uso del suelo bajo vegetación natural de páramo (VNP). En términos generales, se puede observar que las propiedades hidrofísicas (CH, MOS, pH y CE) en la VNP no presentaron diferencias estadísticamente significativas a excepción de la Da en el área N.b para las tres profundidades evaluadas. Este hallazgo es contraintuitivo con los resultados estables de CH y MOS que exhibe esta zona (N.b; Tabla 4), con una diferencia máxima en Da de  $0.19 \text{ g/cm}^3$  (20-25 cm) por el cambio del régimen de lluvia. Es probable que la diferencia observada se deba a la ubicación de esta UM en la cima del valle de páramo (3620-3660 msnm), en un área con baja pendiente, expuesta en todo momento a una alta radiación solar y fuerte viento, protegido por vegetación de páramo abierto, en la cual se observan parches de suelo desnudo entre la vegetación natural.

La estabilidad de las propiedades evaluadas en la VNP se puede deber a la protección del suelo por la vegetación de las condiciones ambientales extremas del páramo. Esta vegetación se ha adaptado para contrarrestar las características del clima de páramo, tales como: alta radiación solar, baja temperatura, fuerte viento y alta variación diaria de la temperatura (Hedberg & Hedberg, 1979). Así mismo, la VNP se ha acondicionado para captar la mayor cantidad de agua proveniente

de la lluvia, rocío o neblina, lo que permite el almacenamiento de agua y limita su evapotranspiración (Salamanca, 1986). Por otro lado, la VNP está adaptada para atrapar y acumular residuos orgánicos en su misma estructura (Josse et al., 2009). Estas adecuaciones de la VNP (enfrentar el clima, captar humedad y materia orgánica) pueden actuar como amortiguador/estabilizador de las propiedades del suelo en el cambio del régimen de lluvia, influyendo en su excelente capacidad de almacenar y retener flujos de agua, evidente en la baja diferencia observada en el CH (1-5%; Tabla 14).

La MOS en VNP fue ligeramente mayor en época de alta precipitación (1-4%) respecto de la baja precipitación. La actividad de los microorganismos es influenciada por el régimen de lluvia, su estimulación en temporada de alta precipitación puede favorecer la mineralización de la materia orgánica, aumentando la MOS (Ordoñez et al., 2015), mientras en temporada de baja precipitación la baja disponibilidad de nutrientes y humedad puede aplacar su actividad reduciendo la MOS (Coonan et al., 2020). La degradación de un amplio rango de compuestos orgánicos, incluyendo sustancias recalcitrantes, por la actividad microbiana tiene un rol importante en la incorporación y estabilización de la MOS (Lehmann & Kleber, 2015). A pesar que la biomasa microbiana solo representa entre 1-2% de la MOS (Kleber et al., 1998), se estima que entre 59-64% del carbono total presente en el suelo es derivado del detrito microbiano (Coonan et al., 2020).

**Tabla 14***Propiedades del suelo en usos naturales por régimen de lluvia.*

	Prof. (cm)	<i>Natural de baja pendiente (N.b)</i>		<i>Natural de alta pendiente (N.a)</i>		<i>Arbustiva densa (A.d)</i>	
		<i>Alta Precipitación</i>	<i>Baja Precipitación</i>	<i>Alta Precipitación</i>	<i>Baja Precipitación</i>	<i>Alta Precipitación</i>	<i>Baja Precipitación</i>
		$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)
<b>CH (%)</b>	0-5	63 ± 23 (48-78)	61 ± 22 (46-76)	68 ± 14 (56-79)	53 ± 20 (42-65)	62 ± 26 (47-76)	57 ± 17 (43-72)
	10-15	48 ± 24 (32-64)	53 ± 24 (37-69)	48 ± 24 (32-64)	50 ± 18 (38-61)	48 ± 24 (32-64)	47 ± 16 (36-57)
	20-25	36 ± 20 (24-49)	37 ± 18 (24-49)	40 ± 18 (27-53)	37 ± 20 (24-50)	39 ± 11 (31-47)	44 ± 13 (36-52)
<b>MOS (%)</b>	0-5	26 ± 8 (20-32)	25 ± 10 (19-31)	28 ± 9 (23-33)	24 ± 6 (19-29)	26 ± 10 (18-32)	24 ± 11 (17-31)
	10-15	20 ± 9 (13-26)	21 ± 10 (15-28)	20 ± 9 (13-26)	20 ± 5 (16-24)	20 ± 9 (13-26)	17 ± 8 (13-21)
	20-25	13 ± 9 (7-18)	13 ± 7 (8-19)	14 ± 7 (10-19)	12 ± 7 (8-17)	11 ± 2 (7-15)	14 ± 7 (11-18)
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	0-5	0.98 ± 0.08 (0.93-1.03) <sup>x</sup>	0.83 ± 0.08 (0.78-0.89) <sup>x</sup>	0.86 ± 0.14 (0.77-0.94)	0.91 ± 0.11 (0.83-0.99)	0.85 ± 0.18 (0.74-0.95)	0.73 ± 0.15 (0.62-0.84)
	10-15	1.06 ± 0.09 (1.00-1.13) <sup>x</sup>	0.93 ± 0.10 (0.87-1.00) <sup>x</sup>	1.06 ± 0.09 (1.00-1.13)	0.96 ± 0.09 (0.87-1.04)	1.06 ± 0.09 (1.00-1.13)	0.85 ± 0.19 (0.74-0.97)
	20-25	1.21 ± 0.11 (1.13-1.29) <sup>x</sup>	1.02 ± 0.13 (0.94-1.10) <sup>x</sup>	1.08 ± 0.16 (0.97-1.18)	1.17 ± 0.17 (1.07-1.28)	1.09 ± 0.12 (0.99-1.20)	0.96 ± 0.19 (0.85-1.07)
<b>pH</b>	0-5	4.5 ± 0.2 (4.3-4.7)	4.6 ± 0.3 (4.4-4.8)	4.4 ± 0.2 (4.2-4.7)	4.6 ± 0.5 (4.3-4.8)	4 ± 0.3 (3.8-4.1)	4 ± 0.3 (3.8-4.2)
	10-15	4.7 ± 0.4 (4.5-5.0)	4.9 ± 0.4 (4.6-5.1)	4.7 ± 0.4 (4.5-5.0)	4.8 ± 0.5 (4.5-5.0)	4.7 ± 0.4 (4.5-5.0)	4.4 ± 0.4 (4.1-4.6)
	20-25	5.0 ± 0.5 (4.7-5.3)	5.2 ± 0.4 (4.9-5.5)	4.9 ± 0.4 (4.6-5.1)	5.1 ± 0.5 (4.8-5.4)	4.4 ± 0.2 (4.2-4.7)	4.5 ± 0.4 (4.2-4.7)
<b>CE (μS/cm)</b>	0-5	150 ± 91 (103-198)	150 ± 45 (102-198)	165 ± 75 (120-209)	126 ± 59 (81-171)	291 ± 104 (224-359)	230 ± 101 (167-301)
	10-15	94 ± 57 (61-128)	84 ± 43 (50-118)	94 ± 57 (61-128)	94 ± 66 (37-151)	94 ± 57 (61-128)	171 ± 90 (117-225)
	20-25	70 ± 44 (25-114)	79 ± 83 (35-123)	70 ± 39 (44-97)	65 ± 41 (39-92)	112 ± 48 (73-151)	131 ± 67 (93-170)

\*Nota. Prof: profundidad; IC: intervalo de confianza; CH: contenido de humedad; MOS: materia orgánica del suelo; Da: densidad aparente; AP: alta precipitación; BP: baja precipitación; x: medias significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ; Fisher LSD). La comparación se hizo para cada profundidad y UM de forma independiente.

#### ***7.4.2 Propiedades hidrofísicas en el suelo intervenido y el régimen de lluvia***

La Tabla 15 muestra el efecto del cambio de régimen de lluvia sobre las propiedades del suelo seleccionadas en las UM con uso del suelo intervenido. Se observaron diferencias estadísticamente significativas para CH, MOS y Da. Respecto del CH, se encontraron diferencias estadísticamente significativas para B (en 0-5 y 5-10 cm) y C.p (0-5 cm). En ambos casos, el deterioro de la estructura (Pan & Peters-Lidard, 2008), sumado a la generación de agregados hidrofóbicos del suelo (Jérôme Poulenard et al., 2001) durante la etapa productiva de estas parcelas (B, C.c y C.p), pudieron provocar una fluctuación en el CH debido a la pérdida de su capacidad amortiguadora. Aunque el CH no es significativamente diferente en el C.c debido al cambio del régimen de lluvia, se observa una variación promedio de 15% (temporada de la alta precipitación respecto a baja precipitación), es posible que el riego ocasional sea la razón de la alta variabilidad.

En relación con la MOS se observan diferencias significativas en B y C.p, a nivel superficial, por el cambio del régimen de lluvia. Se presenta una diferencia máxima promedio de 8% en B y 6% en C.p, en contraste con el 2% exhibido en la parcela con C.c ( $p > 0.05$ ). La baja diferencia observada en C.c se pudo deber a la frecuente fertilización orgánica sobre esta área (cada tres meses con estiércol de pollo inestable), atenuando su variabilidad por el cambio de régimen de lluvia. Six et al., (2006) (Six et al., 2006) afirman que la MOS se encuentra en su mayoría entre los microagregados del suelo, por lo que en usos intervenidos, con agregados inestables producto de actividades culturales, puede favorecer su mineralización (Balesdent et al., 2000) y se hace mas vulnerable a los cambios atmosféricos. El aumento de la escorrentía y erosión en temporada de alta precipitación puede favorecer la lixiviación del carbono orgánico del suelo, como se observó en C.p (Otero et al., 2011).

**Tabla 15***Propiedades del suelo en usos intervenidos por régimen de lluvia.*

	Prof. (cm)	Barbecho (B)		Cultivo de cebolla (C.c)		Cultivo de papa (C.p)	
		Alta precipitación	Baja precipitación	Alta precipitación	Baja precipitación	Alta precipitación	Baja precipitación
		$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)	$\mu \pm \sigma$ (IC 95%)
CH (%)	0-5	46 ± 9 (39-54) <sup>x</sup>	29 ± 13 (21-36) <sup>x</sup>	55 ± 18 (44-66)	40 ± 15 (28-51)	40 ± 12 (31-48) <sup>x</sup>	27 ± 14 (18-35) <sup>x</sup>
	10-15	48 ± 24 (32-64) <sup>x</sup>	27 ± 13 (18-36) <sup>x</sup>	48 ± 24 (32-64)	42 ± 16 (31-53)	48 ± 24 (32-64)	30 ± 15 (21-39)
	20-25	38 ± 13 (29-47)	27 ± 13 (18-36)	55 ± 19 (41-68)	43 ± 20 (30-56)	38 ± 12 (30-47)	34 ± 14 (25-42)
MOS (%)	0-5	19 ± 5 (14-23) <sup>x</sup>	11 ± 7 (7-16) <sup>x</sup>	19 ± 7 (15-24)	17 ± 6 (13-21)	16 ± 6 (11-20)	19 ± 7 (14-23)
	10-15	20 ± 9 (13-26)	12 ± 6 (6-17)	20 ± 9 (13-26)	17 ± 7 (13-22)	14 ± 9 (13-26) <sup>x</sup>	20 ± 7 (16-24) <sup>x</sup>
	20-25	13 ± 9 (9-18)	9 ± 5 (4-14)	17 ± 9 (12-23)	18 ± 8 (12-23)	14 ± 6 (10-19)	19 ± 7 (14-23)
Da (gr/cm <sup>3</sup> )	0-5	1.05 ± 0.14 (0.94-1.15)	1.01 ± 0.16 (0.91-1.11)	0.94 ± 0.1 (0.86-1.02) <sup>x</sup>	0.81 ± 0.13 (0.73-0.89) <sup>x</sup>	0.90 ± 0.15 (0.82-0.98) <sup>x</sup>	0.73 ± 0.08 (0.65-0.81) <sup>x</sup>
	10-15	1.06 ± 0.09 (1.00-1.13)	1.07 ± 0.14 (0.98-1.16)	1.06 ± 0.09 (1.00-1.13) <sup>x</sup>	0.79 ± 0.14 (0.71-0.87) <sup>x</sup>	1.06 ± 0.09 (1.00-1.13) <sup>x</sup>	0.71 ± 0.06 (0.65-0.77) <sup>x</sup>
	20-25	1.15 ± 0.26 (1.01-1.29)	1.11 ± 0.14 (0.98-1.25)	1.00 ± 0.11 (0.92-1.08) <sup>x</sup>	0.80 ± 0.13 (0.71-0.88) <sup>x</sup>	0.95 ± 0.14 (0.87-1.02) <sup>x</sup>	0.72 ± 0.07 (0.64-0.79) <sup>x</sup>
pH	0-5	5.1 ± 0.4 (4.7-5.6)	5.4 ± 0.8 (5.0-5.8)	5.9 ± 0.4 (5.4-6.3)	6 ± 0.8 (5.6-6.4)	4.9 ± 0.1 (4.7-5.1)	5.1 ± 0.5 (4.8-5.3)
	10-15	4.7 ± 0.4 (4.5-5.0)	5.2 ± 0.5 (4.9-5.6)	4.7 ± 0.4 (4.5-5.0)	5.8 ± 0.6 (5.5-6.2)	4.7 ± 0.4 (4.5-5.0)	5.2 ± 0.6 (4.9-5.5)
	20-25	5.3 ± 0.5 (5-5.7.0)	5.6 ± 0.5 (5.2-5.9)	5.9 ± 0.4 (5.5-6.3)	6.0 ± 0.7 (5.6-6.3)	5.0 ± 0.2 (4.8-5.2)	5.2 ± 0.4 (5.0-5.4)
CE (μS/cm)	0-5	170 ± 83 (106-233)	177 ± 97 (101-228)	305 ± 166 (200-411)	331 ± 160 (237-448)	217 ± 164 (121-313)	237 ± 123 (156-349)
	10-15	94 ± 57 (61-128)	112 ± 62 (71-154)	94 ± 57 (61-128)	302 ± 142 (169-435)	94 ± 57 (61-128)	211 ± 112 (96-326)
	20-25	74 ± 43 (47-102)	71 ± 39 (44-99)	336 ± 213 (216-457)	265 ± 144 (145-386)	196 ± 142 (114-279)	231 ± 103 (148-314)

\*Nota. Prof: profundidad; IC: intervalo de confianza; CH: contenido de humedad; MOS: materia orgánica del suelo; Da: densidad aparente; AP: alta precipitación; BP: baja precipitación; x: medias significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ; Fisher LSD). La comparación se hizo para cada profundidad y UM de forma independiente.

La Da presentó diferencias estadísticamente significativas en C.c y C.p, en todo el perfil analizado (0-25 cm), con menor Da en temporada de baja precipitación. El arado realizado en ambos cultivos modificó la estructura del suelo y alteró su micro y macroporosidad, la cual durante las temporadas de baja y alta precipitación puede tener diferentes niveles de saturación de agua en el suelo que condicionan los valores de Da. En C.c y C.p se registró una diferencia promedio de hasta  $0.21 \text{ g/cm}^3$  debido al cambio del régimen de lluvia, similar a los resultados observados por Ordoñez et al., (2015), con un descenso de hasta  $0.14 \text{ g/cm}^3$ . En usos intervenidos, no se evidenciaron diferencias significativas para B, lo cual puede estar asociado con el alto grado de compactación (i.e. altos valores de Da) que presenta esta área.

El pH y CE no exhiben diferencias significativas por el cambio del régimen de lluvia ( $p < 0.05$ ) para ninguna de las UM analizadas. Se observa un ligero descenso de estas dos propiedades en época de baja precipitación. El lavado de los horizontes superficiales debido a la escorrentía en temporada de alta precipitación posiblemente arrastra iones solubles (Juan et al., 2011), provocando así este leve descenso en pH y CE.

#### ***7.4.3 El cambio de uso del suelo frente al régimen de lluvia***

En términos generales, las propiedades del suelo bajo VNP son estables al cambio del régimen de lluvia, evidente en la ausencia de diferencias estadísticamente significativas. La tenue estacionalidad del clima y la distribución uniforme de la precipitación anual en el ecosistema de páramo (W. Buytaert et al., 2006) pueden ser una de las razones principales de la baja variación observada en las propiedades del suelo. Por el contrario, en usos intervenidos propiedades como el CH, MOS y Da son disimiles por el cambio del régimen de lluvia. Probablemente estos cambios estén asociados a la exposición directa del suelo a las condiciones climáticas del páramo, así como

las actividades de laboreo que modifican la estructura y la dinámica de los microorganismos del suelo.

Hofstede, (1995) y Ordoñez et al., (2015) afirman que las fluctuaciones temporales en las propiedades del suelo probablemente están más relacionadas con la gestión agrícola que con la estacionalidad de la lluvia en usos intervenidos, mientras que en áreas naturales las características del suelo son dominadas por su génesis (Valenzuela & Armando, 2010). La alta estabilidad del suelo en VNP y, en especial de la MOS (Avellaneda-Torres et al., 2018), responden a la baja variabilidad observada debido al cambio del régimen de lluvia. Por consiguiente, los cambios observados en las propiedades del suelo, en áreas intervenidas, sean producto de una combinación de efectos entre la gestión del suelo y la estacionalidad del clima.

## **7.5 Relación entre el Suelo y los Servicios Hidrológicos**

En esta sección se estudia la relación entre las propiedades hidrofísicas del suelo y el servicio de regulación hidrológica proporcionado por el páramo. Este análisis se realizó a través de la diferencia en la capacidad de retención de humedad entre las UM (a bajas y altas succiones), la conexión entre la precipitación, el rendimiento hídrico y el contenido de humedad del suelo; y la descarga después de un evento de precipitación. Esta sección busca responder el tercer objetivo específico de investigación.

### **7.5.1 Capacidad de retención de humedad**

La distribución del tamaño de poros, la MOS, el contenido y mineralogía de las arcillas son las principales variables que influyen sobre la capacidad de retención de humedad (CRH) (Hillel, 1998; Woesten et al., 2001). A su vez, la textura y la organización estructural intervienen en la

distribución del tamaño de poros, asociados a las fuerzas de capilaridad (potenciales medios y altos de retención de humedad). En tanto, las fuerzas osmóticas y de adsorción (potenciales bajos de retención de humedad) dependen de la MOS, el contenido y mineralogía de las arcillas (J. García, 2007). En la Tabla 16 se sintetiza la CRH para algunas succiones representativas en los usos dominantes del suelo identificados.

**Tabla 16**

*Capacidad de retención de humedad en los usos dominantes del suelo.*

<i>Succión (kPa)</i>	<i>pF</i>	<i>Contenido de humedad (%)</i>					
		<i>N.b</i>	<i>N.a</i>	<i>A.d</i>	<i>B</i>	<i>C.c</i>	<i>C.p</i>
0.1	0	68.4	61.5	87.3	52.9	57.1	65.3
6.2	1.8	59.7	55.6	61.9	43.2	39.5	48.5
33	2.5	48.1	42.1	49.0	34.1	29.3	35.6
1500	4.2	22.3	20.3	24.1	15.8	13.6	14.2

*\*Nota.* pF: logaritmo del potencial matricial; N.b: natural de baja pendiente; N.a: natural de alta pendiente; A.d: arbustiva densa; B: barbecho; C.c: cultivo de cebolla; C.p: cultivo de papa.

En términos generales, la VNP exhibió la mayor CRH a diferentes tensiones respecto a usos intervenidos antrópicamente. La zona A.d destacó entre los usos estudiados por su alta CRH a bajas y altas succiones, superior en 27 y 7%, en promedio, respecto a los demás usos en saturación (0 pF) y punto de marchitez permanente (PMP; 4.2 pF), respectivamente. Probablemente la excelente CRH en A.d esté asociada con una buena distribución del tamaño de poro, sumado al alto contenido de MOS, baja Da y vegetación densa, que le proporcionan un estado de permanente humedad. En conjunto estas características dan pie al desarrollo de una buena estructura del suelo, esencial en la retención hídrica, sin embargo, muy variable en el espacio y el tiempo como consecuencia de procesos naturales (ciclos de humedecimiento-secado y biología del suelo) (J. García, 2007). La

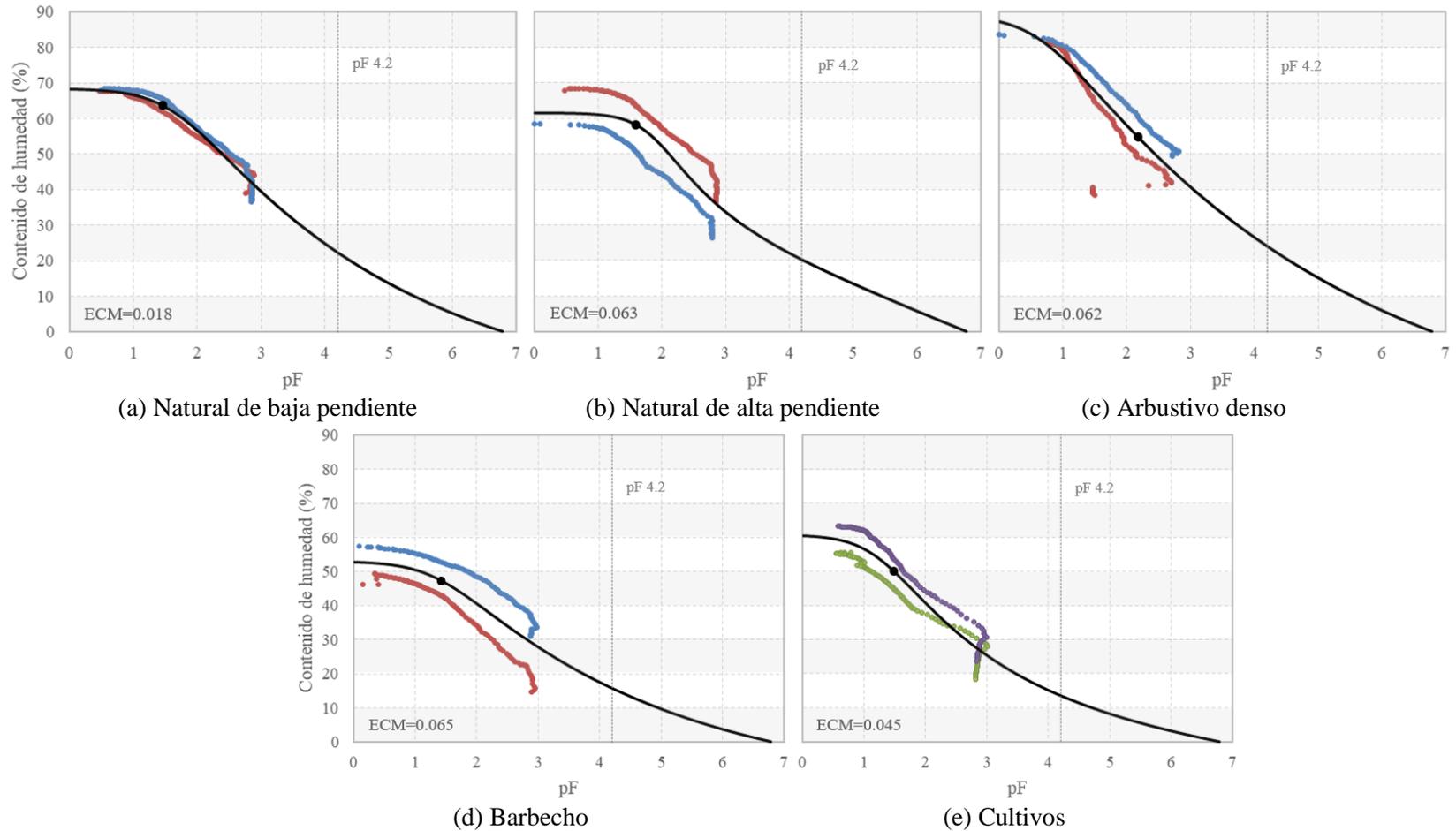
diferencia en el desarrollo de la estructura del suelo entre las áreas naturales puede responder a la menor retención observada en áreas de páramo abierto (N.b y N.a) respecto a A.d, con disimilitudes en el tipo y densidad de vegetación (Löwer, 2020), así como otras propiedades del suelo (e.g. MOS, Da y pH).

Por otro lado, entre los usos intervenidos el C.p presentó una mejor CRH, similar a lo observado en áreas de páramo abierto (N.b y N.a) a bajas succiones. No obstante, probablemente debido a la reorganización de la distribución del tamaño de poro producto del laboreo del suelo, a altas succiones (4.2 pF) la CRH en el C.p fue menor en 6-8% respecto a las áreas de páramo abierto. El B es el uso que presentó la menor CRH en un amplio rango de succiones, posiblemente el agotamiento del suelo por cultivo, sumado al pastoreo ocasional después de su abandono, generaron la reducción en la CRH observada en B.

En la Figura 18 se comparan las curvas de retención de humedad para los usos dominantes identificados que según Leij et al., (2002) son un reflejo de la distribución del tamaño de poro. A pesar de que las áreas de páramo abierto (N.b y N.a) presentaron una CRH similar en el rango estudiado (0-4.2 pF), su curva de retención fue disímil a bajas succiones (vinculada con macroporos donde el agua es retenida débilmente). La diferencia en la tensión de saturación (0.1 pF) y el potencial de entrada de aire (0.5 pF; punto de inflexión de la curva) entre la zona N.b y N.a fue del 7%. Esta diferencia puede estar asociada a una disimilitud en el desarrollo de la macroporosidad del suelo (Leij et al., 2002). A partir de estos resultados, se pudo inferir que la zona N.b tiene mejor desarrollo de la macroporosidad, reflejado en mayor CH en saturación y un drenaje del agua a un menor potencial.

**Figura 18.**

*Curva de retención de humedad para los usos dominantes identificados.*



\*Nota. ECM: error cuadrático medio; ●: punto de inflexión; ●: UH intervenida; ●: UH control; ●: cultivo de cebolla; ●: cultivo de papa; - : ajuste modelo bimodal van Genuchten de Durner.

La CRH del área N.a es ligeramente inferior que la zona N.b, esto se puede deber a la diferencia en pendiente y, por ende, la energía disponible durante el proceso de erosión que puede desprender y arrastrar material particulado, que progresivamente se alojan en los poros más grandes del suelo, derivando en una pérdida en la CRH. Por otro lado, durante un evento de precipitación en zonas que poseen una pendiente más alta domina una rápida redistribución lateral/horizontal de la humedad del suelo, a diferencia de áreas más planas donde domina la infiltración. Estos procesos hidrológicos tienen diferentes incidencias sobre la evolución física del suelo, en especial sobre la meteorización de horizontes superficiales (mineralogía de las arcillas y agregación del suelo), dando lugar a un proceso de formación diferente de poros (interagregados e intraagregados) (Romano & Palladino, 2002), lo cual puede responder a la diferencia observada entre las zonas N.b y N.a.

De otro lado, la curva de retención de humedad de la zona A.d presentó un suave gradiente junto con una ausencia de un punto de inflexión claramente definido. Dexter, (2004) asegura que este tipo de curvas pueden ser un indicativo de un buen desarrollo de la microestructura del suelo (retención de humedad a altas succiones) que, sumado a una elevada presencia de poros interconectados derivados de una alta actividad biológica, le confieren una buena CRH en un amplio rango de succiones. Comparando las curvas obtenidas entre páramo abierto (N.b y N.a) y la zona A.d, la mejor CRH en el área de estudio se observó en A.d, basado en la forma de la curva (aplastamiento y gradiente) y el rango de humedades para baja y altas succiones (Figura 18).

Las áreas intervenidas antrópicamente presentaron una disminución general en la CRH, donde el área de B fue la más afectada. Esta menor capacidad de regulación hidrológica de B probablemente está asociada a la compactación del suelo durante su etapa productiva (Assouline,

2006), lo cual debido a la progresiva disminución del agua disponible (Richard et al., 2001) produjo su abandono al afectar la productividad de los cultivos. Según Abid & Lal, (2008), en suelos bajo manejos convencionales y cultivo continuo, la transmisión de agua es afectada debido a una reducción en el número de poros con el tiempo en la capa arable reflejado en un aumento de la Da (Daza, Flórez, Triana, et al., 2014). El arado continuo provoca cambios en la CRH del suelo en un amplio rango de succiones debido a la modificación de la geometría y distribución del tamaño de poros (Mrabet et al., 2001).

Los usos intervenidos presentaron una reducción promedio del 8% en el PMP respecto a la VNP, inferior a lo encontrado por W. Buytaert, De Bievre, et al., (2002) (16%). Esta reducción se pudo deber a la rápida oxidación de la MOS que deteriora la estructura del suelo (Rattan Lal & Shukla, 2004) y cambia la distribución del tamaño de poro (Dick & Gregorich, 2004), lo que afecta la CRH en el rango húmedo (Zacharias & Wessolek, 2007) y, en especial, el rango seco (Six et al., 2006). W. Buytaert, De Bievre, et al., (2002) sobre áreas de barbecho abandonadas por su bajo rendimiento no observaron una clara recuperación en la CRH después de un periodo de 50 años. Es probable que la generación de agregados hidrofóbicos producto de los ciclos de volteo y desecamiento del suelo durante la etapa productiva del cultivo (J. Poulénard et al., 2004), deterioren severamente la estructura del suelo de páramo reflejado en una menor CRH, mayor escorrentía y finalmente una disminución de la capacidad de regulación hidrológica (e.g. aumento de la velocidad de respuesta ante un evento de precipitación (W. Buytaert et al., 2004)).

Algunos autores Célleri et al., (2010); Daza et al., (2014) y Quichimbo et al., (2012) reportan una degradación más alta en la capacidad de retención de humedad del suelo a altas succiones, vinculada con el punto de marchitez permanente y la microporosidad del suelo. Esta

degradación está relacionada con la introducción de actividades agropecuarias que afectan la distribución de poros en el suelo (Daza et al., 2014): se reduce significativamente la macroporosidad que aumenta la velocidad de infiltración, escorrentía y erosión (Hernández et al., 2009); y se reduce la microporosidad que puede favorecer el rompimiento de agregados y aumentar las arcillas dispersas (Jaramillo, 2002), lo que obstruye los poros y limita la capacidad de retención de humedad (Dorel et al., 2006). Podwojewski et al., (2002b) afirman que la reducción en la capacidad de retención de humedad del suelo de páramo puede estar relacionada con: i) un cambio en la distribución de vacíos, ii) una reducción en contenido de carbono, iii) un cambio en la composición mineralógico y iv) desarrollo de agregados hidrofóbicos.

Buytaert & Deckers, (2002) encontraron una relación positiva entre la MOS y el punto de marchitez permanente y resaltaron el vacío en el conocimiento del rol del aluminio libre en este fenómeno. La remoción de la vegetación y la exposición directa del suelo a las condiciones ambientales del páramo producto del cambio del uso del suelo oxidan la MOS, sumado al poco aporte de biomasa de los cultivos, el cual no es suficiente para restaurar su condición inicial (Daza et al., 2014). Adicionalmente, la erosión puede ocasionar una reducción en la MOS, sin embargo, el destino del carbono aún es tema de debate (Avellaneda-Torres et al., 2018; Henry et al., 2013).

Finalmente, se ha sugerido que la VNP requiere un periodo entre 6-7 años (sin pastoreo) para recuperar sus condiciones iniciales (Verweij, 1995), sin embargo, la restauración del suelo a sus condiciones naturales puede tomar un periodo más largo de tiempo (Podwojewski et al., 2002a). Por lo que la conservación de la VNP es un aspecto crucial en el mantenimiento de la interacción vegetación-suelo y su efecto sobre servicio de regulación hidrológica proporcionado por el páramo.

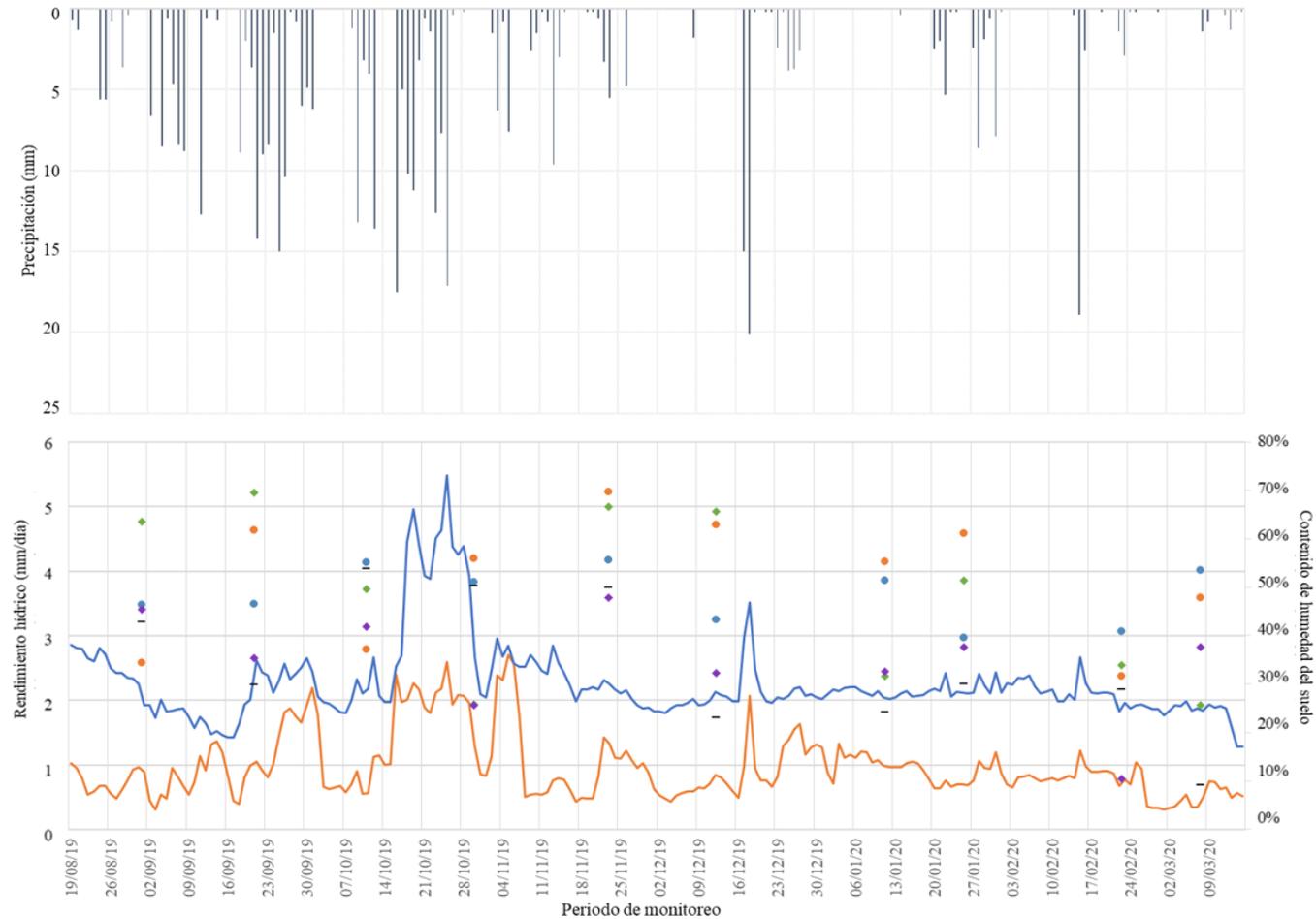
### ***7.5.2 Precipitación, propiedades hidrofísicas del suelo y rendimiento hídrico***

En la Figura 19 se muestra la relación entre la precipitación, contenido de humedad, y rendimiento hídrico durante el periodo de monitoreo. El rendimiento hídrico de la UH intervenida tiende a ser inferior que el observado en la UH control, excepto en cuatro ocasiones puntuales durante la temporada de alta precipitación (13/09/2019, 01/10/2019, 16/10/2019 y 05/11/2019). Es posible que durante la temporada de alta precipitación la demanda de riego para los cultivos disminuya por lo que el caudal y, consecuentemente, el rendimiento hídrico aumente en la UH intervenida llegando a ser similar al exhibido en la UH control. De acuerdo con este resultado, se puede inferir que el principal abatimiento del flujo superficial en el área de estudio se puede deber al requerimiento de agua para riego, puesto que, en promedio se observó que la UH intervenida presentó un rendimiento 58% inferior respecto a la UH control.

Por otro lado, otro proceso importante que puede estar coadyuvando en la salida de humedad del sistema hidrológico es la evapotranspiración, que en páramo natural se ha estimado que está entre 0.8-1.5 mm/día (García et al., 2004), considerado como un valor bajo. Sin embargo, el cambio de uso del suelo introduce nuevas condiciones de evapotranspiración, las cuales son mayores para las áreas cultivadas. Se ha estimado la evapotranspiración del C.c en 3.0 mm/día en condiciones semiáridas (López-Urrea et al., 2009) y de 4.2 mm/día para C.p en regiones semihúmedas (Kashyap & Panda, 2001). No se encontró literatura que estime la evapotranspiración del C.c, C.p y B en condiciones de páramo, el cual es un importante tema de investigación en trabajos futuros, esencial en la cuantificación del balance hídrico.

**Figura 19**

*Relación entre el rendimiento hídrico, precipitación y contenido de humedad del suelo en el tiempo.*



\*Nota. ●: vegetación natural de páramo unidad hidrográfica control; ●: vegetación natural de páramo unidad hidrográfica intervenida; -: barbecho; ◆: cultivo de cebolla; ◆: cultivo de papa; -: rendimiento hídrico unidad hidrográfica control; -: rendimiento hídrico unidad hidrográfica intervenida

En el periodo de baja precipitación (01/12/2019-15/03/2020), se pudo observar que la UH control mantuvo un rendimiento hídrico aproximadamente constante (2 mm/día), mientras la UH intervenida exhibió descensos más pronunciados y cambios más abruptos, en especial hacia el final de la temporada de baja precipitación. Por otro lado, durante la temporada de alta precipitación (25/09/2019-30/11/2019), se pudo observar que la UH control tendió a mantener un rendimiento hídrico que osciló entre 2.0-3.0 mm/día ( $\Delta=1.0$  mm/día), a excepción del periodo 15/10/2019-28/10/2019 que llegó a ser hasta de 5.5 mm/día, producto de eventos de precipitación superiores a 10 mm en este corto periodo de tiempo. Este comportamiento contrasta con el de la UH intervenida cuyo rendimiento hídrico entre 0.5-2.2 mm/día ( $\Delta=1.7$  mm/día). Estos resultados revelaron una mejor capacidad de regulación hidrológica de la UH control, evidente en un rendimiento hídrico aproximadamente constante (temporada de baja precipitación), y una menor oscilación del flujo superficial (temporada de alta precipitación).

No se observó una clara reacción de la señal del CH del suelo y el rendimiento hídrico, es probable que se deba a un retraso en la señal entre el rendimiento hídrico y el CH del suelo, sin embargo, es una hipótesis que requiere mayor investigación. Este retraso en la señal se puede deber probablemente a la compleja interacción vegetación-suelo. Dentro de esta interacción, destaca la evolución de la VNP para atrapar la humedad del ambiente (neblina) (Salamanca, 1986), una entrada importante de agua en ecosistemas de páramo (Ataroff & Rada, 2000; Bruijnzeel & Proctor, 1995), la cual puede estar produciendo un cambio en el CH del suelo sin reflejarse en el rendimiento hídrico de forma paralela o inmediata. Este resultado puede dar un indicio de la capacidad de regulación hidrológica del páramo, al controlar los flujos de humedad después de un evento de precipitación.

La variabilidad espacial y temporal en el CH del suelo puede ser afectada por: la redistribución de la humedad por las raíces (Fernandez-Illescas et al., 2001) y la ausencia de condiciones de estrés para la vegetación (Ivanov et al., 2010). Así mismo, la redistribución espacial de la precipitación debido a la intercepción del dosel y el goteo foliar conduce a patrones heterogéneos en áreas de bosque (Beier et al., 1993; Jost et al., 2004). Por otro lado, en condiciones muy húmedas, la variabilidad del CH es controlada principalmente por la conductividad hidráulica, porosidad (Vereecken et al., 2007) y distribución de tamaño de partícula que pueden llevar a un incremento en la variabilidad observada (Pan & Peters-Lidard, 2008; Vereecken et al., 2007). En condiciones más secas, la variabilidad en el CH del suelo puede ser disminuida por la evapotranspiración en ambientes atmosféricamente secos (Pan & Peters-Lidard, 2008). D'Odorico et al., (2000) asegura que el CH del suelo es de carácter dinámico y depende de fuerzas externas complejas de mecanismos no lineales que pueden inducir un aumento en las fluctuaciones, sumado a las condiciones locales del suelo.

En la Tabla 17 se compara el rendimiento hídrico por temporada de precipitación para cada UH (control e intervenida). La diferencia en el rendimiento hídrico por el cambio del régimen de lluvia (temporada de alta precipitación respecto a baja precipitación) fue de 37 y 31 mm/día para la UH control e intervenida, respectivamente. El abatimiento del flujo superficial es mayor para la UH control por el cambio del régimen de lluvia, no obstante, la diferencia es similar para ambas UH. Este resultado similar puede estar asociado a la excelente capacidad de almacenamiento de agua del suelo bajo VNP. No obstante, la diferencia (6 mm/día) entre las UH puede ser relacionada directamente con el cambio de uso del suelo, que en caso de la UH intervenida es del 24% (11.6 % -cultivos- y 12.2% -barbecho-).

**Tabla 17***Rendimiento hídrico por temporada de precipitación.*

<i>Temporada</i>	<i>Precipitación (mm)</i>	<i>Rendimiento hídrico (mm/día)</i>	
		<i>UH Control</i>	<i>UH Intervenida</i>
<i>Alta precipitación</i>	332	257	118
<i>Baja precipitación</i>	114	220	87
<b>Total</b>	<b>445</b>	<b>477</b>	<b>205</b>

\*Nota. UH: unidad hidrográfica.

Es probable que la demanda de agua para riego sea la principal causa del abatimiento del rendimiento hídrico de la corriente superficial, sumado al cambio en las condiciones de evapotranspiración, estimado en una salida total de agua de 272 mm/día (57%) para la UH intervenida respecto a la UH control. De esta forma, se puede inferir que un cambio de uso del suelo del 24% por actividades agrícolas influencia el potencial de abastecimiento de agua proporcionado por una UH de páramo.

Por otro lado, se observó que en la temporada de baja precipitación el rendimiento hídrico en la UH control fue mayor a la precipitación ocurrida durante ese periodo, por lo cual se puede inferir que existe otra entrada de humedad al sistema hidrológico. Esto contrasta con lo ocurrido durante la estación de alta precipitación en la cual el rendimiento hídrico fue inferior a la precipitación total. La entrada adicional de humedad en temporada de baja precipitación en el área de estudio se estima en un 93% respecto a la precipitación, el transporte horizontal de humedad responde parcialmente a la diferencia observada que en páramo se ha estimado en una adición entre 7-28% respecto a la precipitación (Bruijnzeel & Proctor, 1995; M. F. Cárdenas et al., 2017). Así mismo, es probable que existan aportes de otras UH debido a la disposición hidrogeológica (un tópico que requiere mayor investigación en el área de estudio). De igual forma, la sobreestimación

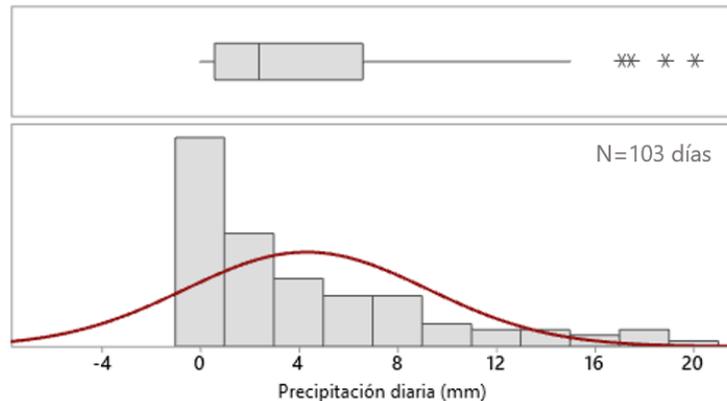
en el rendimiento hídrico se pudo deber a errores en la captura de la información producto de defectos en el equipo o errores en su calibración.

### 7.5.3 Regulación de flujos de agua superficial

En la Figura 20 se muestra la distribución de frecuencia para la precipitación diaria acumulada en el área de estudio; se excluyeron los días sin lluvia con el objeto de visualizar de mejor forma la distribución de la cantidad de precipitación. Se registraron en total 108 días sin lluvia (51% del periodo de monitoreo), mientras en el restante de tiempo llovió en promedio 4.3 mm/día. La distribución de la precipitación fue asimétrica sesgada hacia la izquierda, la mitad de los días con lluvia fueron inferiores a 2.4 mm/día, no obstante, se presentaron 14 días con precipitación superior a 10 mm/día de forma ocasional en la temporada de alta precipitación.

#### Figura 20

*Distribución de frecuencia de la precipitación diaria en el área de estudio.*



\*Nota. \*: dato atípico; —: ajuste a distribución normal. Se excluyeron los días sin lluvia para visualizar de mejor forma el comportamiento de la precipitación (109 días sin lluvia).

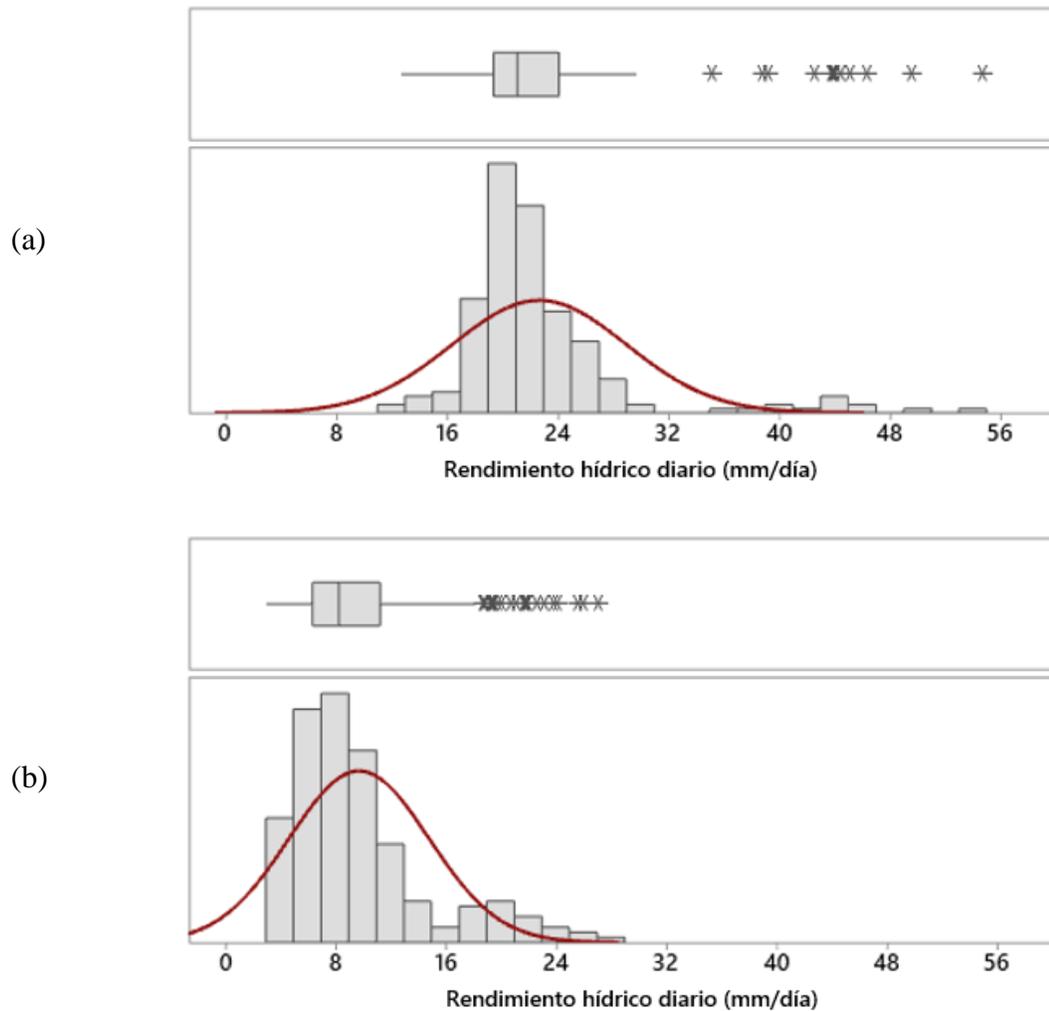
En la Figura 21 se presenta la distribución de frecuencia para el rendimiento hídrico diario en el área de estudio para: (a) UH control y (b) UH intervenida. Se observa una brecha sustancial

en el rendimiento hídrico diario medio entre ambas UH ( $\Delta=13.0$  mm/día), posiblemente debido a la sustracción de agua para riego, junto con el aumento de la evapotranspiración producto del cambio de uso del suelo. El rendimiento hídrico para UH control exhibe una distribución central sin sesgo aparente, con algunos datos superiores a 32 mm/día (13 días), ocurridos durante la época de alta precipitación. Por otro lado, la UH intervenida exhibe dos picos de frecuencia bien definidos, siguiendo una distribución bimodal; el primero de mayor frecuencia con un rendimiento de 8.0 mm/día y el segundo de 20.0 mm/día. El primer pico de frecuencia puede estar asociado al rendimiento hídrico en condiciones normales, es decir, sin eventos de alta intensidad, que son regulados de forma natural por la UH intervenida; mientras el segundo pico de frecuencia puede estar asociado a eventos de alta intensidad que no pueden ser regulados debido al cambio de uso del suelo, produciendo un segundo grupo de datos con un rendimiento hídrico diario medio mayor.

De acuerdo a lo observado en la Figura 21, el suelo y la VNP, desempeñan en conjunto un rol importante: la regulación hidrológica de flujos superficiales (W. Buytaert, Deckers, et al., 2002) y el ciclo hidrológico (WWF, 2006). Sin embargo, la introducción de actividades agrícolas modificaron la estructura natural del suelo (Avellaneda-Torres et al., 2018; Dorel et al., 2006). Se ha reportado que las actividades culturales (e.g. arado) reducen la rugosidad del suelo y crean drenajes artificiales que aceleran la escorrentía e interrumpen el almacenamiento de agua, lo que lleva a un aumento de los flujos pico (W. Buytaert, Célleri, et al., 2006). Sumado a lo anterior, el deterioro de las propiedades hidrofísicas del suelo (e.g. disminución de la CRH, reducción de la MOS, cambio en la distribución de poros, entre otras) puede generar un aumento de los flujos pico como sucedió en la UH intervenida (segundo pico de rendimiento hídrico).

**Figura 21**

*Distribución de frecuencia del rendimiento hídrico diario; (a) UH control y (b) UH intervenida.*



\*Nota. \*: dato atípico; —: ajuste a distribución normal.

W. Buytaert, (2004) y Ochoa-Tocachi et al., (2016) reportaron un cambio en la descarga sobre pequeñas cuencas de páramo producto del cambio del uso del suelo por actividades agrícolas, reflejado en un aumento de la razón flujo pico y flujo base (6.9). Buytaert et al., (2005) en un estudio similar, encontraron una reducción en la capacidad de regulación hídrica de hasta un 40% producto del cambio de uso del suelo. En relación con la escorrentía superficial, Poulenard et al.,

(2001), reportaron un incremento de hasta un 300%, en contraste con lo hallado por Sarmiento, (2000) que fue menor al 2% en cuencas empleadas para pastoreo intensivo y actividades agrícolas, respectivamente. Por otro lado, Hofstede, (1995) no encontró diferencias significativas en la capacidad de infiltración del suelo por la introducción de los cultivos. Esto muestra la complejidad del fenómeno de la transformación del páramo natural, un tópico que requiere mayor investigación (B.F. Ochoa-Tocachi et al., 2018).

En la Tabla 18 se compila el rendimiento hídrico (dos horas después) de 143 eventos de precipitación ocurridos durante el periodo de monitoreo en seis grupos de acuerdo con la precipitación acumulada. El rango de los intervalos fue seleccionado de acuerdo con la precipitación típica en el área de estudio (baja intensidad). Para la UH control se observó una relación positiva entre el rendimiento hídrico y la intensidad de lluvia, es decir, eventos de mayor precipitación produjeron un mayor rendimiento hídrico. En contraste, la UH intervenida tuvo una tendencia similar a la UH control con eventos de precipitación inferiores a 3.0 mm, sin embargo, con intensidades superiores su tendencia no fue clara. Es posible que este resultado este asociado con una menor capacidad de regulación hidrológica de los flujos superficiales, sin embargo, un periodo de estudio más largo puede arrojar tendencias más claras en la UH intervenida.

**Tabla 18***Rendimiento hídrico dos horas después de un evento de precipitación.*

<i>No. Intervalo</i>	<i>Precipitación (mm)</i>		<i>Rendimiento(mm/día)</i>	
	<i>Inicio</i>	<i>Final</i>	<i>UH Control</i>	<i>UH Intervenido</i>
1	0.0	1.0	0.30	0.14
2	1.0	3.0	0.36	0.16
3	3.0	5.0	0.41	0.21
4	5.0	7.0	0.45	0.20
5	7.0	10.0	0.46	0.40
6	10.0	12.9	0.57	0.31

## 8. Conclusiones

### Objetivo específico 1:

El cambio de uso del suelo en páramo natural por actividades antrópicas modificó negativamente las propiedades hidrofísicas del suelo relacionadas con el servicio de regulación hidrológica. En términos generales, se observaron las mayores variaciones en las propiedades los primeros centímetros de suelo. Se apreció una reducción promedio del contenido de humedad (22%) y materia orgánica del suelo (11%), así como un aumento del pH (1.1) y conductividad eléctrica (56  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La densidad aparente en áreas cultivadas (0.85  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) es ligeramente inferior al observado en zonas de páramo abierto (0.89  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) a nivel superficial. No obstante, la sobreexplotación del suelo conllevó a un aumento de la densidad como se observó en el área de barbecho (1.08  $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Entre los usos intervenidos, el área con cultivo de cebolla presentó el suelo menos ácido, con mayor conductividad eléctrica y contenido de humedad, por otro lado, con poco más de un año de uso el suelo con cultivo de papa presentó un deterioro en todas las propiedades hidrofísicas del suelo respecto a la vegetación natural de páramo. El barbecho es el uso que exhibió el mayor deterioro del suelo (menor contenido de humedad, materia orgánica del suelo, capacidad de infiltración, capacidad de retención de humedad y mayor densidad aparente) en el área de estudio. Por lo tanto, se puede inferir que la sobreexplotación del suelo genera los mayores cambios en las propiedades hidrofísicas del suelo de páramo, repercutiendo en el servicio de regulación hidrológica.

#### Objetivo específico 2:

El cambio de régimen de lluvia (alta precipitación -19/08/2019 – 30-11/2019- y baja precipitación -30/11/2019 – 15/03/2020-) no tuvo un efecto significativo sobre las propiedades hidrofísicas del suelo bajo vegetación natural de páramo. Sin embargo, el área natural de baja pendiente mostró diferencias en la densidad aparente ( $0.16 \text{ g/cm}^3$ ) debido al cambio de régimen de lluvia, asociado a su ubicación en una zona constantemente sometida a condiciones atmosféricas intensas (alta radiación y fuerte viento). Respecto a los usos intervenidos, se presentaron diferencias en: 19% en el contenido de humedad para barbecho (0-15 cm), 8% en materia orgánica para barbecho (0-5 cm), y  $0.23 \text{ g/cm}^3$  en la densidad aparente en áreas cultivadas con cebolla y papa (0-25 cm).

#### Objetivo específico 3:

Se observó un menor porcentaje de agregados estables a la erosión hídrica en áreas cultivadas (44%) frente a la vegetación natural de páramo (67%), disímil con el área de barbecho (60%; moderadamente estable), posiblemente debido a la alta densidad de raíces y la compactación del suelo por pisoteo. Por otro lado, destaca el alto valor de la conductividad hidráulica saturada (obtenida del modelo de Kostiakov) en parcelas cultivadas (18.3-20.4 cm/h) respecto a áreas con vegetación natural de páramo (2.3-6.3 cm/h), como consecuencia del laboreo del suelo.

El suelo bajo vegetación natural de páramo exhibió una mayor capacidad de retención de humedad respecto a los usos intervenidos en un amplio rango de succiones. El punto de marchitez permanente presentó el mayor impacto por el cambio de uso del suelo con una reducción de 8.3 y 6.4 % para cultivos y barbecho, respectivamente, frente a la vegetación natural de páramo. El área

arbustiva densa mostró la mayor capacidad de retención de humedad en el área de estudio: 87% en saturación y 24% en el punto de marchitez permanente; relacionado con un alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente y vegetación densa que le proporcionan un estado de permanente humedad favorable para el servicio de regulación hidrológica.

Se aprecia una reducción en el rendimiento hídrico de la unidad hidrográfica intervenida respecto al control (57%), relacionado con la demanda de agua para riego y el cambio de las condiciones de evapotranspiración. La unidad hidrográfica control exhibe una distribución monomodal del rendimiento hídrico diario medio (23 mm/día), mientras la unidad hidrográfica intervenida presenta una distribución bimodal (8 y 20 mm/día). Esta distribución bimodal en la unidad hidrográfica intervenida puede ser producto de eventos de precipitación extremos que no pueden ser regulados de forma natural y producen un segundo grupo de datos de mayor magnitud.

Con base en el estudio de las dos unidades hidrográficas (19/08/2019-15/03/2020) se encontró que un cambio de uso del suelo (24%) en la vegetación natural de páramo por actividades agropecuarias (combinación de cultivo de cebolla, cultivo de papa y barbecho con pastoreo ocasional) modifican las propiedades hidrofísicas del suelo, la capacidad de regular eventos de precipitación extremos y, consecuentemente, el servicio de regulación hidrológica.

## 9. Recomendaciones

- La respuesta de la señal del contenido de humedad del suelo y el rendimiento hídrico puede ser analizada de mejor forma con un monitoreo continuo de la humedad del suelo.
- Se recomienda continuar con el monitoreo de la capacidad de retención de humedad del suelo, debido a que depende estrechamente de otras propiedades del mismo (e.g. materia orgánica del suelo, actividad biológica, distribución de la porosidad, entre otras).
- La caracterización y cuantificación de la actividad biológica puede ser útil en la explicación de ciertos procesos (e.g. materia orgánica, pH, humedad, entre otros), que pueden influir sobre la capacidad de retención de humedad del suelo.

Se recomienda tomar otro grupo de muestras en el área natural de baja pendiente, en régimen de alta y baja precipitación, para verificar la diferencia observada en la densidad aparente por el cambio del régimen de lluvia, dado que esta puede ser producto de variaciones de las características del suelo dentro de la misma unidad de muestreo.

- La aplicación de indicadores hidrológicos adicionales a los analizados en esta investigación, tales como: índice de regulación hidrológica, constante de recesión, caudal diario mínimo/máximo, índice estacional de Richards-Baker, entre otros, puede aproximar de mejor forma la pérdida del servicio de regulación hidrológica para la UH intervenida.
- Extender el monitoreo del suelo por más tiempo (al menos dos temporadas de precipitación) para dar una mayor certeza sobre los resultados relacionados con el efecto del régimen de precipitación.

### Referencias

- Abid, M., & Lal, R. (2008). Tillage and drainage impact on soil quality. I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. *Soil and Tillage Research*, 100(1–2), 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.04.012>
- Aggarwal, P., Choudhary, K. K., Singh, A. K., & Chakraborty, D. (2006). Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. *Geoderma*, 136(1–2), 353–363. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.04.004>
- Agudelo, M. F. C., Cardenas, M., Fernanda, M., & Agudelo, C. (2016). *Ecohydrology of paramos in Colombia: Vulnerability to climate change and land use* [Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín]. <https://doi.org/bdigital.unal.edu.co/56394/>
- Alonso, D. L., Pérez, R., Okio, C. K. Y. A., & Castillo, E. (2020). Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of Santurbán paramo, Colombia. *Journal of Environmental Management*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110478>
- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29.
- Assouline, S. (2006). Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 554–563. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0083>
- ASTM. (2001). Standard test method for pH of soils. In *Annual Book of ASTM Standards* (pp. 1–7). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2216-10.1.5>
- ASTM. (2005). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. In *Annual Book of ASTM Standards* (Issue November 1988, pp. 1–7). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2216-10.1.5>
- ASTM. (2007a). Standard Practices for Preserving and Transporting Soil Samples. In *International Standard* (Vol. 95, Issue Reapproved 2007, pp. 1–11). ASTM International. <https://doi.org/10.1111/jocn.13195>

- ASTM. (2007b). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. In *ASTM International* (Vols. D422-63, Issue Reapproved 1998, pp. 1–8). ASTM International. [https://doi.org/WestConshohocken, PA](https://doi.org/WestConshohocken,PA).
- ASTM. (2011a). Standard Test Methods for Organic Matter Content of Athletic Field Rootzone Mixes. In *Annual Book of ASTM Standards* (Issue 9, pp. 1–7). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2216-10.1.5>
- ASTM. (2011b). Standard Test Methods for Saturated Hydraulic Conductivity ,Water Retention ,Porosity ,and Bulk Density of Athletic Field Rootzones. In *International Standard* (Vol. 3, Issue 2, pp. 9–14). ASTM International. <https://doi.org/10.2307/2073448>
- ASTM. (2014a). *Standard Practice for Sampling Soils and Contaminated Media with Hand-Operated Bucket Augers* (Vol. 1, Issue March, pp. 2010–2013). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6907-05E01.2>
- ASTM. (2014b). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. In *Annual Book of ASTM Standards* (pp. 1–8). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-10.2>
- Ataroff, M., & Rada, F. (2000). Deforestation Impact on Water Dynamics in a Venezuelan Andean Cloud Forest. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(7), 440–444. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.7.440>
- Avellaneda-Torres, L. M. L. M. L. M., León Sicard, T. E. T. E. T. E., & Torres Rojas, E. (2018). Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of Neotropical high Andean Páramo ecosystem soils. *Science of the Total Environment*, 631–632, 1600–1610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.137>
- Balesdent, J., Chenu, C., & Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53(3–4), 215–230. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)
- Ballesteros, J. B., Bernal, J. F., Castrillón, W. F., & Correa, A. (2002). Caracterización semicuantitativa de las sustancias húmicas de un acrudoxic melanudands mediamórfico isotérmico del municipio de Chinchiná-Caldas. *Universidad Distrital Francisco José de*

*Caldas. Ciencias Básicas, Rev. Científica*, 4, 57–68.

- Balthazar, V., Vanacker, V., Molina, A., & Lambin, E. F. (2015). Impacts of forest cover change on ecosystem services in high Andean mountains. *Ecological Indicators*, 48, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.043>
- Baptiste, B., & Ruggiero, M. S. (2011). El gran libro de los páramos. In A. Vásquez & A. Buitrago (Eds.), *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt* (1st ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Beier, C., Hansen, K., & Gundersen, P. (1993). Spatial variability of throughfall fluxes in a spruce forest. *Environmental Pollution*, 81(3), 257–267. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(93\)90208-6](https://doi.org/10.1016/0269-7491(93)90208-6)
- Benavides, I. F., Solarte, M. E., Pabón, V., Ordoñez, A., Beltrán, E., Rosero, S., & Torres, C. (2018). The variation of infiltration rates and physical-chemical soil properties across a land cover and land use gradient in a Paramo of southwestern Colombia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(4), 400–410. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.400>
- Benavides, J. (2014). The effect of drainage on organic matter accumulation and plant communities of high-altitude peatlands in the Colombian tropical Andes. *Mires And Peat*, 15.
- Blackman, A., & Sánchez-Triana, E. (2007). Control de la degradación de los suelos y de la deforestación. In *Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia* (pp. 403–436). Mayol.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Brooks, A. P., Brierley, G. J., & Millar, R. G. (2003). The long-term control of vegetation and woody debris on channel and flood-plain evolution: Insights from a paired catchment study in southeastern Australia. *Geomorphology*, 51(1–3), 7–29. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00323-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00323-9)
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations

- in vegetation. In *Journal of Hydrology* (Vol. 310, Issues 1–4, pp. 28–61). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>
- Bruijnzeel, L. A., & Proctor, J. (1995). Hydrology and Biogeochemistry of Tropical Montane Cloud Forests: What Do We Really Know? BT - Tropical Montane Cloud Forests. In L. S. Hamilton, J. O. Juvik, & F. N. Scatena (Eds.), *Tropical montane cloud forests* (pp. 38–78). Springer.
- Buytaert, W., De Bievre, B., Deckers, J., Dercon, G., Govers, G., & Poesen, J. (2002). Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. *Soil Use and Management*, 2, 94–100. <https://doi.org/10.1079/sum2001107>
- Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., De Bièvre, B., Poesen, J., & Govers, G. (2002). Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. *Soil Use and Management*, 18(2), 94–100.
- Buytaert, W., Sevink, J., De Leeuw, B., & Deckers, J. (2005). Clay mineralogy of the soils in the south Ecuadorian páramo region. *Geoderma*, 127(1–2), 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.021>
- 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 Use of linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(1), 108–114. <https://doi.org/10.5194/hess-8-108-2004>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006). *Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador BT - Environmental Role of Wetlands in Headwaters* (J. Krecek & M. Haigh (Eds.); pp. 271–281). Springer Netherlands.
- Buytaert, Wouter. (2004). *The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Buytaert, Wouter, Celleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*,

79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>

- Buytaert, Wouter, Célleri, R., De Bièvre, B., & Iñiguez, V. (2007). The impact of pine plantations on water yield: A case study from the ecuadorian andes. *IAHS-AISH*, 317, 225–228. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-55849140214&partnerID=tZOtx3y1>
- Buytaert, Wouter, Deckers, J., & Wyseure, G. (2006). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73(3–4), 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>
- Buytaert, Wouter, Iñiguez, V., & Bièvre, B. De. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Buytaert, Wouter, Wyseure, G., De Bièvre, B., Deckers, J., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R., Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., ... Bièvre, B. De. (2005a). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 19(1–2), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Camargo García, J. C., Dossman, M. Á., Rodríguez, J. A., Arias, L. M., & Galvis Quintero, J. H. (2012). Cambios en las propiedades del suelo, posteriores a un incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia. *Acta Agronómica; Vol. 61, Núm. 2 (2012)*.
- Cañón-Cortázar, Roger Guillermo; Avellaneda-Torres, Lizeth Manuela; Torres-Rojas, E. (2012). *Microorganismos asociados al ciclo del nitrógeno en suelos bajo tres sistemas de uso: cultivo de papa, ganadería y paramo, en el Parque Los Nevados, Colombia. 4, 371–379.*
- Cárdenas, M. F., Tobón, C., & Buytaert, W. (2017). Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*, 31(24), 4440–4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>
- Cárdenas, S. (2015). *Evaluación de la calidad de los suelos de páramo intervenidos y no intervenidos en la comuna Monjas Bajo, Parroquia Juan Montalvo, Contón Cayambe.* Universidad Politécnica Salesiana.

- Celis, A. (2020). *Evaluación de la Respuesta Hidrológica de Microcuencas Aplicando un Enfoque de Cuencas Pareadas en Ecosistema de Páramo con Alta Presencia de cultivos de Cebolla (Allium fistulosum)*. Universidad Industrial de Santander.
- Célleri, R., De Bièvre, B., & Tobon, C. (2010). Understanding the hydrology of tropical Andean ecosystems through an Andean network of basins FONAG-Fondo para la Protección del Agua. *IAHS-AISH*, 336(April 2010), 209–212. <https://doi.org/10.13140/2.1.4187.3608>
- Chan, K. Y. (2001). An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - Implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research*, 57(4), 179–191. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00173-2)
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., & Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1479–1486. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441479x>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- Colby, J. D., & Keating, P. L. (1998). Land cover classification using Landsat TM imagery in the tropical highlands: The influence of anisotropic reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8), 1479–1500. <https://doi.org/10.1080/014311698215306>
- Colprensa. (2018, August 29). Corte ratificó tutela que tumbó la delimitación del Páramo de Santurban. *Diario El País*.
- Conese, C., & Maselli, F. (1991). Use of multitemporal information to improve classification performance of TM scenes in complex terrain. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46(4), 187–197. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(91\)90052-W](https://doi.org/10.1016/0924-2716(91)90052-W)
- Disposiciones para la Gestión Integral de los Páramos en Colombia, Pub. L. No. 1930, 1 (2018).
- Coonan, E. C., Kirkby, C. A., Kirkegaard, J. A., Amidy, M. R., Strong, C. L., & Richardson, A. E. (2020). Microorganisms and nutrient stoichiometry as mediators of soil organic matter dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 117(3), 273–298. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10076-8>
- Cortés, D., Pérez, J., & Camacho Tamayo, J. (2013). Relación espacial entre la conductividad

- eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 401–408. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n2.2013.912>
- Cosentino, D., Chenu, C., & Le Bissonnais, Y. (2006). Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8), 2053–2062. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.12.022>
- Cresswell, H. P., Smiles, D. E., & Williams, J. (1992). Soil structure, soil hydraulic properties and the soil water balance. *Australian Journal of Soil Research*, 30(3), 265–283. <https://doi.org/10.1071/SR9920265>
- Curatola, G. F., Obermeier, W. A. W. A., Gerique, A., López Sandoval, M. F., Lehnert, L. W. L. W., Thies, B., Bendix, J., Fernandez, G. F. C., Obermeier, W. A. W. A., Gerique, A., Lopez Sandoval, M. F., Lehnert, L. W. L. W., Thies, B., Bendix, J., Curatola Fernández, G. F., Obermeier, W. A. W. A., Gerique, A., López Sandoval, M. F., Lehnert, L. W. L. W., ... Bendix, J. (2015). Land Cover Change in the Andes of Southern Ecuador-Patterns and Drivers. *REMOTE SENSING*, 7(3), 2509–2542. <https://doi.org/10.3390/rs70302509>
- D'Odorico, P., Ridolfi, L., Porporato, A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2000). Preferential states of seasonal soil moisture: The impact of climate fluctuations. *Water Resources Research*, 36(8), 2209–2219. <https://doi.org/10.1029/2000WR900103>
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2018). *Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH)*.
- Daza, M., Flórez, F., & Triana, F. (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/2248-7026>
- Daza, M., Flórez, F., Triana, F., Hernández, F., Alba, F., Constanza, M., & Torres, D. (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/2248-7026>
- De Bièvre, B., Iñiguez, V., & Buytaert, W. (2006). Hidrología del páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad. *Investigaciones Biofísicas En El Páramo*, 21.

- de Groot, R.S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7(3), 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
- De Groot, Rudolf S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Devenish, C., Hofstede, R., & Saravia, M. (2012). Las montañas en nuestro lugar: La importancia de las montañas para el desarrollo sostenible antes y después de Río+ 20. *Revista Virtual REDESMA*, 6(1), 8. [http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S1995-10782012000100002&script=sci\\_arttext&lng=en](http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S1995-10782012000100002&script=sci_arttext&lng=en)
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3–4), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- Dick, W. A., & Gregorich, E. G. (2004). Developing and maintaining soil organic matter levels. In P. Schjonning, S. Christensen, & B. T. Elmholt (Eds.), *Managing Soil Quality Challenges in Modern Agriculture* (pp. 103–120). CABI Publishing.
- Dorel, M., Roger-Estrade, J., Manichon, H., & Delvaux, B. (2006). Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. *Soil Use and Management*, 16(2), 133–140. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2000.tb00188.x>
- Duarte, A. (n.d.). *Modelación del impacto del uso del suelo en la oferta hídrica. Caso de estudio: cuenca del Río Jordán en el Distrito de Manejo Integrado (DMI) “Páramo de Berlín.”* Universidad Industrial de Santander.
- Dungait, J. A. J., Hopkins, D. W., Gregory, A. S., & Whitmore, A. P. (2012). Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*, 18(6), 1781–1796. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x>
- Eduardo Martínez, H., Juan Pablo Fuentes, E., & Edmundo Acevedo, H. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutricion Vegetal*, 8(1), 68–96.

- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). *La Acidez y encalado de los suelos* (Vol. 1). International Plant Nutrition Institute. [http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez y encalado de suelos](http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez_y_encalado_de_suelos)
- Estupiñán, L. H., Gómez, J. E., Barrantes, V. J., & Limas, L. F. (2009). Efecto de las actividades agropecuarias en las Características Del Suelo En El Páramo El Granizo (Cundinamarca - Colombia). *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica*, 12(2), 79–89.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). *¿Por qué invertir en el desarrollo sostenible de las montañas?* FAO.
- Farley, K. A., Kelly, E. F., & Hofstede, R. G. M. (2004). Soil organic carbon and water retention after conversion of grasslands to pine plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems*, 7(7), 729–739. <https://doi.org/10.1007/s10021-004-0047-5>
- Fernandez-Illescas, C. P., Porporato, A., Laio, F., & Rodriguez-Iturbe, I. (2001). The ecohydrological role of Soil texture in a water-limited ecosystem. *Water Resources Research*, 37(12), 2863–2872. <https://doi.org/10.1029/2000WR000121>
- Gabioud, E. A., Wilson, M. G., & Sasal, M. C. (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia Del Suelo*, 29(2), 129–139.
- García, J. (2007). *Las curvas de retención de humedad y su estimación mediante funciones de pedotransfer en suelo agrícolas de Artemisa y Mayabeque*. Universidad Agraria de La Habana.
- García, M. C. R., García, C. E. R., Brown, S., & Cordero, E. (2008). Water Resource Research and Education in Mountain Communities. *Mountain Research and Development*, 28(3/4), 196–200. <https://doi.org/10.1659/mrd.1038>
- García, M., Raes, D., Allen, R., & Herbas, C. (2004). Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology*, 125(1–2), 67–82. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.03.005>
- Gonzalez, J. (2000). Monitoring cloud interception in a tropical montane cloud forest in the south western Colombian Andes. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, 1(1), 97–117.

- Guhl, E. (1982). Los Páramos circundantes de la Sabana de Bogotá. Su Ecología y su Importancia para el Régimen Hidrológico de la misma. *Colloquium Geograficum* 9, 9, 195–212.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Diseño de Experimentos* (M. Toledo (Ed.); 2nd ed.). McGraw-Hill.
- Gutiérrez, M. L., & Gutiérrez, M. L. (2015). *Carbono como indicador de degradación de la calidad del suelo bajo diferentes coberturas en el páramo de Guerrero Carbono como indicador de degradación de la calidad del suelo bajo diferentes coberturas en el páramo de Guerrero*.
- Harden, C. P. (2006). Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology*, 79(3–4), 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.021>
- Harden, Carol P., Hartsig, J., Farley, K. A., Lee, J., & Bremer, L. L. (2013). Effects of Land-Use Change on Water in Andean Páramo Grassland Soils. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 375–384. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.754655>
- Hedberg, I., & Hedberg, O. (1979). Tropical-Alpine lifeforms of vascular plants. *Oikos*, 33(2), 297–307. <https://doi.org/10.2307/3544006>
- Henry, A., Mabit, L., Jaramillo, R. E. E., Cartagena, Y., & Lynch, J. P. P. (2013). Land use effects on erosion and carbon storage of the Río Chimbo watershed, Ecuador. *Plant and Soil*, 367(1–2), 477–491. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1478-y>
- Hernandez, A. (2017). *Evaluación del proceso de compostaje de pollinaza fresca y otros materiales orgánicos generados en el páramo de Berlín*. Universidad Industrial de Santander.
- Hernández, F., Alba, F., & Daza, M. (2009). Efecto de las actividades agropecuarias en la capacidad de infiltración de los suelos del sumapaz. *Fitosanidad*, 8, 29–38. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=209114854010>
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier.
- Hincapié, J., Castillo, C., Cruz, S., Ramírez, D., Salazar, F., Ville, J., Villa, A., & Van der Hammen, T. (2002). Transformación y cambio en el uso del suelo en páramos de Colombia en las últimas décadas. In C. Uribe (Ed.), *Páramos y Ecosistemas alto Andinos de Colombia en*

*condiciones Hotspot & Global Climatic Tensor* (pp. 221–335). PNUD.

- Hofstede, R. (1995). Effects of livestock farming and recommendations for management and conservation of paramo grasslands (Colombia). *Land Degradation & Rehabilitation*, 6(February), 133–147. <https://doi.org/10.1002/ldr.3400060302>
- Hofstede, R. G. M. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Plant and Soil*, 173(1), 111–132. <https://doi.org/10.1007/BF00155524>
- Hofstede, R. G. M., & Rossenaar, A. J. G. A. (1995). Biomass of Grazed, Burned, and Undisturbed Paramo Grasslands, Colombia. I. Above ground vegetation. *Arctic and Alpine Research*, 27(1), 13. <https://doi.org/10.2307/1552063>
- Hofstede, Robert. (1997). La Importancia Hídrica del Páramo y Aspectos de su Manejo. *Conferencia Electrónica “Estrategias Para La Conservación y Desarrollo Sostenible de Páramos y Punas En La Ecorregión Andina: Experiencias y Perspectivas,”* 1–5. [http://infoandina.mtnforum.org/sites/default/files/publication/files/La\\_Importancia\\_H\\_drica\\_del\\_P\\_aramo\\_y\\_Aspectos\\_de\\_su\\_Manejo.pdf](http://infoandina.mtnforum.org/sites/default/files/publication/files/La_Importancia_H_drica_del_P_aramo_y_Aspectos_de_su_Manejo.pdf)
- Hofstede, Robert. (2001). El impacto de las actividades humanas sobre el páramo. *Los Páramos Del Ecuador. Particularidades, Problemas y Perspectivas*, 161–181.
- Hofstede, Robert. (2013). Lo mucho que sabemos del páramo. Apuntes sobre el conocimiento actual de la integridad, la transformación y la conservación del páramo. In J. Cortes-Duque & C. Sarimiento (Eds.), *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de defición de criterios para la delimitación de páramos* (1st ed., pp. 113–126). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Hofstede, Robert, Calles, J., López, V., Polanco, R. R. R., Torres, F., Ulloa, J. J., Vásquez, A., Cerra, M., Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R. R. R., Torres, F., Ulloa, J. J., Vásquez, A., Cerra, M., Hofstede, R., Calles, J., López, V., ... Cerra, M. (2014). Los Páramos Andinos ¿Qué Sabemos?: Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema de páramo. In *UICN, Quito, Ecuador* (1st ed.). UICN. [https://doi.org/PSYP837 \[pii\]n10.1111/j.1469-8986.2009.00837.x](https://doi.org/PSYP837[pil]n10.1111/j.1469-8986.2009.00837.x)

- Hofstede, Robert, Coppus, R., Vásconez, P. M., Segarra, P., Wolf, J., & Sevink, J. (2002). El estado de conservación de los páramos de pajonal en el Ecuador. *Ecotropicos*, 15(1), 3–18.
- Hofstede, Robert, Segarra, P., & Mena, P. (Eds.). (2003). *Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos* (1st ed.). Global peatland initiative/NC-UICN/EcoCiencia.
- Hoorn, V., & Alphen, V. (1994). Salinity control. In H. Ritzema (Ed.), *Drainage principles and application* (2nd ed., pp. 533–600). ILRI.
- Humboldt, I. de I. de R. B. A. Von. (2014). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia* (M. Cabrera & W. Ramírez (Eds.)). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. E., Helg, U., & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1–2), 75–124. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00071-X)
- IDEAM. (2020). *Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos*. <http://dhime.ideam.gov.co/>
- IDEAM (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales). (2001). *El medio ambiente en Colombia*.
- IGAC (Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”). (2003). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Santander*. <http://www.ideam.gov.co/>
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). *Base referencial mundial del recurso suelo: un marco conceptual para clasificación correlacional y comunicación internacional* (1st ed.). Informe sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO.
- Ivanov, V. Y., Fatichi, S., Jenerette, G. D., Espeleta, J. F., Troch, P. A., & Huxman, T. E. (2010). Hysteresis of soil moisture spatial heterogeneity and the “homogenizing” effect of vegetation. *Water Resources Research*, 46(9). <https://doi.org/10.1029/2009WR008611>
- Jaramillo, D. (2002). Las propiedades físicas del suelo. In *Introducción a la ciencia del suelo* (1st ed., pp. 149–293). Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrera, V., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., Ferreira, W.,

- Peralvo, M., Saito, J., & Tovar, A. (2009). *Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela*. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, LTA-UNALM, IAvH, ICAE-ULA, CDC - UNALM, RUMBOL SRL.
- Jost, G., Schume, H., & Hager, H. (2004). Factors controlling soil water-recharge in a mixed European beech (*Fagus sylvatica* L.)-Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] stand. *European Journal of Forest Research*, *123*(2), 93–104. <https://doi.org/10.1007/s10342-004-0033-7>
- Juan, P., Mateu, J., Jordan, M. M., Mataix-Solera, J., Meléndez-Pastor, I., & Navarro-Pedreño, J. (2011). Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity. *Journal of Geochemical Exploration*, *108*(1), 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.10.003>
- Karaca, A., Oguz, S., & Kidvan, R. (2010). Soil Enzymes as Indication of Soil Quality. In G. Shukla & A. Varma (Eds.), *Soil Enzymology*. Springer.
- Kashyap, P. S., & Panda, R. K. (2001). Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, *50*(1), 9–25.
- Kehrer, W., & Van der Kaaden, G. (1979). Notes on the Geology of Ecuador with special reference to the Western Cordillera. *Geol. Jb.*, *35*, 5–57.
- Kleber, M., Jian-Ping, H., & Stahr, K. (1998). Microbial biomass C- and N-dynamics in grassland soils amended with liquid manure. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *161*(1), 87–92. <https://doi.org/10.1002/jpln.1998.3581610114>
- Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub>-enrichment. *Soil and Tillage Research*, *43*(1–2), 81–107. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00036-6)
- Lal, Rattan, & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, *528*(7580), 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>

- Leij, F. J., Ghezzehei, T. A., & Or, D. (2002). Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. *Soil and Tillage Research*, 64(1–2), 61–78. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00257-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00257-4)
- Li, J., Tong, X., Awasthi, M. K., Wu, F., Ha, S., Ma, J., Sun, X., & He, C. (2018). Dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities along a chronosequence of desertified land revegetation. *Ecological Engineering*, 111, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.006>
- Lichner, L., Eldridge, D. J., Schacht, K., Zhukova, N., Holko, L., Sir, M., & Pecho, J. (2011). Grass cover influences hydrophysical parameters and heterogeneity of water flow in a sandy soil. *Pedosphere*, 21(6), 719–729. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60175-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60175-6)
- López-Bellido, R. J., Fontán, J. M., López-Bellido, F. J., & López-Bellido, L. (2010). Carbon sequestration by tillage, rotation, and nitrogen fertilization in a mediterranean vertisol. *Agronomy Journal*, 102(1), 310–318. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0165>
- López-Urrea, R., de Santa Olalla, F. M., Montoro, A., & López-Fuster, P. (2009). Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 96(6), 1031–1036.
- Löwer, C. (2020). *What impact does grazing intensity have on the degradation of vegetation structure in a dry páramo?* Universität Bayreuth.
- Lu, M., Zhou, X., Luo, Y., Yang, Y., Fang, C., Chen, J., & Li, B. (2011). Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140(1–2), 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.010>
- Luteyn, J. L., & Balslev, H. (1992). Paramos: Why Study Them? In *Paramo: an Andean ecosystem under human influence* (pp. 1–14).
- Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2006). Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, 95(4), 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.007>
- Macías, Y., & Omaña, M. (2018). *Validación de la metodología Corine Land Cover para la*

*generación de mapa de cobertura del suelo: Caso Cuenca del Río Jordán (Tona, Santander).*

Universidad Industrial de Santander.

Resolución 2090, 14 (2014).

Malagon, D., & Pulido, C. (2000). Suelos del páramo colombiano. In O. Rangel (Ed.), *Colombia. Diversidad Biótica III. La Región de Vida Paramuna* (1st ed.). Universidad Nacional de Colombia.

Mambuscay, B. V., & Collazos, E. A. (2009). Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agronómica*, 58(1), 35–39.

Martín-López, B., González, J. A., Vilardy, S. P., Montes, C., García-Llorente, M., Palomo, I., & Agudelo, M. (2012). *Ciencias de la sostenibilidad: Guía docente* (1st ed.). Universidad del Magdalena, Instituto Humboldt, Universidad Autónoma de Madrid, Centro de estudios de América Latina (CEAL).

Martinez, G., Vanderlinden, K., Ordóñez, R., & Muriel, J. L. (2009). Can apparent electrical conductivity improve the spatial characterization of soil organic carbon? *Vadose Zone Journal*, 8(3), 586–593. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0123>

Marulanda, J., & Villa, J. (2015). Densidad aparente y concentración de materia orgánica en el suelo de un humedal de alta montaña. *Journal of Engineering and Technology*, 4, 8–20.

Decreto 2372, 23 (2010).

Melero, S., López-Bellido, R. J., López-Bellido, L., Muñoz-Romero, V., Moreno, F., & Murillo, J. M. (2011). Long-term effect of tillage, rotation and nitrogen fertiliser on soil quality in a Mediterranean Vertisol. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.007>

Melero, Sebastiana, Madejón, E., Ruiz, J. C., & Herencia, J. F. (2007). Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 327–334. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.11.004>

- Mena, P., Medina, G., & Mena, P. (2001). Los páramos en el Ecuador. In P. Mena, A. G. Mena, & R. Hofstede (Eds.), *Los páramos del Ecuador: particularidades, problemas y perspectivas* (pp. 1–24). Abya-Yala.
- Messerli, B., Viviroli, D., & Weingartner, R. (2004). Mountains Vulnerable of the World : Water Towers for the 21st Century. *AMBIO Special Report*, 13(December 2004), 29–34. <https://doi.org/10.5167/uzh-110516>
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente). (2001). *Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de Alta Montaña: Páramos*.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente). (2005). *Lineamientos de política para el manejo integral del agua*.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente). (2002). Congreso Mundial de Páramos. In A. Cristal (Ed.), *Memorias Tomo I* (p. 960).
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente), & Geoingeniería. (1999). *Identificación de prioridades para la gestión ambiental en ecosistemas de páramos, sabanas, zonas áridas y semiáridas y humedales de agua dulce*.
- Montenegro Gonzalez, H., Malagón Castro, D., & Guerrero, L. (1990). *Propiedades físicas de los suelos* (D. Malagón (Ed.)). IGAC Subdirección Agrícola.
- Montes-Pulido, C. R., Miras, J. J. R., & Wery, A. M. S. J. (2017). Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca-Colombia. *Acta Agronomica*, 66(1), 95–101. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.53171>
- Morales, J. A., & Estévez, J. V. (2006). El páramo: ¿ecosistema en vía de extinción? *Luna Azul*, 22, 39–51.
- 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* (J. . Betancourth (Ed.); 1st ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

- Mrabet, R., Saber, N., El-Brahli, A., Lahlou, S., & Bessam, F. (2001). Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Soil and Tillage Research*, 57(4), 225–235. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00180-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00180-X)
- Muñoz Guerrero, D. A. (2017). Transformaciones y prospectiva del paisaje en el Páramo de Paja Blanca, Nariño, Colombia. In *Perspectiva Geográfica* (Vol. 22, Issue 2). <https://doi.org/10.19053/01233769.7598>
- Naciones Unidas. (1992). Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río de Janeiro. In *Documentos Oficiales de la Asamblea General*.
- Napoleón, B., Montealegre, G., Ipaz, S., Chaparro, S., & Ramírez, L. (2008). Efecto de cuatro métodos de labranza sobre las propiedades físicas y la pérdida de suelo en la rotación papa-pastos en áreas de ladera en una región alto andina de Colombia. *Acta Agronómica*, 57(1), 35–42.
- Novelli, L. E., Caviglia, O. P., Wilson, M. G., & Sasal, M. C. (2013). Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*, 195–196, 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.013>
- Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W., Antiporta, J., Acosta, L., Bardales, J. D., Célleri, R., Crespo, P., Fuentes, P., Gil-Ríos, J., Gualpa, M., Viñas, P., & De Bièvre, B. (2018). Data Descriptor: High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. *Scientific Data*, 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.80>
- Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A. C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Ochoa-Tocachi, Boris F, Buytaert, W., & Bièvre, B. De. (2017). Participatory Monitoring of the Impact of Watershed Interventions in the Tropical Andes. In *Andean Hydrology* (pp. 127–163).

- Ordoñez, M. C., Galicia, L., Figueroa, A., Bravo, I., & Peña, M. (2015). Effects of peasant and indigenous soil management practices on the biogeochemical properties and carbon storage services of Andean soils of Colombia. *European Journal of Soil Biology*, 71, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.001>
- Osman, K. T. (2013). Physical Properties of Soil. In *Soils* (1st ed., pp. 49–65). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>
- Otero, J. D., Figueroa, A., Muñoz, F. A., & Peña, M. R. (2011). Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area. *Ecological Engineering*, 37(12), 2035–2043. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.001>
- Pan, F., & Peters-Lidard, C. D. (2008). On the relationship between mean and variance of soil moisture fields. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(1), 235–242. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00150.x>
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Ovideo-Ocaña, R., Ochoa-Tocachi, B. F., & Buytaert, W. (2020). Influence of land use on hydro-physical properties of Andean páramos and its linkages to hydrological regulation. *Personal Reference*.
- Peña-Quemba, D., Rubiano-Sanabria, Y., & Riveros-Iregui, D. (2016). Effects of land use on soil CO<sub>2</sub> flux in the Paramo de Guerrero, Colombia. *Agronomia Colombiana*, 34(3), 364–373. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n3.58791>
- Pérez-Escobar, O. A., Cámara-Leret, R., Antonelli, A., Bateman, R., Bellot, S., Chomicki, G., Cleef, A., Diazgranados, M., Dodsworth, S., Jaramillo, C., Madriñan, S., Olivares, I., Zuluaga, A., & Bernal, R. (2018). Mining threatens Colombian ecosystems. *Science*, 359(6383), 1475 LP – 1475. <http://science.sciencemag.org/content/359/6383/1475.1.abstract>
- Peters, A. (2013). Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research*, 49(10), 6765–6780. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20548>
- Peters, T., Drobnik, T., Meyer, H., Rankl, M., Richter, M., Rollenbeck, R., Thies, B., & Bendix, J. (2013). Environmental changes affecting the Andes of Ecuador. In *Ecosystem services, biodiversity and environmental change in a tropical mountain ecosystem of South Ecuador*

(pp. 19–29). Springer.

- Piccolo, A., & Mbagwu, J. S. C. (1999). Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 63(6), 1801–1810. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361801x>
- Plata, C., & Hernández, P. (2018). *Revisión sistemática de literatura acerca de los parámetros del suelo que afectan la cantidad de agua en los páramos andinos*. (Undergraduate dissertation), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). (2002). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial (GEO-3)* (R. Clarke, R. Lamb, & D. R. Ward (Eds.); 1st ed.). Ediciones Mundi-Prensa.
- Podwojewski, P., & Germain, N. (2005). Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 56(1), 39–51. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00638.x>
- Podwojewski, P., & Poulenard, J. (2000). La degradación de los suelos de los páramos. In P. Mena, G. Medina, & C. Josse (Eds.), *Los suelos del páramo* (pp. 27–36). Serie páramo 5. GTP/Abya Yala.
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., & Hofstede, R. (2002a). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo. *Management*, 18(1), 45–55. <https://doi.org/10.1079/SUM2001100>
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., & Hofstede, R. (2002b). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18(1), 45–55. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00049.x>
- Pombo, D. (1989). *Perfil ambiental de Colombia*. U.S. Agency for International Development, Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales “Francisco José de Caldas” Colciencias, y Fondo FEN Colombia.
- Porta, J, López-Acevedo, M., & Poch, R. (2010). *Introducción a la Edafología: Uso y protección*

*de los suelos*. Mundi-Prensa.

- Porta, Jaime, López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). Propiedades hidrológicas del suelo: movimiento del agua. In *Edafología: para agricultura y medio ambiente* (3rd ed., pp. 349–390). Mundi-Prensa.
- Poulenard, J., Michel, J. C., Bartoli, F., Portal, J. M., & Podwojewski, P. (2004). Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian páramo: Effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. *European Journal of Soil Science*, 55(3), 487–496. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00625.x>
- Poulenard, Jérôme. (2000). *Les sols des Páramos d'Équateur sur couverture pyroclastique : diversité, genèse et propriétés physiques*. Université Henri Poincaré Nancy 1 (Doctoral dissertation).
- Poulenard, Jérôme, Podwojewski, P., & Herbillon, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, 117(3–4), 267–281. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9)
- Poulenard, Jérôme, Podwojewski, P., Janeau, J., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: Effect of tillage and burning. *Catena*, 45(3), 185–207. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00148-5)
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cardenas, I., Crespo, P., & Celleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: {Paramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2)(2), 138–153.
- Ramírez, R. C., & Bautista, J. J. R. (2018). Territorial multifunctionality and tourism. Sociocultural, economic and environmental implications in emerging rural destinations. A case study in Comala, Colima | Multifuncionalidad territorial y turismo. Implicaciones socioculturales, económicas y ambie. *Investigaciones Turísticas*, 15, 79–107. <https://doi.org/10.14198/INTURI2018.15.04>
- Rangel, O., Rangel, J. ., & Rangel, O. (2000). La región paramuna y franja aledaña en Colombia. In O. Rangel (Ed.), *Colombia. Diversidad biótica III. La región de vida paramuna* (1st ed.,

- pp. 1–23). Universidad Nacional de Colombia.
- Ravi, V., Williams, J. R., & Burden, D. S. (1998). *Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Compilation of Simple Mathematical Models, Volume I*. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
- Reid, W. V., Mooney, H. A., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S. R., Chopra, K., Dasgupta, P., Dietz, T., Duraiappah, A. K., Hassan, R., Kasperson, R., Leemans, R., May, R. M., McMichael, T. (a. J. ., Pingali, P., Samper, C., Scholes, R., Watson, R. T., Zakri, A. H., ... Zurek, M. B. (2005). Millennium Ecosystem Assessment. In J. Sarukhán & A. Whyte (Eds.), *World Resource Institute* (pp. 1–43). <http://www.millenniumassessment.org/>
- Restrepo, J., Ardila, E., & Gualdrón, J. (2008). *Plan Integral de Manejo del Distrito de Manejo Integrado de los Recursos Naturales*.
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J. F., Bruand, A., & Guérif, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1), 49–58.
- Rienzner, M., & Gandolfi, C. (2014). Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale. *Soil and Tillage Research*, 135, 28–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2013.08.012>
- Roa-García, M. C., Brown, S., Schreier, H., & Lavkulich, L. M. (2011). The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resources Research*, 47(5). <https://doi.org/10.1029/2010WR009582>
- Romano, N., & Palladino, M. (2002). Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. *Journal of Hydrology*, 265(1–4), 56–75. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00094-X)
- Ross, C., Fildes, S., & Millington, A. C. (2017). Land-use and land-cover change in the páramo of South-Central Ecuador, 1979-2014. *Land*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/land6030046>
- Rousseaux, J. M., & Warkentin, B. P. (1976). Surface properties and Forces Holding Water in Allophane Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 40(3), 446–451.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000030037x>

- Sainju, U. M., Whitehead, W. F., & Singh, B. P. (2003). Agricultural management practices to sustain crop yields and improve soil and environmental qualities. *TheScientificWorldJournal*, 3, 768–789.
- Salamanca, S. (1986). La vegetación del Páramo, única en el mundo. In *Colombia, sus gentes y regiones* (Vol. 2, Issue 2).
- Sandoval, M. (2004). Agricultural and settlement frontiers in the tropical Andes : the páramo belt of northern Ecuador, 1960-1990. *Mountain Research and Development*, 25(4), 386–387.
- Sarmiento, C., & Ungar, P. (2014). *Aportes a la delimitación del páramo mediante la identificación de los límites inferiores del ecosistema a escala 1:25.000 y análisis del sistema social asociado al territorio: Complejo de Páramos Jurisdicciones – Santurbán – Berlín departamentos de Santa* (C. Sarmiento & P. Ungar (Eds.); 1st ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/32539>
- Sarmiento, L. (2000). Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mountain Research and Development*, 20(3), 246–253. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0246:WBASLU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0246:WBASLU]2.0.CO;2)
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Broderson, W. D. (Eds.). (2002). *Guía de campo para el muestreo y descripción de perfiles de suelo* (2nd ed.). Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.
- Serrano Giné, D., & Galárraga Sánchez, R. (2015). El páramo andino: características territoriales y estado ambiental. Aportes interdisciplinarios para su conocimiento. *Estudios Geográficos*, 76(278), 369–393. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201513>
- Shaxson, F., & Barber, R. (2008). *Optimizacion De La Humedad Del Suelo Para La Produccion Vegetal-el Significado De La Porosidad Del Suelo* (Vol. 79). Food & Agriculture Org.
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. A. (1993). Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. In *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization* (Vol. 53, Issue 9).

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Shoji, Sadao, & Fujiwara, Y. (1984). Active aluminum and iron in the humus horizons of andosols from northeastern Japan: Their forms, properties, and significance in clay weathering. *Soil Science*, 137(4), 216–226. <https://doi.org/10.1097/00010694-198404000-00002>
- Sierra, R. (1999). *Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental*. INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia.
- Silva, L. L. (2007). Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil. *Agricultural Water Management*, 94(1–3), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.08.003>
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., & Batten, K. M. (2006). Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555–569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>
- Stonestrom, D. A., Scanlon, B. R., & Zhang, L. (2009). Introduction to special section on Impacts of Land Use Change on Water Resources. *Water Resources Research*, 45(6), 1–3. <https://doi.org/10.1029/2009WR007937>
- Strudley, M. W. M. W., Green, T. R. T. R. T. R., Ascough, J. C., Ascough II, J. C., & Ascough, J. C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 4–48. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.007>
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., Sevink, J., & De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 392–405. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01241.x>
- Tovar, C., Seijmonsbergen, A. C., & Duivenvoorden, J. F. (2013). Monitoring land use and land cover change in mountain regions: An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes. *Landscape and Urban Planning*, 112(1), 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.003>
- Troll, C. (1968). The cordilleras of the tropical Americas: aspects of climatic, phytogeographical

- and agrarian ecology. In C. Troll (Ed.), *Geoecology of the Mountainous Regions of the Tropical Americas* (pp. 15–56). UNESCO.
- USDA. (2020). *Soil Texture Calculator*.  
[www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2\\_054167](http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167)
- USDA (U.S. Department of Agriculture). (2011). *Electrical Conductivity Test* (p. 3). USDA.
- USDA, & NRCS. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (12th ed.). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA); Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS).
- Valenzuela, I., & Armando, T. (2010). Física de los suelos. In H. Burbano & F. Silva (Eds.), *Ciencia del suelo: principios básicos* (1st ed., pp. 139–212). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Van der Hammen, T., Caicedo, J. D. P., Gutiérrez, H., & Alarcón, J. C. (2002). El cambio global y los ecosistemas de alta montaña de Colombia. In C. Castaño (Ed.), *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición hotspot y global climatic tensor* (pp. 163–209). IDEAM.
- Vereecken, H., Kamai, T., Harter, T., Kasteel, R., Hopmans, J., & Vanderborght, J. (2007). Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture: A stochastic unsaturated flow perspective. *Geophysical Research Letters*, *34*(22). <https://doi.org/10.1029/2007GL031813>
- Verweij, P. A. (1995). *Spatial and temporal modelling of vegetation patterns - burning and grazing in the paramo of Los Nevados National Park, Colombia*. University of Amsterdam (Doctoral dissertation).
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, *43*(7). <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>
- Volverás-Mambuscay, B., Amézquita-Collazos, É., & Campo-Quesada, J. M. (2016). Indicadores de calidad física del suelo de la zona Cerealera Andina del departamento de Nariño, Colombia.

- Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 361–377.  
[https://doi.org/10.21930/rcta.vol17\\_num3\\_art:513](https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:513)
- Wei, Y., Bai, Y., Jin, J., Zhang, F., Zhang, L., & Liu, X. (2009). Spatial Variability of Soil Chemical Properties in the Reclaiming Marine Foreland to Yellow Sea of China. *Agricultural Sciences in China*, 8(9), 1103–1111. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60318-1](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60318-1)
- Weil, Raymond R; Brady, N. C. (2016). *The Nature and Properties of Soils* (12th ed.). Prentice-hall.
- Wigmore, O., & Gao, J. (2014). Spatiotemporal dynamics of a páramo ecosystem in the northern Ecuadorian Andes 1988-2007. *Journal of Mountain Science*, 11(3), 708–716. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2365-6>
- Woesten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., Rawls, W. J., Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3–4), 123–150. [http://www.mendeley.com/share/viewDocument/desktopClient/3205751\\_1326369854\\_2ee7b261-f82d-4141-8650-afcc4b98f77a/1327579566/b579809deb3d06f7ca996d0817b0f2cc25473519/](http://www.mendeley.com/share/viewDocument/desktopClient/3205751_1326369854_2ee7b261-f82d-4141-8650-afcc4b98f77a/1327579566/b579809deb3d06f7ca996d0817b0f2cc25473519/)
- WWF. (2006). *High Andean Wetlands: fragile, strategic ecosystem for million of people*. [assets.panda.org/.../humedalesaltoandinosingles.pdf](https://assets.panda.org/.../humedalesaltoandinosingles.pdf)
- Zacharias, S., & Wessolek, G. (2007). Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 43–50. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0098>

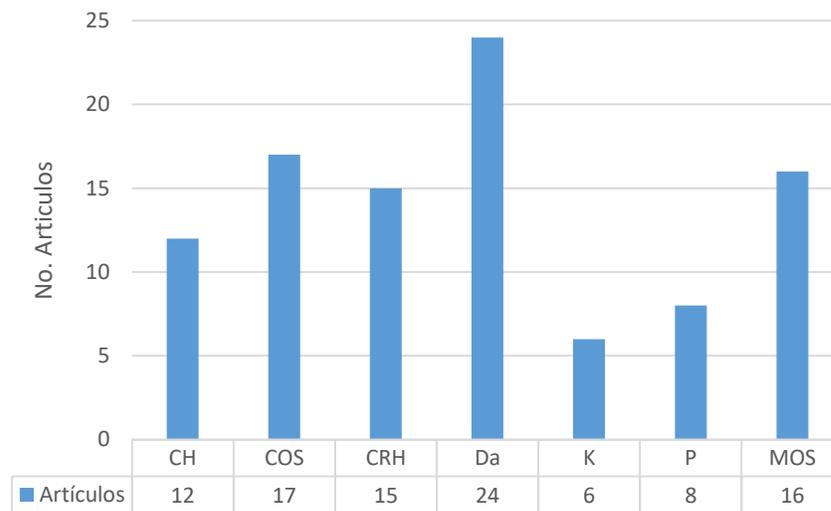
## Anexos

### Anexo A

*Principales propiedades hidrofísicas reportadas en la investigación del suelo de páramo.*

### Figura A1

*Propiedades reportadas en la investigación del cambio del uso del suelo de páramo.*

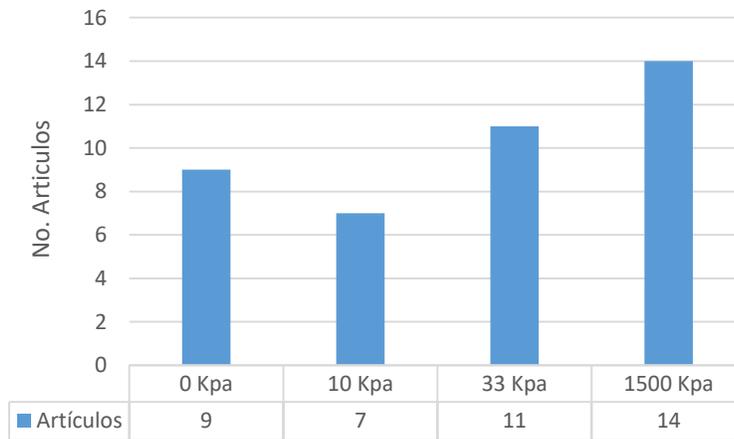


*Nota.* CH: contenido de humedad; COS: carbono orgánico del suelo; CRH: capacidad de retención de humedad; Da: densidad aparente; K: conductividad hidráulica; P: porosidad; MOS: materia orgánica del suelo.

*Adaptado de:* (Plata & Hernández, 2018).

**Figura A2**

*Principales succiones reportadas en la evaluación de la capacidad de retención de humedad.*



*Adaptado de:* (Plata & Hernández, 2018).

**Anexo B**

*Búsqueda, selección, caracterización y resumen de la revisión de literatura.*

***Búsqueda y selección de la literatura***

La revisión de literatura se enfocó en artículos que abordaron como tópico principal el efecto del cambio del uso del suelo en páramo y las propiedades hidrofísicas del suelo perturbadas por este cambio. De forma paralela, se indagó sobre estudios que relacionaron los servicios de regulación y suministro de agua en cuencas de páramo sometidas a actividades agrícolas que vincularan el estado físico y químico del suelo en sus análisis. Para esto, se consultaron las bases de datos científicas (Scopus ®, Springer ®, Web of Science ®, Elsevier ®, Scielo ® y Google Scholar ®). Así mismo, se consultaron archivos electrónicos: libros, disertaciones y reportes de reconocidas instituciones internacionales. Las palabras clave se organizaron en tres grupos (Tabla 1B), para generar una ecuación de búsqueda (E1). La exploración de las bases de datos con este modelo de búsqueda junto con otras consultas independientes regresó un total de 549 artículos.

**Tabla 1B**

*Grupos de palabras clave.*

<b><i>Grupo KW1</i></b>	<b><i>Grupo KW2</i></b>	<b><i>Grupo KW3</i></b>
Land use change	Páramo	Cultivation/Crop
Land use cover	Peatland	Livestock/Cattle
Soil use	Andes	Afforestation/Forestry
		Burn
		Tillage

\* *Nota.* KW: Keywords

Paralelamente, al seleccionar los artículos se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de inclusión:

- i. La literatura debe abordar las propiedades hidrofísicas del suelo como tema principal o secundario.
- ii. La selección de palabras predefinidas debe aparecer en al menos uno de los campos principales: título, palabras clave o resumen.
- iii. La investigación debe estar publicada en una revista científica revisada por pares, una organización internacional o institución académica de amplio reconocimiento.
- iv. Se limitó a una ventana temporal de publicación de las investigaciones entre 1990-2019.
- v. El idioma del documento: inglés o español.

```
TITLE-ABS-KEY("land use change" OR "land cover" OR "soil use")  
AND TITLE-ABS-KEY(p*ramo OR andes) AND TITLE-ABS-KEY(cultivation  
OR crop OR rearing OR cattle OR forestation OR forestry OR burn OR tillage) [E1]  
AND NOT TITLE-ABS-KEY(model*).
```

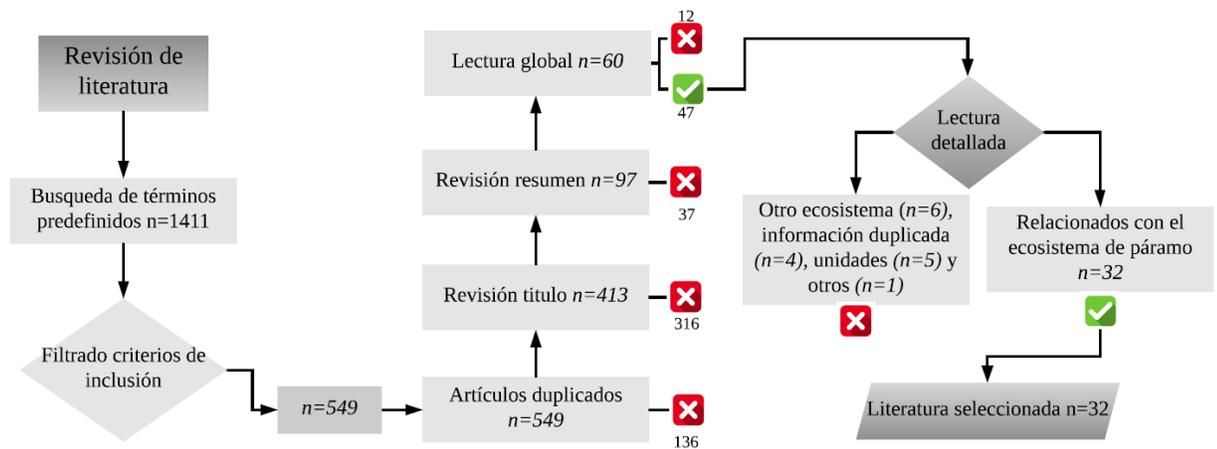
Luego de la obtención de los 549 artículos que cumplieron con los criterios de inclusión, se procedió a realizar una selección de acuerdo con el protocolo de exclusión descrito a continuación (Figura 1B):

- i. Se eliminaron 136 artículos duplicados mediante el software Mendeley.
- ii. Se eliminaron 316 artículos luego de la revisión del título.
- iii. Se eliminaron 37 artículos luego de la lectura del resumen.

- iv. Se eliminaron 12 artículos luego de la lectura global del documento.
- v. Se eliminaron 16 artículos luego de la lectura completa del documento (6 artículos relacionaos con otro tipo de ecosistema, 4 artículos que reportaron el mismo conjunto de datos, 5 artículos cuyas unidades no pudieron ser transformadas y 1 artículo que no especificaba claramente los usos del suelo).

### Figura 1B

*Proceso de selección de investigaciones en la revisión de literatura.*



Se realizó la lectura completa de los 32 artículos seleccionados, lo cual permitió identificar la información comúnmente reportada para describir las características físicas e hidrológicas de las zonas objeto de estudio (Tabla 2B).

**Tabla 2B***Variables reportadas en investigaciones de cambio de cobertura del suelo.*

<b>Grupo</b>	<b>Variable</b>	<b>Tipo</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Descripción</b>
<b>1</b>	País	Cualitativa	-	Variables que caracterizan la zona de estudio
	Elevación	Cuantitativa	msnm	
	Área	Cuantitativa	m <sup>2</sup>	
	PMA	Cuantitativa	mm/año	
	Tipo de suelo	Cualitativa	-	
	Tipo de vegetación	Cualitativa	-	
	Uso del suelo	Cualitativa	-	
	Tiempo de uso	Cuantitativa	Años	
<b>2</b>	Método de muestreo	Cualitativa	-	Variables que describen la metodología empleada
	Número de muestras	Cuantitativa	-	
	Profundidad	Cuantitativa	m	
	Periodo de estudio	Cuantitativa	Meses	
<b>3</b>	CH	Cuantitativa	%	Propiedades relacionadas con el comportamiento hidrológico de la zona no saturada
	COS	Cuantitativa	%	
	MOS	Cuantitativa	%	
	PMP	Cuantitativa	%	
	CC	Cuantitativa	%	
	K	Cuantitativa	L/s	
	Ks	Cuantitativa	L/s	
	Da	Cuantitativa	gr/cm <sup>3</sup>	
	Dp	Cuantitativa	gr/cm <sup>3</sup>	
	CRH	Cuantitativa	%	
Textura	Cuantitativa	%		

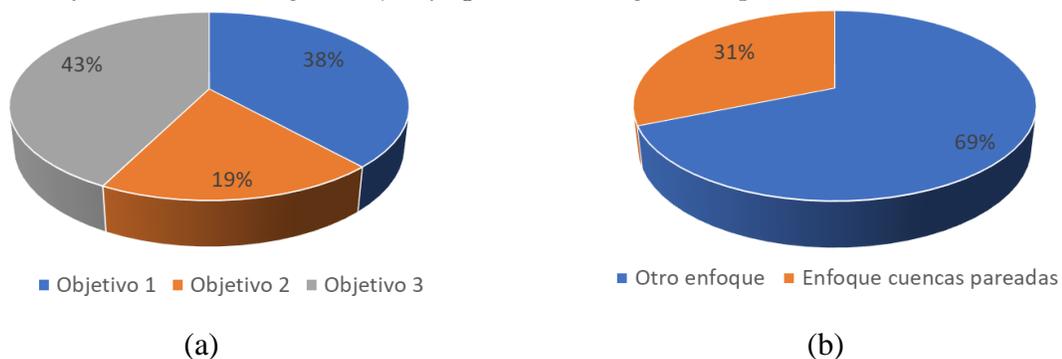
*\*Nota.* PMA: precipitación media anual; CH: contenido de humedad; COS: Carbono orgánico del suelo; MOS: materia orgánica del suelo; PMP: punto de marchitez permanente; CC: capacidad de campo; K: conductividad hidráulica; Da: densidad aparente; Dp: densidad de partícula; CRH: curva de retención de humedad.

### *Caracterización de las investigaciones sobre el suelo de páramo.*

De la literatura consultada, el propósito de las investigaciones se puede dividir en tres objetivos: i. Evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo producto del cambio de cobertura, ii. Comparar el estado de los servicios hídricos del páramo natural frente al efecto antrópico y iii. Estudiar el almacenamiento de carbono. En la Figura 2Ba se observa el porcentaje de estudios por objetivo de investigación.

### **Figura 2B**

*Principales objetivos de investigación y enfoque metodológico adoptado.*



*Adaptado de:* (Plata & Hernández, 2018).

En la Figura 2Bb se observa el porcentaje de investigaciones que abordaron como enfoque metodológico el sistema de cuencas pareadas (31%). Este enfoque fue adoptado principalmente para responder al Objetivo 2 de investigación (servicios hídricos del páramo natural frente al efecto antrópico), dado que múltiples autores reportan la imposibilidad de separar los efectos de confusión como la variabilidad climática, efecto de la topografía, edafogénesis y geomorfología de los resultados (W. Buytaert, Deckers, et al., 2002). De esta forma, el método de cuencas pareadas separa estos efectos de los resultados y pueden atribuir la variación en las propiedades hidrofísicas del suelo al cambio de cobertura con una mayor certeza (Brown et al., 2005).

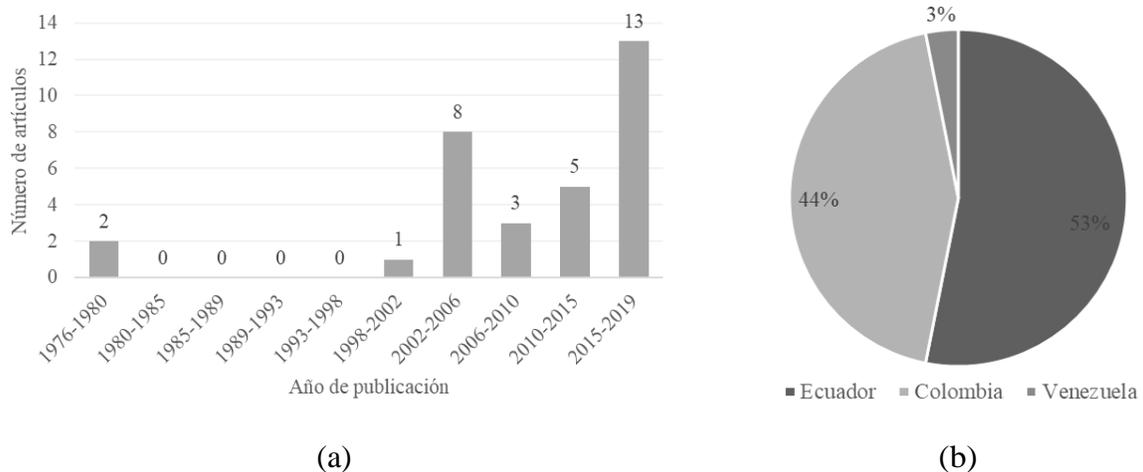
### *Tendencias de investigación y estado actual*

El interés de la comunidad científica sobre las propiedades hidrofísicas del suelo de páramo es creciente después de 1998 (Figura 3Ba), buscando comprender la relación entre las características del suelo y su relación con el agua. Antes del 2000, la publicación sobre este tópico es prácticamente inexistente probablemente debido al poco reconocimiento de los páramos como proveedores y reguladores de agua (Baptiste & Ruggiero, 2011; MMA (Ministerio de Medio Ambiente), 2002). Destaca el incremento de las publicaciones durante el 2015-2019, en el estudio del suelo de páramo.

Durante el proceso de revisión se notó el vacío de estudios que vinculan los servicios hidrológicos y las propiedades hidrofísicas del suelo en el ecosistema de páramo (9 de 32 artículos). La investigación del cambio de uso del suelo se enfocó en: agricultura (48%), pastoreo (41%) y forestación (10%). En la Figura 3Bb se muestra el país en el cual se ejecutó la investigación de los 32 artículos revisados: Ecuador (53%), Colombia (44%) y no especificado (3%).

**Figura 3B.**

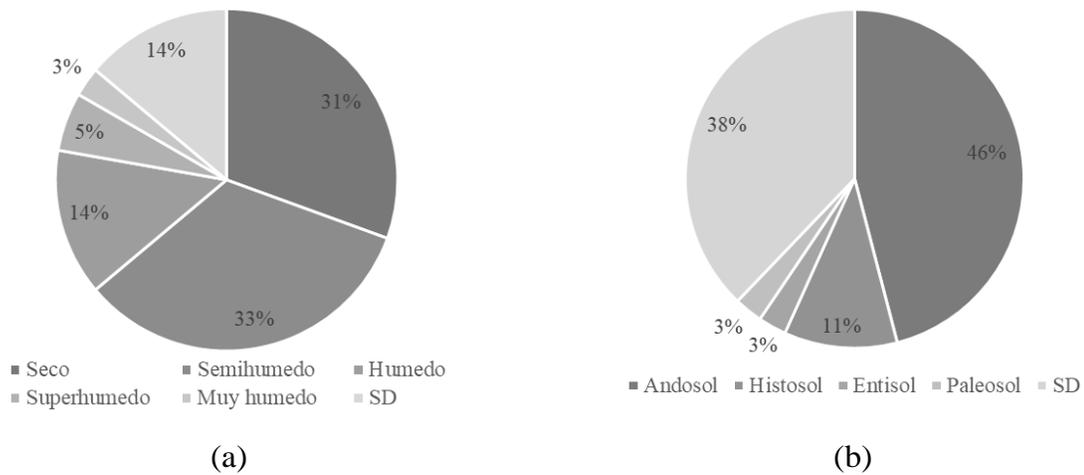
*Distribución de los artículos en la revisión de literatura (n=32); (a) por año y (b) por país.*



La Figura 4Ba muestra la distribución de la literatura por: (a) precipitación promedio anual y (b) principales taxonomías. Casi la mitad de los estudios (46%) fueron llevados a cabo en suelo tipo Andosol, una taxonomía típica en páramo (Wouter Buytaert, Deckers, et al., 2006); el 38% de los estudios no reportaron la taxonomía del suelo. Los sitios de investigación se concentraron en páramo húmedo y semihúmedo (47%), y el 31% de los estudios fueron realizados en páramo seco (Figura 4Ba).

**Figura 4B.**

*Distribución de los artículos en la revisión de literatura (n=32); (a) por taxonomía del suelo y (b) por precipitación promedio anual.*



\*Nota. La clasificación de la Figura 4Ba es basada en Rangel (2000) (Rangel et al., 2000); SD: sin datos.

En la Tabla 3B se presenta un resumen con las principales características de la literatura seleccionada (localización, altitud, precipitación, tipo de muestreo, número de especímenes de suelo, propiedades hidrofísicas y usos del suelo evaluados, análisis estadísticos efectuados y objetivo de investigación). El 53 y 21% de las investigaciones emplearon un muestreo en área y puntual, respectivamente. Se tomaron desde 18 hasta 108 muestras de suelo en la investigación del suelo de páramo.

**Tabla 3B.***Resumen de los artículos seleccionados en la revisión de literatura.*

Sitio de estudio	Coordenadas		Altitud [msnm]	Referencia	Objetivo de estudio	Usos del suelo evaluados	Propiedades hidrofísicas evaluadas	Muestreo			Pruebas estadísticas	
	Latitud	Longitud						Tipo	Profundidad	Estad. o		Muestras
Páramo Sumapaz, CO	3°45'-4°10' N	74°10'-74°30' W	3550	Daza-Torres et al. (2014)	1	VN, A, G	CRH, Da, Pt, MOS	Área	S	Sd	48	Uv
Provincia de Cotopaxi, EC	0°40' S	78°30' W	3400-3500	Farley et al. (2004)	2	VN, F	CRH, Da, CH, COS	Área	S, Sb	Sd	100	Uv
Parque nacional Cajas, EC	2°50' S	79°08' W	3000-4300	Harden (2006)	1	VN, A	CH, Da, MOS	Área	S	Sd	46	—
Páramo Guerrero, CO	5°8' N	73°57' W	3325-3640	Peña-Quemba et al. (2016)	3	VN, A	CH, MOS	Área	S, Sb	Sd	108	Uv, Mv
Pichincha & Provincia de Carchi, EC	0°10' S and 0°37' N	78°36' and 77°56' W	3200-3640	Poulenard et al. (2001)	2	VN, A, G	Pt, CRH, Da, Ks, COS	Área	S, Sb	—	—	—
Cuenca Paute, EC	3°11' S	78°57' W	3000-3300	Buytaert et al. (2002)	1	VN, A	CRH, Da, MOS, CH	Puntual	S, Sb	D, Sd	64	Uv
Páramo Sumapaz, CO	4°19' N	74°12' W	3573-3590	Montes-Pulido et al. (2017)	3	VN, A	Da, MOS, CRH	Área	S, Sb	D, Sd	30	Uv, Ac

Andes de Ecuador, EC	0°46' N-3°40' S	77°51'-79°21' W	300-4000	Hofstede et al. (2002)	1	VN, F	CRH, Da, MOS, CH	Área	S, Sb	Sd	95	Uv, Ac
Cuenca Paute, EC	2°48' S	78°51' W	>3300	Buytaert et al. (2007b)	1	VN, A	CRH, Da, Ks, COS	Transecto	S, Sb	D, Sd	108	Uv
Páramos: Cuenca, Azogues y El Ángel, EC	0°41' N, 2°57' S and 2°38' S	77°54', 79°13' and 78°46' W	3250-3700	Poulenard et al. (2003)	3	VN	Da, CRH, COS, Pt	Área	Sb	Sd	—	—
Páramo Anaima, CO	4°15' N	75°33' W	3200-3750	Andrade Castañeda et al. (2014)	3	VN, G	Da, COS	Área	S, Sb	D, Sd	18	Uv, Ac
Parques Nacional Nevados, CO	4°44' N	75°26' W	3432-3769	Avellaneda-Torres et al. (2018)	1	VN, A, G	CH, Da, COS, MOS	Área and Transecto	S, Sb	Sd	102	Uv
Cuencas: Huagrahuma, Soroche y Queseras, EC	2°15' - 3°00' N	79°00'-78°40' W	3500-4500	Buytaert et al. (2005b)	2	VN, A	CRH, Ks, Da, MOS	Puntual	S	D, Sd	162	Uv
Parque nacional Cayambe-Coca, EC	0°19' S	78°10' W	3950-4250	Comas et al. (2017)	3	VN	Da, COS, MOS	Puntual	S, Sb	Sd	132	—
Estación biológica Guandera, EC	0°35' N	77°39'-77°42' W	3330-3990	Tonneijk et al. (2010)	3	VN	Da, Pt, COS, CRH	Área and Transecto	—	D, Sd	—	Uv, Ac

Páramo Belmira, CO	6°40' N	75°40' W	3200	Urbina and Benavides (2015)	1	VN, G	Da, CH	Área	S, Sb	Sd	27	Uv, Mv
Páramo Paja Blanca, CO	0°59' N	77°37' W	3000	Benavides et al. (2018)	2	VN, A, G	CH, Da, COS, MOS, Ks	Área	S, Sb	D	72	Uv, Ac
Parque nacional Cayambe-Coca, EC	0°04' and 0°33' S	77°50' and 78°09' W	3919-4880	Hribljan et al. (2016)	3	VN, G	Da, COS	Puntual	S, Sb	Sd	53	—
Parque nacional Iguaque, CO	5°41' N	73°25' W	2500 - 3800	Benavides (2015)	3	VN	Da, MOS, CH	Área	S, Sb	Sd	9	Uv
Páramo Quimsacocha, EC	3°05' S	79°30' W	3400-3900	Quichimbo et al. (2012)	1	VN, A, G, F	Da, CRH, Ks, MOS, COS, CE	Área and Transecto	S, Sb	Sd	—	Mv
Parque nacional Nevados, CO	04°46' N	75°24' W	3900	Camargo-García et al. (2012)	1	VN, A	Da, Pt, Ks, CRH, EE, MOS	Área	S, Sb	Sd	48	Uv, Ac
Páramo Macujabí, VE	8°47' N	70°49' W	3500-3750	Azócar and Monasterio (1980)	1	VN	CH	Puntual	S, Sb	—	54	—
Páramo Cruz verde, CO	4°33' N	74°02' W	3300-3400	Schnetter et al. (1976)	2	VN	CRH, COS, CH	Puntual	S, Sb	Sd	72	—
Páramo La Cortadera, CO	05°32' N	73°06' W	3300-3815	Cuervo-Barahona et al. (2016)	3	VN, A, G	COS	Puntual	S, Sb	D, Sd	—	Uv
Huagrahuma and Ningar, EC	2°44' S	78°50' W	3350-3900	Buytaert et al. (2006b)	1	VN	CRH, Ks, MOS, Pt, Da	Puntual	S, Sb	Sd	140	Mv

Provincia Tungurahua, EC	1°15' S	78°37' W	3800- 4200	Podwojewski et al. (2002)	2	VN, G	Da, COS, CH	Área	S, Sb	—	—		
Páramo Santa Inés, CO	06°40' N	75°40' W	3200	Marulanda and Villa (2016)	3	VN	Da, MOS	---	S, Sb	Sd	165	Uv	
Páramos: Berlina, Chingaza and Romerales, CO	04°39' - 06°39' N	73°50' - 75°40' W	3060- 3770	Cárdenas- Agudelo (2016)	2	VN, G	Da, MOS, CRH, Pt	Área	S, Sb	Sd	6	—	
Microcuenca Río Guandoque y Tausa, CO	5°12' N	74°00' W	—	Lis (2015)	3	VN, A, G	COS, MOS, Da, CH	Área and Transecto	S, Sb	Sd	225	—	
Reserva ecologica Antisana, EC	0°30' S	78°11' W	4010- 5300	Minaya et al. (2018)	2	VN	COS	Área	S, Sb	Sd	100	Uv	
Andes Ecuador, EC	2°57'- 2°58' N	78°58'- 79°00' W	3032- 3035	Chacón et al. (2009)	1	VN, F	COS, MOS	Área	S	—	117	Uv, Mv	
Observatorio Zhuruca, EC	3°03' S	79°13' W	3400- 3900	Lazo et al. (2019)	2	VN	CRH	Área and Transecto	S, Sb	D, Sd	68	Uv, Mv	

\*Nota. msnm: metros sobre el nivel del mar; S: superficial; Sb: subsuperficial; Uv: univariado; Mv: multivariado; Ac: análisis de correlación; D: disturbada; Sd: sin disturbar; VN: vegetación natural; A: agricultura; G: Pastoreo; F: forestación. 1: Evaluación de las propiedades hidrofísicas como resultado del cambio de uso del suelo; 2: Comparar el estado de los servicios hidrológicos provistos por páramo natural frente a usos antrópicos (i.e. A, F y G); 3: estudiar el almacenamiento de carbono en el suelo; CH: contenido de humedad; COS: carbono orgánico del suelo; MOS: materia orgánica del suelo; Ks: conductividad hidráulica saturada; Da: densidad aparente; CRH: capacidad de retención de humedad; Pt: porosidad total; CE: conductividad eléctrica; EE: estabilidad estructural.

**Anexo C**

*Reporte de las principales propiedades hidrofísicas del suelo de páramo natural.*

<i>Localización</i>	<i>Altitud</i>	<i>Referencia</i>	<i>Precipitación</i>	<i>Densidad aparente</i>	<i>Materia orgánica del suelo</i>	<i>CRH (33 kPa)</i>	<i>CRH (1500 kPa)</i>
	msnm	-	mm/año	g/cm <sup>3</sup>	%	g/g	g/g
<i>Cuenca Paute, EC</i>	3600	Buytaert et al. (2002)	800–1300	0.23–0.95	14–44	–	0.29–2.26
<i>Machangara, EC</i>	3700	Buytaert (2004)	1100	0.13–0.27	18–34	–	1.31–2.39
<i>Ningar, EC</i>	3400	Buytaert et al. (2006)	950	0.15–0.93	4–27	–	0.26–1.78
<i>Cuenca Jima, EC</i>	3100	Buytaert et al. (2002)	1000	0.58–0.67	2–14	–	0.36–0.78
<i>Chimborazo, EC</i>	3500	Podwojewski et al. (2002)	>900	0.68	7–10	0.7–0.8	–
<i>Chimborazo, EC</i>	3500	Poulenard et al. (2003)	<600	0.74–0.93	5–7	0.3	–
<i>Chimborazo, EC</i>	3500	Podwojewski et al. (2002)	>900	0.11–0.36	12–42	1.5–4.0	–
<i>Azogues, EC</i>	3250	Poulenard et al. (2003)	1860	0.42–0.90	4–18	–	1.30–1.42
<i>Cuenca, EC</i>	3700	Poulenard et al. (2003)	1270	0.35–0.40	19–23	–	1.15–2.20
<i>Pichincha, EC</i>	4000	Poulenard et al. (2001)	1500–2000	0.7–0.9	3–13	–	0.27–0.52
<i>El Ángel, EC</i>	3600	Poulenard et al. (2001)	1150	0.4–0.6	9–21	–	0.59–0.97
<i>Cotacachi, EC</i>	4050	Zehetner et al. (2003)	1500		4–10	–	–
<i>Piedras Blancas, VE</i>	4400	Perez (1984)	800	0.59–1.07	1–5	0.09–0.50	–
<i>Sierra Nevada, CO</i>	3920	Rangel (2000)	–	1.4	1	0.12	0.06
<i>Sierra Nevada, CO</i>	3460	Rangel (2000)	–	0.91	5	0.43	0.23
<i>Cordillera Oriental, CO</i>	3650	Rangel (2000)	–	0.72	9	0.73	0.52
<i>Cordillera Oriental, CO</i>	3260	Rangel (2000)	–	0.65	21	1.25	0.43
<i>Cordillera Central, CO</i>	3090	Rangel (2000)	–	0.96	7	0.45	0.32
<i>Cordillera Central, CO</i>	3520	Rangel (2000)	–	0.71	18	0.64	0.48
<i>Sumapaz, CO</i>	3600	Daza-Torres et al. (2014)	–	0.7	18	0.81	0.48

<i>Localización</i>	<i>Altitud</i>	<i>Referencia</i>	<i>Precipitación</i>	<i>Densidad aparente</i>	<i>Materia orgánica del suelo</i>	<i>CRH (33 kPa)</i>	<i>CRH (1500 kPa)</i>
	msnm	--	mm/año	g/cm <sup>3</sup>	%	g/g	g/g
<i>Chingaza, CO</i>	3060	Cárdenas-Agudelo (2016)	3500	0.33-0.40	26-34	0.56-0.59	0.28-0.30
<i>Romerales, CO</i>	3770	Cárdenas-Agudelo (2016)	1200	0.59-0.61	11-17	0.56	0.28
<i>Belmira, CO</i>	3089	Cárdenas-Agudelo (2016)	1850	0.56-0.70	10-27	0.61	0.26
<i>Cordillera Oriental, EC</i>	3700	Buytaert et al. (2007)	–	0.37	13-22	–	1.03-1.28
<i>Cordillera Oriental, EC</i>	3550	Buytaert et al. (2007)	–	0.3	16-29	–	1.24-1.80
<i>Cordillera Oriental, EC</i>	3580	Buytaert et al. (2007)	–	0.23-0.29	32-36	–	1.69-2.26
<i>Cordillera Oriental, EC</i>	3660	Buytaert et al. (2007)	–	0.47-0.58	11-14	–	0.36-0.95
<i>Cordillera Oriental, EC</i>	3630	Buytaert et al. (2007)	–	0.46-0.55	11-13	–	0.84-1.03
<i>Cordillera Central, EC</i>	3400	Buytaert et al. (2007)	–	0.31-0.55	26-33	–	1.27-1.68
<i>Cordillera Central, EC</i>	3350	Buytaert et al. (2007)	–	0.42-0.60	4-10	–	0.45-0.71
<i>Cordillera Central, EC</i>	3250	Buytaert et al. (2007)	–	0.28-0.36	18-27	–	1.03-1.27
<i>Cordillera Central, EC</i>	3350	Buytaert et al. (2007)	–	0.34-0.61	08-17	–	0.30-0.97
<i>Machangara, EC</i>	3600	Buytaert et al. (2007)	–	0.3	29-44	–	1.63-1.96
<i>Machangara, EC</i>	3800	Buytaert et al. (2007)	–	0.23-0.25	34	–	2.09-2.28
<i>Machangara, EC</i>	3915	Buytaert et al. (2007)	–	0.25-0.28	32-34	–	1.32-2.40
<i>Machangara, EC</i>	3790	Buytaert et al. (2007)	–	0.16-0.23	29-38	–	1.80-2.30
<i>Machangara, EC</i>	3645	Buytaert et al. (2007)	–	0.13-0.19	17-36	–	1.34-1.66
<i>Zhurucay, EC</i>	3400-3900	Quichimbo et al. (2012)	900-1600	0.11	28.07	0.86	0.15
<i>Zhurucay, EC</i>	3400-3900	Quichimbo et al. (2012)		0.62	11.08	0.63	0.41

<i>Localización</i>	<i>Altitud</i>	<i>Referencia</i>	<i>Precipitación</i>	<i>Densidad aparente</i>	<i>Materia orgánica del suelo</i>	<i>CRH (33 kPa)</i>	<i>CRH (1500 kPa)</i>
	msnm	-	mm/año	g/cm <sup>3</sup>	%	g/g	g/g
<i>Zhurucay, EC</i>	3400-3900	Quichimbo et al. (2012)	900-1600	0.43	17.06	0.77	0.43
<i>Zhurucay, EC</i>	3400-3900	Quichimbo et al. (2012)		0.43	16.96	0.77	0.38
<i>Cotopaxi province, EC</i>	3400-3500	Farley et al. (2004)	1130	0.6-1.1	-	31	24
<i>Cajas national park, EC</i>	3000-4300	Harden (2006)	-	0.05-1.08	29-57	-	-
<i>Guerrero páramo, CO</i>	3325-3640	Peña-Quemba et al. (2016)	865-1107	-	21-39	-	-
<i>Sumapaz páramo, CO</i>	3573-3590	Montes-Pulido et al. (2017)	-	0.28-0.26	24-27	64-68	49-53
<i>Ecuadorian Andes, EC</i>	3000-4000	Hofstede et al. (2002)	500-3000	0.56-0.69	20-24	-	-
<i>Anaime páramo, CO</i>	3200-3750	Andrade Castañeda et al. (2014)	2141	0.24-0.71	-	-	-
<i>Nevados national park, CO</i>	3432-3769	Avellaneda-Torres et al. (2018)	1000-4000	0.7	9.4	-	-
<i>Huagrahuma, Soroche &amp; Queseras, EC</i>	3500-4500	Buytaert et al. (2005)	1200-1600	-	-	74-82	38-69
<i>Parque nacional Cayambe-Coca, EC</i>	3950-4250	Comas et al. (2017)	-	0.10-0.25	-	-	-
<i>Guandera biological station, EC</i>	3330-3990	Tonneijck et al. (2010)	1900	0.10-0.69	-	52-57	20-25
<i>Belmira páramo, CO</i>	3200	Urbina and Benavides (2015)	1990	0.028	-	-	-
<i>Paja Blanca páramo, CO</i>	3000	Benavides et al. (2018)	1250	0.45-71	15-23	-	-
<i>Parque nacional Cayambe-Coca, EC</i>	3919-4880	Hribljan et al. (2016)	1066-1401	0.16-0.91	-	-	-
<i>Parque nacional Iguaque, CO</i>	2500 - 3800	Benavides (2015)	1015	0.01-0.05	60-95	-	-
<i>Parque nacional Nevados, CO</i>	3900	Camargo-García et al. (2012)	1096	0.11-0.63	11-43	-	36-64

<i>Localización</i>	<i>Altitud</i>	<i>Referencia</i>	<i>Precipitación</i>	<i>Densidad aparente</i>	<i>Materia orgánica del suelo</i>	<i>CRH (33 kPa)</i>	<i>CRH (1500 kPa)</i>
	msnm	-	mm/año	g/cm <sup>3</sup>	%	g/g	g/g
<i>Macujabí páramo, VE</i>	3500-3750	Azócar and Monasterio (1980)	930	-	-	14-56	14-41
<i>Santa Inés páramo, CO</i>	3200	Marulanda and Villa (2016)	-	0.07-0.26	60-91	-	-
<i>Río Guandoque &amp; Tausa, CO</i>	-	Lis (2015)	865-1107	0.3-0.81	07-45	-	-
<i>Observatorio ecohidrológico Zhurucay, EC</i>	3400-3900	Lazo et al. (2019)	1345	-	-	62-67	-

\*Nota. msnm: metros sobre el nivel del mar; EC: Ecuador; CO: Colombia; VE: Venezuela; CRH: capacidad de retención de humedad.

*Adaptado de:* Buytaert et al. (2006).

**Anexo D**

*Fechas de extracción de especímenes de suelo para ensayo de capacidad de retención de humedad.*

**Tabla D1.**

*Recolección de espécimen de suelo para ensayo de CRH.*

<i>Unidad de muestreo</i>	<i>Número del muestreo</i>									
	<i>Ronda 1</i>					<i>Ronda 2</i>				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Natural de baja pendiente</i>	x					x				
<i>Natural de alta pendiente</i>	x					x				
<i>Arbustivo denso</i>			x					x		
<i>Barbecho</i>			x					x		
<i>Cultivo de cebolla</i>					x					x
<i>Cultivo de papa</i>					x					x

\*Nota. X: recolección de espécimen de suelo.

**Tabla D2.**

*Fecha de muestreo del suelo.*

<i>No. Muestreo</i>	<i>Fecha</i>
1	01/09/2019
2	21/09/2019
3	11/10/2019
4	30/10/2019
5	23/11/2019
6	12/12/2019
7	11/01/2020
8	25/01/2020
9	22/02/2020
10	07/03/2020

**Anexo E**

Formato de identificación de las unidades de muestreo potenciales.

Recorrido No. \_\_\_\_\_

Unidad hidrográfica: Intervenida ( ) Control ( )

Descripción general:

¿Cuál es el uso dominante observado?	Natural <input type="checkbox"/> Papa <input type="checkbox"/> Cebolla <input type="checkbox"/> Vegetación Arbustiva <input type="checkbox"/> Barbecho <input type="checkbox"/> Pastos limpios <input type="checkbox"/> Bosque introducido <input type="checkbox"/> Otro ¿cuál? _____
¿Se observan zonas sin vegetación (suelo desnudo)?	Densas <input type="checkbox"/> Dispersas <input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Observaciones:
¿Se observan formaciones boscosas?	Densas <input type="checkbox"/> Dispersas <input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Observaciones:
¿Se observa vegetación arbustiva?	Densas <input type="checkbox"/> Dispersas <input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Observaciones:
¿Se observan parches de pastos?	Densos <input type="checkbox"/> Dispersos <input type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Observaciones:
¿Se observan otras intervenciones antrópicas?	Vivienda <input type="checkbox"/> Caminos <input type="checkbox"/> Vías <input type="checkbox"/> Otro ¿cuál? _____
¿Se observan prácticas de preparación del suelo?	Arado (Manual <input type="checkbox"/> Tracción animal <input type="checkbox"/> Maquinaria <input type="checkbox"/> Quema <input type="checkbox"/> Aplicación cal <input type="checkbox"/> Abono orgánico <input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Otro ¿cuál? _____
¿Se observan afloramientos rocosos?	Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Observaciones:
¿Cómo describiría la apariencia de la estructura del suelo superficial?	Abierta y porosa <input type="checkbox"/> Moderadamente compactada <input type="checkbox"/> Cerrada y compactada <input type="checkbox"/> Observaciones:
¿Cómo describe el estado de humedad del suelo superficial?	Muy Húmedo <input type="checkbox"/> Húmedo <input type="checkbox"/> Seco <input type="checkbox"/> Muy seco <input type="checkbox"/> Observaciones:

¿Cómo describe la consistencia del suelo en seco?	Suelta <input type="checkbox"/> Frágil <input type="checkbox"/> Firme <input type="checkbox"/> Extremadamente firme <input type="checkbox"/> Observaciones: _____
¿Qué color presenta el suelo?	Negro <input type="checkbox"/> Pardo <input type="checkbox"/> Amarillo <input type="checkbox"/> Gris <input type="checkbox"/> Observaciones: _____
¿Cuál es la pendiente aproximada del terreno?	Horizontal: _____ (m) Vertical: _____ (m) Pendiente: _____ %

*Si se presenta cultivo:*

¿Cuál es el sentido de los surcos del cultivo?	En el sentido de la pendiente <input type="checkbox"/> Transversal a la pendiente <input type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? _____
¿Las parcelas tienen riego?	Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Observaciones: _____
¿Se observa material particulado arrastrado por escorrentía?	Bastante <input type="checkbox"/> Moderado <input type="checkbox"/> Poco <input type="checkbox"/> Muy poco <input type="checkbox"/> Nada <input type="checkbox"/> Observaciones: _____
¿Se observan áreas en descanso (rotación de cultivo)?	Densas <input type="checkbox"/> Dispersas <input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Observaciones: _____

*Si se presenta ganadería:*

¿Cuántas cabezas de ganado se encuentran en la zona?	Un número de _____ Observaciones: _____
¿La zona se encuentra parcelada?	Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> ¿Cuántas parcelas? _____
¿Se observan signos de quema?	Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Observaciones: _____

\* En dado caso de presentarse uso de ganadería, mediante el dispositivo GPS o celular con aplicativo señalar los límites de la parcela donde se encuentran los bovinos. Adaptado de: FAO, (2018)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *Guía para la encuesta agrícola integrada*. Roma, Italia.

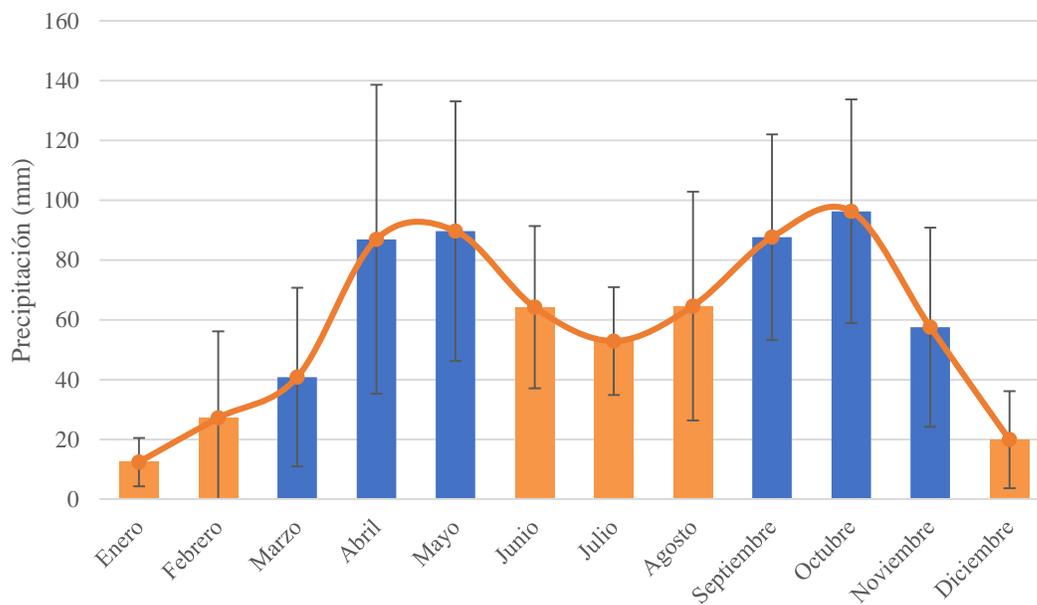
**Anexo F.**

*Determinación del régimen de lluvia en el área de estudio.*

En la gráfica a continuación se presenta la precipitación total mensual multianual, en base a la cual se realizó la separación del régimen de lluvia.

**Figura 1B**

*Precipitación total mensual multianual (1973-2018)*



\*Nota. ■: período de alta precipitación; ■: período de baja precipitación; —: desviación estándar.

**Anexo G.**

*Localización de los puntos de caracterización inicial del uso del suelo.*

<i>Unidad hidrográfica intervenida</i>				<i>Unidad hidrográfica control</i>			
<b>Punto</b>	<b>Coordenadas</b>		<b>Elevación (m)</b>	<b>Punto</b>	<b>Coordenadas</b>		<b>Elevación (m)</b>
	<i>N</i>	<i>O</i>			<i>N</i>	<i>O</i>	
PR1	7°06'02''	72°56'27''	3628	PR1	7°06'15''	72°56'24''	3588
PM2	7°06'06''	72°56'24''	3624	PR2	7°06'12''	72°56'26''	3594
PR2	7°06'10''	72°56'27''	3592	PM1	7°06'13''	72°56'28''	3570
PM1	7°06'05''	72°56'29''	3597	PR3	7°06'14''	72°56'28''	3559
PR3	7°06'06''	72°56'32''	3563	PM2	7°06'16''	72°56'29''	3533
PR4	7°06'10''	72°56'30''	3561	PR4	7°06'19''	72°56'27''	3523
PM3	7°06'09''	72°56'31''	3543	PM4	7°06'19''	72°56'31''	3504
PR5	7°06'08''	72°56'35''	3526	PM3	7°06'21''	72°56'30''	3495
PR6	7°06'11''	72°56'33''	3530	PRE	7°06'20''	72°56'32''	3490
PR7	7°06'11''	72°56'34''	3517	PR5	7°06'17''	72°56'36''	3473
PM4	7°06'11''	72°56'37''	3499	PM5	7°06'22''	72°56'33''	3473
PR8	7°06'14''	72°56'35''	3508	PM6	7°06'21''	72°56'36''	3461
PR9	7°06'11''	72°56'39''	3487	PR6	7°06'24''	72°56'39''	3456
PM5	7°06'14''	72°56'39''	3478	PR7	7°06'22''	72°56'39''	3438
PR10	7°06'15''	72°56'41''	3468	PM7	7°06'25''	72°56'38''	3434
PM6	7°06'18''	72°56'40''	3456	PR8	7°06'26''	72°56'39''	3427
PR11	7°06'19''	72°56'42''	3447				
PM7	7°06'22''	72°56'42''	3436				

*\*Nota. PR: punto de referencia; PM: punto de referencia representativo.*



Pardo  
claro

\*Nota. PR: punto de referencia; PM: punto de monitoreo; Mod: moderadamente.

**Tabla 2G.**

*Características de la unidad hidrográfica control.*

		<i>UH control</i>																
		<i>PR</i>	<i>PR</i>	<i>P</i>	<i>PR</i>	<i>P</i>	<i>PR</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>PR</i>	<i>PR</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>PR</i>	<i>PR</i>	<i>P</i>	<i>PR</i>	
<i>Punto</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>M1</i>	<i>3</i>	<i>M2</i>	<i>4</i>	<i>M4</i>	<i>M3</i>	<i>E</i>	<i>5</i>	<i>M5</i>	<i>M6</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>M7</i>	<i>8</i>	
<i>Tipo de cobertura encontrada</i>	Pajonal	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Frailejones	x	x															
	Arbustiva	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		
	Arbustiva densa							x		x	x							
	Barbecho								x					x			x	
	Cebolla																	
	Papa																	
	Arado																	
	<i>Pendiente (%)</i>	0-5																
5-15														x	x	x	x	
15-25		x	x						x	x		x	x					
25-50						x	x			x								
50-75				x	x													
75-100																		
<i>Estado de humedad</i>	Muy húmedo							x		x		x						
	Húmedo	x	x	x	x	x	x		x		x		x	x	x	x	x	
	Mod. seco																	
	Seco																	
<i>Consistencia</i>	Friable	x	x	x	x			x		x		x	x					
	Mod. Firme					x	x		x		x			x	x	x		
	Firme																x	
	Muy firme																	
<i>Color</i>	Negro	x	x					x		x		x						
	Pardo oscuro			x	x	x	x		x		x		x	x	x	x	x	
	Pardo																	
	Pardo claro																	

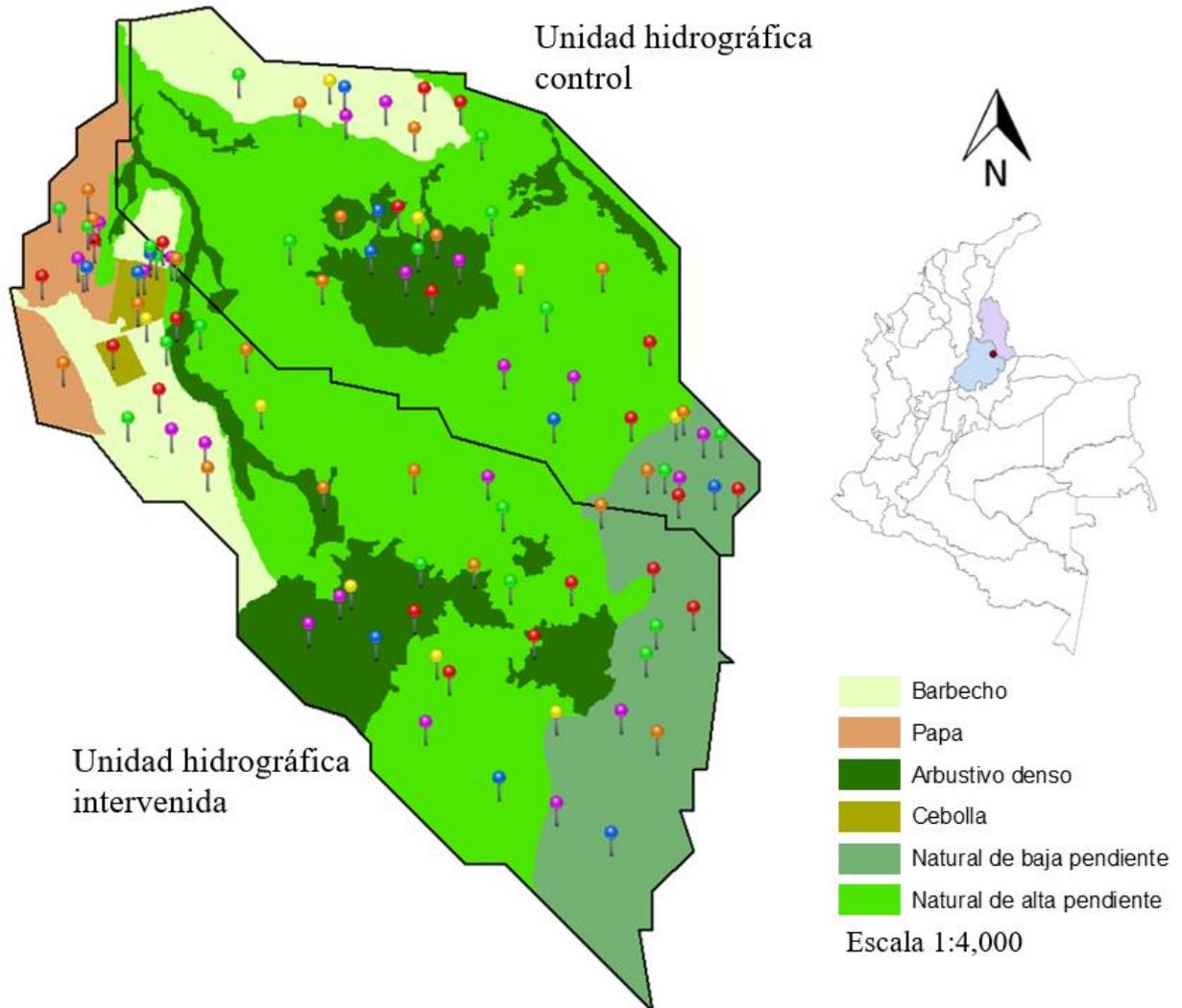
\*Nota. PR: punto de referencia; PM: punto de monitoreo; Mod: moderadamente.

**Anexo I.***Características organolépticas de la textura del suelo en el área de estudio.*

- Franco arenoso: los granos individuales de arena pueden verse y sentirse con facilidad; con poca humedad el suelo se amolda cuando se presiona, pero se desmorona con facilidad; en condiciones húmedas se forma una moldura que resiste al manipuleo suave sin romperse. Por otro lado, se caracteriza por ser frágil y susceptible a la alteración mecánica (e.g. fácil compactación en capas superficiales). Posee una alta aireación que promueve la mineralización de la materia orgánica (Montenegro Gonzalez et al., 1990).
  
- Franco arcilloso: es un suelo de textura fina que tiende a formar costras cuando está seco, así mismo, es fácilmente disgregable; en condiciones húmedas es plástico y forma, al apretarlo con la mano, una moldura que resiste bastante el manipuleo sin desmoronarse. De otro lado, esta clase textural posee una mayor actividad microbiana que puede acelerar la descomposición de los residuos vegetales (Cañón-Cortázar, Roger Guillermo; Avellaneda-Torres, Lizeth Manuela; Torres-Rojas, 2012).

**Anexo J**

*Ubicación espacial de los puntos de muestreo del suelo.*



\*Nota. Sistema de referencia espacial MAGNA Bogotá Colombia.