

Análisis de factores que influyen en la contaminación difusa por nutrientes de origen agrícola en una unidad hidrográfica del páramo de Berlín (Santander Colombia).

Mayra Juliana Afanador Durán & Luis Gabriel Buitrago Pinzón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero (a) Civil

Director

Daniela Cristina Rey

MSc en Desarrollo de recursos, aguas y Tierras

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo

Ingeniero Sanitario, MSc., PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos.....	12
1.1 Objetivo general.....	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Cuerpo del trabajo.....	13
2.1 Marco teórico	13
3. Metodología	16
3.1 Revisión de bibliografía.....	16
3.1.1 Filtro por título.....	18
3.1.2 Filtro por resumen.....	18
3.1.3 Filtro por contenido.....	18
3.2. Caracterización de la práctica agrícola	20
3.3. Análisis de las condiciones ambientales	20
3.3.1. Pendientes	20
3.3.2. Precipitación y calidad del agua	20
3.3.3. Propiedades hidrofísicas y cobertura vegetal.....	21
4. Descripción de la zona de estudio.....	22
5. Resultados	24

5.1 Aspectos generales de las investigaciones sobre mecanismos de transporte de nutrientes	24
5.2 Caracterización de la práctica agrícola	26
5.3 Pendientes	27
5.4 Calidad del agua y precipitación.....	30
5.4.1 Potencial de hidrógeno (pH).....	32
5.4.2 Conductividad eléctrica	33
5.4.3 Nitrógeno total	35
5.4.4 Nitrógeno orgánico	36
5.4.5 Nitrógeno amoniacal.....	37
5.4.6 Nitritos.	38
5.4.7 Nitratos.....	39
5.4.8 Fósforo reactivo soluble.....	40
5.4.9 Fósforo total	41
5.4.10 Sólidos disueltos totales (SDT).....	42
5.4.11 Sólidos suspendidos totales.....	43
5.4.12 Sólidos totales	44
5.5 Propiedades hidrofísicas del suelo y cobertura vegetal	45
5.5.1 Materia orgánica	51
5.5.2 Potencial de hidrogeno (pH).....	51
5.5.3 Densidad aparente	52

5.5.4 Porosidad total	54
5.5.5 Humedad	55
5.6.6 Textura	56
6. Conclusiones	57
Referencias Bibliográfica.....	60
Apéndices.....	69

Lista de Tablas

Tablas 1. Resumen resultados estadísticos calidad del agua.	32
Tablas 2. Resumen resultados propiedades hidrofísicas	50

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de filtros de la revisión bibliográfica	19
Figura 2. Valores promedio de caudal	23
Figura 3. Frecuencia de artículos por intervalos de años.....	24
Figura 4. Mapa de Pendientes.....	29
Figura 5. Valores promedio de pH.....	33
Figura 6. Valores promedio de Conductividad eléctrica.	35
Figura 7. Valores promedio de Nitrógeno total.	36
Figura 8. Valores promedio de Nitrógeno orgánico	37
Figura 9. Valores promedio de Nitrógeno amoniacal.....	38
Figura 10. Valores promedio de Nitritos.	39
Figura 11. Valores promedio de Nitratos.....	40
Figura 12. Valores promedio de P reactivo soluble	41
Figura 13. Valores promedio de P total	42
Figura 14. Valores promedio de Sólidos disueltos totales.....	43
Figura 15. Valores promedio de Sólidos suspendidos totales	44
Figura 16. Valores promedio de Sólidos totales	45

Lista de Apéndices

Apéndice A. Mapa de localización de la zona de estudio	69
Apéndice B. Cuadro de las condiciones ambientales estudiadas, con su respectiva combinación de palabras claves y los resultados de cada filtro	70
Apéndice C. Cuadro con información general de los 15 artículos científicos seleccionados.....	71
Apéndice D. Cuadro con información del estudio realizado en los 15 artículos científicos seleccionados.	73
Apéndice E. Caracterización de la práctica agrícola.....	75
Apéndice EA. Descripción de las prácticas agrícolas según calendario y cultivo.....	75
Apéndice EB. Caracterización de los agroquímicos empleados.....	76
Apéndice F. Resultados de las pruebas estadísticas realizadas para los datos obtenidos en las campañas de muestreo de cada componente de calidad del agua.	77
Apéndice G. Contraste de las propiedades hidrofísicas en las profundidades A: 0-5, B: 10-15, C: 20-25 cm	87
Apéndice H. Mapa de clasificación de usos de suelo y cobertura vegetal.....	90

Resumen

Título: Análisis de factores que influyen en la contaminación difusa por nutrientes de origen agrícola en una unidad hidrográfica del páramo de Berlín (Santander Colombia) *

Autor: Mayra Juliana Afanador Durán, Luis Gabriel Buitrago Pinzón **

Palabras Clave: Calidad del agua, Cobertura vegetal, Erosión, Nutrientes, Pendiente, Precipitación, Propiedades hidrofísicas, Transporte superficial y subsuperficial.

Descripción: Los ecosistemas de páramo son considerados importantes reguladores hídricos, además debido a sus características ambientales se desarrollan ciertos cultivos, los cuales para su viabilidad requieren el uso de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, dichos nutrientes pueden llegar a los cuerpos hídricos por medio de diversos mecanismos de transporte, originando un exceso de estos en el agua, promoviendo procesos de eutrofización, entre otros impactos ambientales. Debido a ello, en este trabajo de grado se analizaron las condiciones ambientales que favorecen el transporte de nutrientes en dos unidades hidrográficas, ubicadas en el páramo de Berlín, Santander, Colombia, cuya única diferencia son las actividades antrópicas realizadas en una de ellas. Para ello, se realizó una caracterización de la práctica agrícola determinando la dosis de nutrientes adicionados al suelo por este medio, métodos de preparación del suelo y frecuencias de riego; posteriormente, se desarrolló el análisis de las condiciones ambientales: pendientes, precipitación, calidad del agua, propiedades hidrofísicas y cobertura vegetal, utilizando datos obtenidos en estudios previos realizados en la zona y contrastándolos con los resultados de una revisión de literatura. Se encontró que la temporada de lluvia fomenta el transporte de N total, N orgánico y nitritos, a diferencia de las formas de fósforo las cuales no presentaron diferencias significativas entre épocas de precipitación, aunque si entre nacimientos y cierres de unidades hidrográficas. Finalmente, se encontró que la cobertura más susceptible a pérdidas de nutrientes es la zona de cultivos por su alto contenido de arcillas, bajo porcentaje de humedad, alta densidad aparente y por ser la zona de aplicación de agroquímicos.

* Trabajo de Grado

**** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Daniela Cristina Rey, Doctora en Ingeniería Química. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo, Doctor en Ingeniería

Abstract

Title: Analysis of factors influencing diffuse nutrient pollution from agricultural sources in a hydrographic unit of the Berlin páramo (Santander Colombia) *

Author: Mayra Juliana Afanador Durán, Luis Gabriel Buitrago Pinzón **

Key Words: Water quality, Vegetation cover, Erosion, Nutrients, Slope, Precipitation, Hydrophysical properties, Surface and subsurface transport

Description: The paramo ecosystems are considered important water regulators, in addition, due to their environmental characteristics, certain crops are developed, which for their viability require the use of nitrogen and phosphate fertilizers, these nutrients can reach the water bodies through various transport mechanisms, causing an excess of these in the water, promoting eutrophication processes, among other environmental impacts. Due to this, this work analyzed the environmental conditions that favor the transport of nutrients in two hydrographic units, located in the Berlin páramo, Santander, Colombia, whose only difference is the anthropic activities carried out in one of them. For this, a characterization of the agricultural practice was carried out, determining the dose of nutrients added to the soil by this means, soil preparation methods and irrigation frequencies. Subsequently, the analysis of environmental conditions was developed: slopes, precipitation, water quality, hydrophysical properties and vegetation cover, using data obtained in previous studies carried out in the area and contrasting them with the results of a literature review. It was found that the rainy season promotes the transport of total N, organic N and nitrites, unlike the forms of phosphorus which did not present significant differences regarding rainfall regime although they were different comparing upstream and downstream concentrations within hydrographic units. Finally, it was found that the coverage most susceptible to nutrient losses was the area under crops due to its high content of clays, low water content, high bulk density and because it is the area of application of agrochemicals.

* Degree Work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Advisor: Daniela Cristina Rey. MSc in Development of Water and Land Resources. Edgar Ricardo Oviedo, Sanitary Engineer, MSc., PhD.

Introducción

El nitrógeno y el fósforo son nutrientes esenciales para el desarrollo de diversas formas de vida. En el sector agrícola la presencia de estos elementos en el suelo determina de manera directa el tamaño de las plantas y su cantidad de frutos. Por esta razón, el uso de fertilizantes compuestos de nitrógeno y fósforo es una de las prácticas globalmente adoptadas por los agricultores para incrementar el rendimiento de las cosechas (Celikkol & Guven, 2017).

El exceso de nutrientes en cuerpos hídricos contribuye a acelerar el proceso de eutrofización, caracterizado por el crecimiento excesivo de algas y el agotamiento del oxígeno disuelto en la masa de agua, produciendo la muerte de todo organismo aeróbico que habite en ella y deteriorando la calidad del agua (Sagasta, Zadeh & Turrall, 2018). A nivel mundial, el uso generalizado de fertilizantes en los cultivos ha generado que importantes cantidades de nitrógeno y fósforo no continúen en su respectivo ciclo biogeoquímico en el suelo y terminen en los cuerpos de agua a través de diferentes mecanismos de transporte (Celikkol & Guven, 2017).

El ecosistema de páramo actúa como regulador hídrico. En épocas de lluvias escasas el páramo continúa escurriendo paulatinamente el agua absorbida en la época húmeda y así las fuentes de agua superficial pueden mantener una gran parte de su caudal, de ahí la importancia de la preservación del ecosistema y la calidad del agua presente en él (Rincón, 2015). El Páramo de Berlín ubicado en el departamento de Santander, Colombia, es habitado en su mayoría por agricultores dedicados al cultivo de cebolla junca (*Allium fistulosum*) y papa (*Solanum tuberosum*) debido a las condiciones climáticas presentes en el sector que promueven el crecimiento de estos cultivos. Sin embargo, estas actividades ocasionan diversos efectos

negativos en la calidad del agua debido al uso de fertilizantes, pesticidas, cambios en el uso del suelo y en la cobertura vegetal (Gómez & Quintero, 2020).

En estudios previos realizados en esta zona (Apéndice A) por el grupo de investigación Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander, se encontró una alteración de la calidad del agua originada por la carga de nutrientes conforme el cauce atraviesa los campos agrícolas, generando un alto riesgo de eutrofización (Gómez & Quintero, 2020). Y se analizó la configuración del suelo discretizando por tipos de cobertura vegetal (Godoy & Medina, 2019). En este trabajo de grado se caracterizó la práctica agrícola y se determinaron las condiciones ambientales de la unidad hidrográfica (UH) que pueden influir en mayor medida en el aporte de nutrientes al agua superficial, mediante el contraste de los datos obtenidos en los estudios previos con los resultados de la revisión de literatura enfocada en las condiciones ambientales y los mecanismos de transporte. Los resultados de este trabajo facilitarán la formulación de estrategias de gestión que contribuyan a mitigar o reducir la contaminación difusa en armonía con los medios de sustento de las comunidades del Páramo de Berlín.

Este proyecto de grado se enmarca en el proyecto de investigación “Análisis Participativo de la Influencia del Uso del Suelo en los Servicios Hidrológicos de Suministro y Regulación Ofertados por el Ecosistema de Páramo Seco. Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander – Colombia)” que actualmente desarrolla el Grupo de Investigación GPH.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar los factores que influyen en la contaminación difusa por nutrientes de origen agrícola en una unidad hidrográfica del páramo de Berlín.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la práctica agrícola en la unidad hidrográfica objeto de estudio.
- Determinar las condiciones ambientales de la unidad hidrográfica que influyen en el aporte de nutrientes al agua superficial en la unidad hidrográfica.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Teórico

Los principales mecanismos de transporte de nutrientes desde suelos agrícolas hacia cuerpos de agua son: i) la precipitación directa sobre el cauce; ii) el transporte terrestre o cercano a la superficie que incluye la escorrentía superficial, el flujo terrestre y la erosión; iii) el transporte subsuperficial a través de la zona no saturada del suelo; y iv) el flujo profundo de acuíferos que descargan en aguas superficiales (Rickert, Chorus & Schmoll, 2016). Los mecanismos predominantes varían dependiendo de las condiciones de la cuenca, por ejemplo, el tipo de cobertura vegetal puede disminuir hasta en un 40% la escorrentía en comparación al suelo desnudo (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004) o la cantidad e intensidad de la precipitación que puede incidir en la concentración de nutrientes (Flores, et al. 2011). Por tal motivo, no se pueden generalizar los principales mecanismos de transporte, debido a que varían según las condiciones de la cuenca.

Estudios realizados en la última década han encontrado que la erosión y escorrentía son procesos relevantes en la contaminación por nutrientes (Briones, Ella & Bantayan, 2016; Andrade, Kappas & Erasmi, 2010), ya que, sumado a diversos factores, estos procesos actúan como mecanismos de transporte hasta los cuerpos de agua. A continuación, se presentan diferentes metodologías que se han adoptado para el estudio de dichos mecanismos de transporte, cuyo análisis permitió identificar las condiciones ambientales que pueden condicionar el aporte de nutrientes al agua superficial en el área de estudio.

La ecuación universal de la pérdida del suelo (USLE por sus siglas en inglés) o su modelo revisado (RUSLE por sus siglas en inglés), son modelos diseñados para predecir la cantidad de suelo perdido por escurrimiento en áreas específicas bajo determinados sistemas de manejo y cultivos (Wischmeier & Smith, 1978). Esta ecuación se ha utilizado ampliamente en todo el mundo ya que es una herramienta relativamente sencilla que permite determinar la pérdida de suelo en una cuenca (Kinnell, 2016) considerando los efectos de la erosividad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo, la longitud y pendiente del terreno, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación (Wischmeier & Smith, 1978).

Por otra parte, el Número de Curva del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos (US-NRCS) es un método ampliamente utilizado porque permite predecir la esorrentía directa generada por la precipitación diaria. Es un método computacionalmente eficiente, los datos de entrada que requiere generalmente están disponibles (precipitación, tipo de suelo, uso de suelo y pendiente) (Knisel, 1980) y aunque utiliza un único parámetro, los resultados son similares y coherentes con otros modelos de mayor complejidad (Villarroya, Farias & Amarilla, s.f).

Diferentes modelos de simulación hidrológica como SWAT (Soil and Water Assessment Tool), AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source Pollutant Model), APEX (Agricultural Policy Environmental eXtender), HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran), IPTM-CS, entre otros, utilizan la ecuación USLE/RUSLE con diferentes modificaciones para el cálculo de la erosión (Wu, et al. 2019). Estas adaptaciones se relacionan con los procedimientos para el cálculo de los factores de la ecuación USLE/RUSLE, los cuales dependiendo de la metodología empleada requieren mayor volumen de datos o información

específica para que su validación sea confiable ya que estos factores trabajan en escalas mayores, es decir, mayores tamaños de cuenca.

Los modelos de simulación hidrológica además de estimar la pérdida del suelo también calculan la escorrentía, generalmente utilizando el método del número de curva del US-NRCS (Wu, et al. 2020) y la infiltración de la zona de estudio. En SWAT, por ejemplo, la calibración ideal del modelo se realiza con el complemento SWAT-CUT y este requiere de tres a cinco años de datos que incluyan años promedio, húmedos y secos para emular eventos hidrológicos significativos que permitan una correcta estimación del parámetro deseado (Zhang et al. 2017). Esto representa una limitación en su aplicabilidad para estudios en los que no se cuenta con tal información de entrada.

Por otra parte, el análisis de la erosión y la escorrentía desarrollado con el método de medición directa se realiza a través de parcelas que permiten estudiar los parámetros de manera más sencilla que los métodos mencionados anteriormente, ya que no es necesaria la estimación o la proyección de datos. Estas parcelas están compuestas por pequeñas áreas con coberturas de suelo uniforme, pendientes establecidas y en algunos casos simulación de lluvia (Gao et al. 2019). Para ello, se ubican estructuras que conducen toda la escorrentía, y por ende el suelo erosionado, a un punto de recolección en la parcela que generalmente es una caída, para luego ser recolectada, analizada y relacionada con factores como intensidad de lluvia, tipo de cobertura vegetal, pendiente del terreno, entre otros (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004).

Así mismo, para analizar la relación entre diferentes variables ambientales y/o de manejo y el transporte de nutrientes, se han empleado algunos softwares estadísticos como SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) y R. Sin embargo, para encontrar valores de

correlación aceptables entre las variables de estudio, se requieren considerables datos de entrada a escalas temporales pequeñas (diarios, semanales y quincenales) de cada variable (precipitación, caudal, aplicación de fertilizantes, entre otros) lo cual dificulta su aplicabilidad (Flores et al. 2011).

Analizando las diferentes metodologías empleadas en el estudio de los mecanismos de transporte y los parámetros utilizados en cada uno de ellos, se identificaron las siguientes condiciones ambientales como las más influyentes en el análisis de la erosión y la escorrentía – y su relación con el transporte de nutrientes: pendientes del terreno (Wu, He & Ma, 2020), precipitación, cobertura vegetal y propiedades hidrofísicas del suelo como la textura, capacidad de infiltración, retención de humedad y porosidad total (Wu, He & Ma, 2020; Lai et al. 2016; Suescún et al. 2017; Wang, Zhengn& Römkens, 2013).

3. Metodología

3.1 Revisión de bibliografía

La búsqueda de literatura en bases de datos especializadas se realizó en SCOPUS y WEB OF SCIENCE mediante las combinaciones de palabras clave establecidas. Para esto, se tuvieron en cuenta solo documentos de tipo “artículo científico”, se excluyeron ciertas áreas temáticas de estudio (tierra y ciencias planetarias; ciencias sociales; bioquímica, genética y biología molecular; ciencia de la decisión; inmunología y microbiología; farmacología, toxicología y farmacéutica; negocios, gerencia y contabilidad; medicina; neurociencia; física y astronomía) ya que no contribuían al objeto de la revisión, para luego ser sometidos a filtros de selección de

acuerdo con el título, resumen y contenido. En las combinaciones de palabras claves se establecieron términos acordes con ecosistemas de alta montaña, ya que esta es una característica de la zona de estudio de este proyecto. Finalmente, se descartaron aquellos documentos que no aportaban al propósito de la revisión.

Se establecieron cuatro (4) combinaciones de palabras clave, una para cada condición ambiental objeto de estudio (pendientes, precipitación, cobertura vegetal y propiedades hidrofísicas). La combinación general se compone de 7 palabras claves, de las cuales tan solo una varía con respecto a la condición ambiental, los términos son los siguientes: i) agua; ii) actividad agrícola; iii) nutrientes; iv) ecosistemas de alta montaña; v) contaminación difusa; vi) condición ambiental de estudio; vii) mecanismos de transporte.

Luego de realizar la búsqueda en las bases de datos, se obtuvieron 498 resultados netos (Apéndice B) los cuales se redujeron a 172 luego de descartar las áreas temáticas de estudio mencionadas anteriormente y seleccionar únicamente los artículos científicos. Finalmente, el número de resultados se redujo a 72 luego de cruzar los resultados obtenidos con cada una de las combinaciones (se descartaron los artículos que se repetían en varias búsquedas).

Mediante el uso del software Excel se tabuló la información de interés para cumplir los objetivos de la revisión. En los apéndices C y D se encuentran: i) título de artículo; ii) año de publicación; iii) país de publicación; iv) revista de publicación; v) autores; vi) país de estudio; vii) zona de estudio; viii) tipo de área de estudio; ix) área de estudio; x) altitud máxima; xi) condiciones ambientales estudiadas; xii) pruebas estadísticas; xiii) mecanismo de transporte estudiado.

3.1.1 Filtro por título

Se estableció como criterio de aceptación la relación entre alguna condición ambiental estudiada y alguno de los mecanismos de transporte de contaminantes. Luego de aplicar este filtro se seleccionaron 46 artículos.

3.1.2 Filtro por resumen

Se procedió con la lectura de los resúmenes de los artículos resultantes del filtro por título y se estableció como criterio de aceptación que el estudio haya abordado de manera explícita una o más condiciones ambientales relacionándola con uno o más mecanismos de transporte de nutrientes. Como resultado de la aplicación del filtro se obtuvieron 16 artículos.

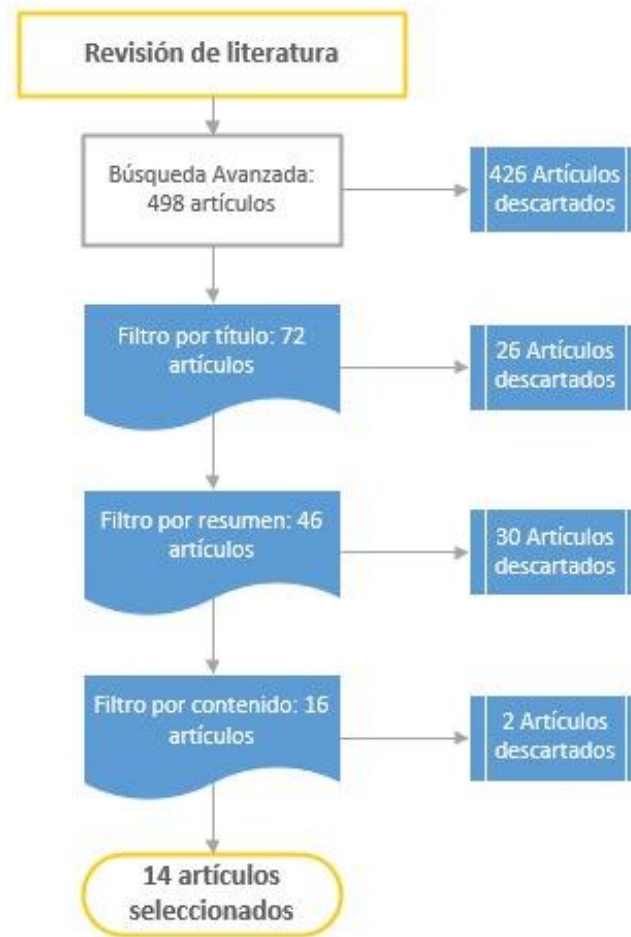
3.1.3 Filtro por contenido

Se leyeron los artículos obtenidos como resultado de los filtros anteriores y se estableció como criterio de aceptación que las investigaciones y los resultados de estas permitan relacionar las diferentes condiciones ambientales estudiadas con los mecanismos de transporte de contaminación difusa desde suelos agrícolas hasta fuentes de agua superficial. Como resultado se descartaron dos artículos.

En la Figura 1, se observa un esquema con la cantidad de artículos seleccionados por filtro y los resultados de la revisión bibliográfica.

Figura 1.

Esquema de filtros de la revisión bibliográfica.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente a la lectura de los artículos seleccionados, se encontraron fuentes comunes y relacionadas con el tema de estudio, por lo cual se consideró que podrían aportar al objeto de la investigación y se seleccionaron 3 artículos científicos más, obteniendo como resultado de la revisión de literatura 17 artículos científicos para su posterior análisis y discusión.

3.2. Caracterización de la práctica agrícola

Se analizó información secundaria obtenida por el grupo GPH mediante una encuesta realizada recientemente al agricultor de la unidad hidrográfica de estudio. Se identificaron los procesos y mecanismos usados para preparar el suelo antes de la temporada de siembra y los fertilizantes usados por los agricultores para sus cultivos (composición, concentraciones, dosis). Del mismo modo, se determinaron las frecuencias de uso de los insumos. Además, se caracterizaron las prácticas de riego, las cuales influyen en el transporte de nutrientes hacia los cuerpos hídricos.

3.3. Análisis de las condiciones ambientales

3.3.1. Pendientes

Se analizó el mapa de pendientes suministrado por el grupo GPH, identificando zonas de alta pendiente que favorecen los mecanismos de transporte estudiados (erosión, infiltración y escorrentía) para posteriormente ser contrastados con los resultados de la revisión de literatura.

3.3.2. Precipitación y calidad del agua

Se analizaron los datos obtenidos de la campaña de muestreo realizada en época seca de 2020 durante 3 días (21, 24 y 27 de febrero) por Gómez & Quintero (2020) y en época lluviosa de 2020 durante 3 días (2, 5 y 10 de noviembre) por el grupo GHP. De las muestras recolectadas se analizaron las concentraciones de fósforo reactivo soluble, fósforo total, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, y nitrógeno total debido a que son las formas de los

nutrientes estudiados (N y P) que se pueden encontrar en las muestras de agua analizadas y aportar al objetivo de la investigación. Adicionalmente, se analizaron los sólidos suspendidos, sólidos totales, sólidos disueltos totales, pH y conductividad eléctrica ya que, son parámetros relacionados con los diferentes mecanismos de transporte.

Se analizó la variación de los resultados en ambas épocas, así como en los diferentes puntos (nacimientos y cierres de cada UH), y la interrelación de estas dos variables, buscando relacionar comportamiento específicos de un punto en una época en particular, mediante la prueba Análisis de Varianza (ANOVA) de 2 factores para cada parámetro la cual a partir del valor p obtenido en el análisis de varianza se aprobó (si el valor p es menor a la significancia, es decir, 0.05) o rechazó (si el valor p es mayor a la significancia, es decir, 0.05) la hipótesis nula: existen diferencias significativas entre épocas, puntos y algún efecto de interrelación entre los 2 factores. Posteriormente a los factores con diferencias significativas se les aplicó la prueba comparaciones por parejas de Tukey y LSD de Fisher (Apéndice F).

3.3.3. Propiedades hidrofísicas y cobertura vegetal

El análisis de las propiedades hidrofísicas se desarrolló con base en el estudio realizado por Godoy y Medina (2019) en el cual se clasificaron las coberturas existentes en las dos UH de interés y posteriormente se estudiaron las diferentes propiedades hidrofísicas del suelo presentes en estas coberturas mediante muestras recolectadas en profundidades de 0-5 cm, 10-15 cm y 20-25 cm. Los resultados obtenidos de materia orgánica, pH, densidad aparente, porosidad total, humedad y textura, se contrastaron con los resultados obtenidos de la revisión de literatura para

inferir sobre su posible influencia en el transporte de nutrientes hacia el agua superficial del área de estudio.

4. Descripción de la zona de estudio

Este proyecto se desarrolló en el páramo de Berlín en el complejo de Santurbán, ubicado en el altiplano de la cordillera Oriental, en el departamento de Santander, Colombia (ASTM, 2010) (Apéndice A). La zona está compuesta por una unidad hidrográfica (UH) no intervenida con vegetación natural de páramo (arbustos, frailejones, pajonales, zonas boscosas y pastos naturales) cuya área es de aproximadamente 19 ha, así como, una unidad hidrográfica intervenida de área 11 ha, la cual además de la vegetación natural de páramo que es similar a la de la UH no intervenida posee un área, equivalente al 10% del área total, de cultivo de cebolla junca (*Allium fistulosum*) y papa (*Solanum tuberosum*) (Godoy & Medina, 2019).

Por tal razón, para contrastar algunas condiciones ambientales se tomó como “patrón” la UH no intervenida. En la UH intervenida se evidencia asimismo la presencia de una finca en donde, además de las actividades agrícolas, se desarrolla ganadería cuyo pastoreo se realiza en la zona de pastizales. Dicha zona está ubicada a una altitud comprendida entre los 3300 m.s.n.m y los 3650 m.s.n.m, con precipitación promedio anual de 910 mm (Godoy & Medina, 2019), distribuida en un régimen de lluvias bimodal, evidenciado en los caudales presentados en ambas UH durante una época lluviosa y una época seca, tanto el régimen de lluvias como demás información de calidad del agua se obtuvo por medio de la campaña de muestreo en época lluviosa (noviembre de 2020) y la campaña de muestreo en época seca (febrero de 2020). Durante estas campañas se tomaron datos en 4 puntos de muestreo:

I1: Nacimiento UH intervenida

I2: Cierre UH intervenida

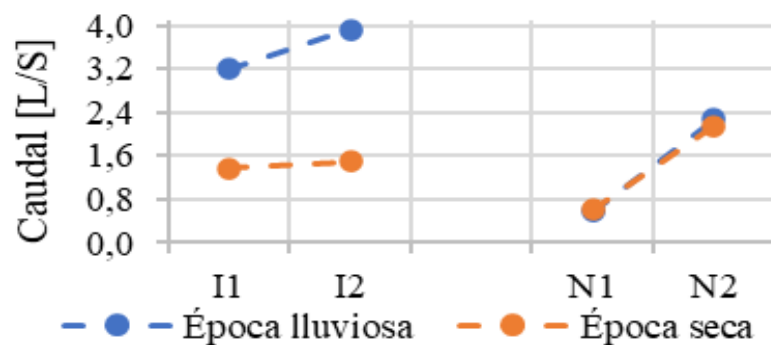
N1: Nacimiento UH no intervenida

N2: Cierre UH no intervenida

En la Figura 2, se observa que los caudales aumentan de manera significativa durante la época lluviosa en la UH intervenida, mientras que se mantienen casi sin variación en la UH no intervenida, esto puede deberse a que en esta zona la cobertura vegetal favorece la infiltración de la escorrentía y ayuda a regular el caudal.

Figura 2.

Valores promedio de caudal



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

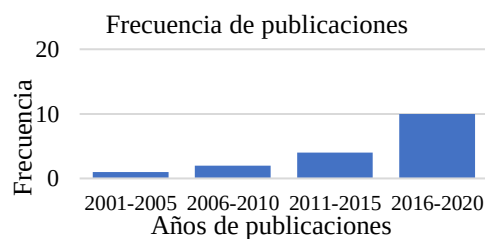
5. Resultados

5.1 Aspectos generales de las investigaciones sobre mecanismos de transporte de nutrientes

Una vez desarrollada la revisión bibliográfica, se encontró que el país con más publicaciones e investigaciones respecto al tema de estudio es China con 10 publicaciones en los últimos 6 años. De igual forma, como se observa en la Figura 3, se puede afirmar que cada vez es más estudiada la relación entre las diferentes condiciones ambientales y los mecanismos de transporte de nutrientes y se percibe una tendencia al aumento (Apéndice C).

Figura 3.

Frecuencia de artículos por intervalos de años.



Fuente: Elaboración propia

A partir de los protocolos de búsqueda, las condiciones ambientales más estudiadas son la precipitación y la cobertura vegetal, en cuanto a los mecanismos de transporte, la erosión y el flujo superficial (escorrentía) han sido los más estudiados, y es de resaltar que el flujo subsuperficial solo fue estudiado en 2 artículos (Apéndice D).

Respecto de las áreas de estudio, estas han sido muy variables, desde áreas de 1 [m²] hasta 22500 [m²] (Apéndice D), esto debido a que una de las metodologías de investigación es

por medio de parcelas de escorrentía cuyas dimensiones pueden ser bastante reducidas, otras metodologías utilizadas son los modelos de simulación SWAT, USLE, RUSLE y CSLE (Chinese Soil Loss Equation), la medición directa de los parámetros y el análisis de relaciones mediante pruebas estadísticas como el árbol de regresión potenciado (BRT por sus siglas en inglés), las pruebas de Kruskal Wallis y MannWhitneyU, ANOVA, Spearman, el análisis de modelo lineal y SOM, estos análisis estadísticos son generalmente desarrollados utilizando los softwares estadísticos R y SPSS (Apéndice D).

Los resultados de las investigaciones mostraron que el nitrógeno es un nutriente altamente soluble, por lo cual es más probable que llegue a los cuerpos de agua a través del flujo superficial (escorrentía) o subsuperficial. Además se transforma rápidamente en los ecosistemas debido a su alta capacidad de reacción con elementos presentes en el medio (Otero et al. 2011), mientras que el fósforo se adhiere principalmente a partículas transportadas al cuerpo de agua a través de la erosión o la escorrentía (Rickert, Chorus & Schmoll, 2016), y es el elemento menos susceptible al agotamiento por la agricultura, es decir, que las prácticas agrícolas no generarán una reducción de fósforo en el suelo a menos que se produzcan altas tasas de erosión (Otero et al. 2011).

Los estudios enfocados en la relación entre las condiciones ambientales y los mecanismos de transporte se han vuelto más frecuentes en los últimos años, ya que la afectación sobre cuencas hidrográficas debido a actividades antrópicas ha tomado más relevancia, se espera que esta tendencia continúe en aumento para así estudiar a mayor detalle los efectos negativos generados por el aporte de nutrientes proveniente de actividades agrícolas y poder determinar mejoras en las prácticas, cuyo impacto en la calidad del agua y por ende la del ecosistema sea menor.

5.2 Caracterización de la práctica agrícola

Una vez analizada la encuesta realizada por el grupo GPH al agricultor de la UH intervenida, se identificaron 3 tipos de cultivo: cebolla junca, de la cual se cultivan 3 cortes, es decir, 3 zonas distintas de este cultivo, papa negra, con 2 cortes y papa amarilla con 2 cortes. El proceso de cultivo se realiza durante todo el año variando las etapas del proceso de acuerdo con el corte, como se evidencia en (Apéndice EA).

Se determinó que, para todos los tipos de cultivo, se emplea el método de arado de forma mecánica por medio de un tractor a una profundidad promedio de alcance del arado de 10 a 20 cm, como mecanismo de preparación del suelo antes de la siembra. Este método al igual que la combinación de pastoreo y quema, según Hofstede (1995) reduce los niveles de materia orgánica del suelo y aumenta la densidad aparente del mismo, lo que reduce notablemente la capacidad de retención de agua del suelo (Robineau et al. 2010).

Adicionalmente, se realiza un proceso de encalado, el cual consiste en aplicar de manera directa cal viva al suelo con el fin de aumentar el pH del suelo, ya que estos están caracterizados por su acidez (Guhl, 1982). La dosis usual encontrada para realizar este procedimiento en cultivos de papa en el páramo es por cada 100 kg de tubérculos sembrados, lo que corresponde a 1000 m² de terreno, esparcir 200 kg de abono químico, 200 kg de cal y 500 kg de excrementos de aves (Robineau et al. 2010), la cual coincide con la dosis descrita para el cultivo de papa en la encuesta (Apéndice EA).

Durante el proceso se utilizan diversos agroquímicos como fertilizantes orgánicos, fungicidas y un acondicionador para el suelo, en el Apéndice EB se describe su composición, frecuencia de aplicación, dosis y su método de aplicación. Es posible que estas dosis sean

mayores a las recomendadas para suelos de páramo, debido a que los agricultores evitan correr el riesgo de perder su producción a causa de la insuficiencia de nutrientes del suelo y la incidencia de plagas y enfermedades como se observó en el estudio de Robineau et al. (2010) en el cual los agricultores del Páramo de Rabanal en Colombia, aplican 3 veces más nitrógeno que el recomendado por la Secretaría de Desarrollo Agrícola y Rural de Cundinamarca.

El riego empleado en los cultivos se realiza mediante aspersión. El agua empleada para este fin proviene de la misma fuente superficial (quebrada) durante todo el año. En el apéndice EA se describen las temporadas de riego durante las cuales se maneja una frecuencia de riego de 8 días durante 3 horas. Esta práctica de riego puede fomentar el transporte de nutrientes a través de la escorrentía al emplearse durante un periodo de tiempo prolongado, ya que puede dar lugar a excesos.

Finalmente, la encuesta realizada al agricultor encontró que el cultivo de papa negra y amarilla no requiere de riego artificial, es decir, es una agricultura de secano, utiliza únicamente el agua proveniente de lluvias.

5.3 Pendientes

El resultado principal de la revisión de literatura asociado a la pendiente, está relacionado con el efecto generado por las pendientes pronunciadas sobre la erosión y la escorrentía, pues estudios afirman que la erosión es proporcional a las pendientes del suelo, a mayor pendiente mayor velocidad de flujo y mayor tasa de erosión (He et al. 2014). Además, se ha determinado que pendientes superiores al 50%, producen altas pérdidas de suelo por escorrentía y erosión. Otero et al. (2011) determinaron que existe una relación directa entre la pendiente y el tiempo de contacto con el suelo. En el caso de pendientes pronunciadas se generan mayores velocidades,

por lo que este tiempo disminuye y favorece que la solubilización de los nitratos sea baja, por lo tanto, la concentración de este compuesto en el flujo superficial proveniente de zonas de alta pendiente va a ser menor que la del flujo procedente de pendientes menores al 50% (Otero et al. 2011; Zhang, 2017).

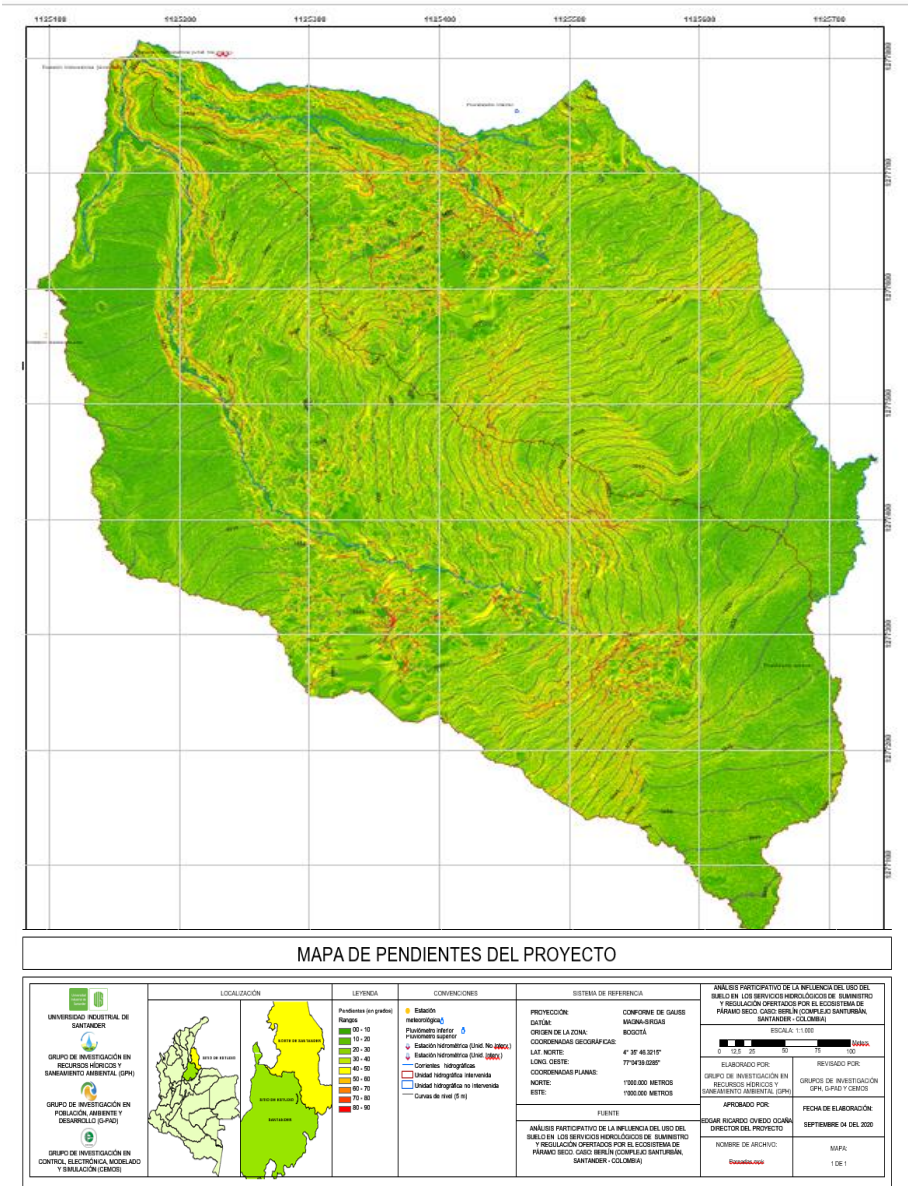
De igual forma, se ha encontrado que altas cargas de fósforo total se presentan principalmente en áreas con alta pendiente debido a que, como se mencionó anteriormente, el fósforo se adsorbe sobre las partículas que se transportan a través de la erosión y la escorrentía, mecanismos que son fomentados en zonas de alta pendiente, generando así una relación positiva entre la concentración de fósforo y la pendiente (Zhuang et al, 2015). Debido a esto Zhang et al. (2017) llegaron a la conclusión de que para el transporte de fósforo la condición ambiental más relevante es la pendiente. Respecto al transporte de sedimentos, se ha determinado que este está estrechamente relacionado con la escorrentía particularmente en pendientes pronunciadas de 65° (214%) (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004); no obstante, la intensidad de las precipitaciones también tiene una alta influencia en las pérdidas de sólidos suspendidos y fósforo (Zhang et al, 2019). Ramos et al. (2019), en su investigación en suelos agrícolas con pendientes entre 6.2% y 17% en la sierra de Santo Domingo, en el Pirineo Sur, determinaron un efecto significativo de las pendientes con las crecientes pérdidas de suelo, en particular, bajo alta intensidad de lluvia en zona montañosa.

En conclusión, las zonas de alta pendiente, superiores al 50%, se relacionan directamente con alta erosión, pero al mismo tiempo se relacionan con baja concentración de nitratos en la escorrentía debido al menor tiempo de contacto entre el suelo y el agua. Por el contrario, existe una relación positiva entre las concentraciones de fósforo y las zonas de alta

pendiente, por lo cual se considera a la pendiente como una condición ambiental clave en el transporte de fósforo.

Figura 4.

Mapa de Pendientes



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

Se analizó el mapa de pendientes suministrado por el grupo GPH (Apéndice E) encontrando zonas con pendientes superiores al 50% identificadas con los 6 rangos cuyos límites

se encuentran entre los 30° y los 90°, dichas zonas se pueden categorizar como de alto riesgo de erosión (Zhang et al. 2017; Otero et al. 2011) y como se puede observar en el mapa abarcan una importante área de las UH objeto de estudio. Por lo tanto, se puede afirmar que debido a que la pendiente es el factor más influyente en el transporte de fósforo (Zhuang et al. 2015), la zona de estudio es propicia para el transporte de este nutriente teniendo en cuenta únicamente este factor.

Se puede evidenciar que alrededor del cauce en ambas UH se encuentran pendientes superiores y al 50%, esto podría deberse a procesos erosivos hídricos ocurridos en estas zonas en un periodo de tiempo prolongado modificando la geomorfología de la zona. Sin embargo, se puede observar una sección del cauce de la UH no intervenida cuyas pendientes adyacentes son bajas (menores al 50%), esto puede favorecer el transporte de nitrógeno ya que existe un mayor tiempo de contacto lluvia-suelo por lo tanto, una mayor solubilización de este nutriente presente en el suelo (Zhuang et al. 2015), esta zona de igual forma, puede fomentar la infiltración debido a sus bajas pendientes.

5.4 Calidad del agua y precipitación

La precipitación está estrechamente relacionada con el transporte de nutrientes desde el suelo hasta las diferentes fuentes de agua superficial, ya que es considerada la principal fuerza impulsora de la escorrentía superficial (Gao et al. 2019). Adicionalmente, las gotas de lluvia fomentan la erosión por salpicadura (He, et al. 2014) debido a la energía cinética que se disipa al impactar sobre la superficie, que junto a otros factores como altas pendientes y coberturas vegetales, puede generar el desprendimiento de masas de suelo y sedimentos (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004).

Múltiples estudios han relacionado las pérdidas de nutrientes en el suelo en ecosistemas de alta montaña con los meses de mayor precipitación (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004; Gao et al. 2019; Suescún et al. 2017; Ruiz et al. 2017). Incluso los estudios de R. Zhang et al. (2019) y Ramos et al. (2019) muestran que las pérdidas de fósforo en la escorrentía superficial aumentan con una mayor intensidad de lluvia y afirman un aumento en la concentración de nitrógeno que llega a las fuentes de agua en época de lluvias (Ribbe et al. 2008; Ramos et al. 2019). Sin embargo, también se ha determinado que épocas de precipitación con alta intensidad tienden a disminuir la concentración de nitratos debido al efecto de dilución (He et al. 2014; Ruiz et al. 2017).

Adicionalmente, en la ecuación general de pérdida de suelo USLE, se establece el factor R como indicador de erosividad de la lluvia y se destaca que usualmente los eventos de tormenta con precipitación menor a 12.7 mm no se consideran en el cálculo del factor, ya que la escorrentía generada por estos eventos no es relevante en los procesos erosivos (Lai et al. 2016). Otro factor que clasifica la agresividad de la lluvia a partir de los totales de lluvia mensuales mediante una estimación de la energía cinética de la lluvia es el índice de Fournier modificado (MFI por sus siglas en inglés); sus valores oscilan entre 0 (muy bajo) y > 160 (muy alto) (Suescún et al. 2017).

Se realizaron gráficas para cada parámetro estudiado en las cuales se puede observar la variación entre UH y épocas de precipitación. En el eje Y se observan los resultados promedios obtenidos en las campañas de muestreo y en el eje X se ubican los puntos de muestreo como se mencionaron anteriormente, adicionalmente, en la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las pruebas estadísticas.

Tablas 1.*Resumen resultados estadísticos calidad del agua.*

Parámetro	Valor p (ANOVA)		
	Época	Puntos	Interacción época-punto
Potencial de hidrógeno (pH)	0.686	0.027*	0.711
Conductividad eléctrica	0.058	0.000*	0.018*
Nitrógeno total	0.002*	0.000*	0.557
Nitrógeno orgánico	0.000*	0.044*	0.142
Nitrógeno amoniacal	0.331	0.224	0.475
Nitritos	0.034*	0.996	1.000
Nitratos	0.027*	0.000*	0.006*
Fósforo reactivo soluble	0.146	0.003*	0.140
Fósforo total	0.910	0.075*	0.240
Sólidos disueltos	0.554	0.000*	0.019*
Sólidos suspendidos	0.444	0.158	0.232
Sólidos totales	0.778	0.001*	0.246

* Presenta diferencias significativas

Fuente: Elaboración propia**5.4.1 Potencial de hidrógeno (pH)**

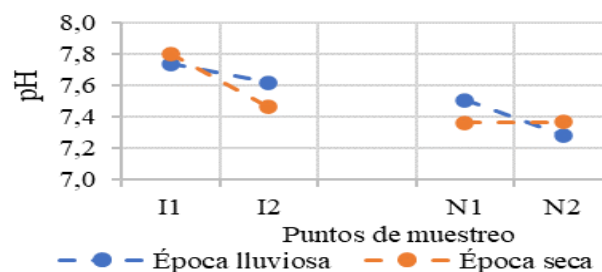
Como se puede apreciar en la Figura 5, el pH en la UH intervenida fluctúa tanto en época seca como lluviosa en el rango de 7.46 a 7.80, observándose una baja variabilidad en ambas épocas, esto concuerda con la prueba ANOVA presentada en la Tabla 1 en la cual se muestra que

no existe una diferencia significativa entre las diferentes épocas de precipitación. Sin embargo, entre la naciente y el cierre de las UH si se presentan diferencias significativas, ya que los valores de pH disminuyen a lo largo del cauce.

La UH no intervenida presenta los menores valores de pH en ambas épocas. Analizando la Figura 4, se puede afirmar que la actividad agrícola de la UH intervenida no genera ningún cambio a lo largo del cauce debido a que en la UH no intervenida es menor desde su nacimiento, por lo tanto, el valor más alto de pH se puede atribuir a una condición natural del cauce de la UH intervenida, al igual que el descenso entre el nacimiento y el cierre en ambas UH, esto debido a que los valores encontrados son valores típicos del ecosistema de páramo (6.20 a 7.80) (Matute, 2019). Finalmente, la interacción entre “Época” y “Punto” no genera efectos sobre el valor del pH (Apéndice F).

Figura 5.

Valores promedio de pH.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

5.4.2 Conductividad eléctrica

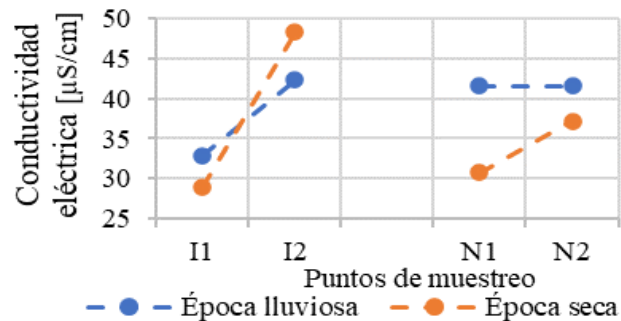
En la Figura 6 se observa que se presenta un mayor valor de conductividad eléctrica (CE) en el cierre de la UH intervenida en la época seca respecto a la época lluviosa, contrario al valor de CE en la naciente de esta unidad, el cual es menor en la época seca, por lo tanto, se presenta

una alta variación de este parámetro del orden de 19.23 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] opuesto a la época lluviosa en la cual la CE se incrementó en 9.47 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] desde la naciente hasta el cierre, esto concuerda con la prueba ANOVA, la cual muestra una diferencia significativa en los datos del factor “Punto” (Apéndice F). Por otro lado, en la UH no intervenida se presentan los mayores valores de CE en la época lluviosa, en esta época también se presenta la menor variación de este parámetro en la naciente y cierre, es decir, que no hubo una diferencia entre el nacimiento y el cierre de esta UH, esto es consistente con la interacción de los factores “Época” y “Punto” (Época*Punto), los cuales en la época lluviosa no presentan diferencias significativas entre ellos. Sin embargo, si se encontraron diferencias respecto a los demás datos tanto en épocas como en puntos (Apéndice F).

La CE se relaciona como respuesta al uso de sales asociadas a la fertilización (Alexiades, et al. 2019), lo cual se ratifica en los datos de las nacientes de ambas UH, siendo los menores valores reportados, indicando la ausencia de fertilizantes en estas zonas. El aumento de la CE a lo largo del cauce es un indicador de transporte de sales desde los suelos hasta el agua superficial (Otero, 2011; Abella & Martínez, 2012); sin embargo, se aprecia un mayor aumento entre la naciente y el cierre de la UH intervenida, lo cual se podría asociar a las actividades antropogénicas que se desarrollan en la zona. No obstante, los valores obtenidos están por debajo del rango de valores encontrados por Peralta (2019) para ecosistema de páramo (50 a 64 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]). De igual manera, la prueba ANOVA no encontró diferencias significativas entre temporadas de lluvia, lo cual indica que el transporte no se está realizando por escorrentía, teniendo esto en cuenta, se puede asociar al transporte subsuperficial o al uso de riego en las zonas de cultivo.

Figura 6.

Valores promedio de Conductividad eléctrica.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

5.4.3 Nitrógeno total

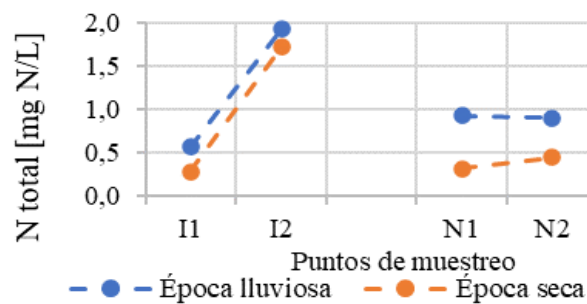
El nitrógeno total presenta concentraciones similares en las nacientes en época seca tanto en la UH intervenida como en la no intervenida como se puede ver en la Figura 7. Sin embargo, en el cierre de las UH se presenta una concentración más alta en la UH intervenida, mientras que el nitrógeno total en la UH no intervenida se mantiene casi constante hasta el cierre de la UH, tanto en época seca como lluviosa, esto puede deberse al aporte de nutrientes proveniente de las actividades agrícolas, debido a la aplicación de fertilizantes en los cultivos que se desarrollan en la UH intervenida. Esto se evidencia en el aumento entre la naciente y el cierre, generando un incremento en la concentración de nitrógeno total, lo cual concuerda con la prueba de Tukey realizada para el factor “Punto”, la cual arrojó una diferencia significativa en el cierre de la UH intervenida respecto a los demás puntos (Apéndice F).

Por otro lado, durante la época lluviosa en la UH intervenida se presenta un leve aumento de la concentración de nitrógeno total que puede ser asociado a la lixiviación y la escorrentía producidas en esta época. De igual forma, en la UH no intervenida también se presenta un

aumento, aunque en mayor magnitud, siendo esto consistente con el aumento en la concentración de nitrógeno que llega a las fuentes de agua en época de lluvias mencionado por Ribbe et al. (2008), que a su vez es consistente con la prueba de Tukey que encontró diferencias significativas entre épocas, pero la interacción entre “Época” y “Punto” no genera efectos sobre la concentración de este parámetro (Apéndice F).

Figura 7.

Valores promedio de Nitrógeno total.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

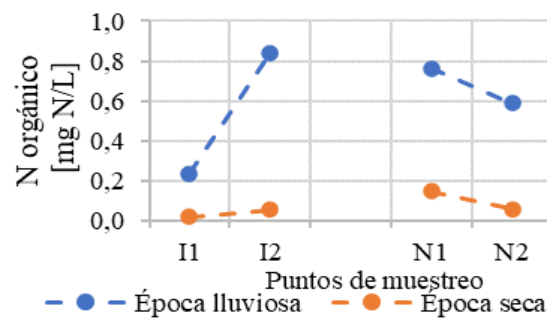
5.4.4 Nitrógeno orgánico

En la Figura 8 se observan las concentraciones de nitrógeno orgánico en la UH intervenida y UH no intervenida en época seca y lluviosa. Este parámetro presenta un comportamiento caracterizado por bajas concentraciones en época seca y valores más elevados en época lluviosa. De igual manera, la UH intervenida presenta un aumento significativo desde la naciente hasta el cierre y la UH no intervenida presenta una disminución en las concentraciones a lo largo del cauce. La prueba ANOVA encontró diferencias significativas entre épocas y en todos los puntos, sin haber interrelación entre los factores (Apéndice F). La diferencia

significativa entre los datos de las épocas de lluvia obtenidos por las pruebas de comparación múltiple de Tukey y LSD de Fisher puede deberse a la escorrentía fomentada por las precipitaciones y la poca variación en la cobertura vegetal en la UH intervenida y a procesos de atenuación en la UH no intervenida.

Figura 8.

Valores promedio de Nitrógeno orgánico.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

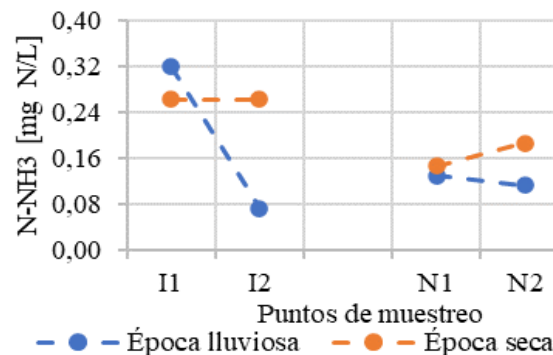
5.4.5 Nitrógeno amoniacal

La UH intervenida en época seca no presenta variaciones en las concentraciones de nitrógeno amoniacal, ya que en el cierre se obtuvo la misma concentración que el nacimiento. La mayor concentración se obtuvo en el nacimiento de la UH intervenida en época lluviosa, el valor mínimo se encontró en el cierre de esta UH en la misma época. En la UH intervenida se observa una marcada disminución en época de lluvia mientras que en la UH no intervenida se encontraron valores con poca variación entre épocas y puntos (Figura 9). Sin embargo, la prueba ANOVA no evidenció diferencias significativas en los datos analizados en los diferentes puntos y épocas en las UH (Apéndice F), por lo que se puede decir, que el nitrógeno agregado al sistema

por medio de fertilizantes se está degradando biológicamente para transformarse en nitratos como se observa en la Figura 11. Debido a esto, se podría afirmar que los fertilizantes no afectan la carga de nitrógeno amoniacal en el agua superficial, lo cual coincide con los resultados obtenidos por Avellaneda et al (2018) en su estudio llevado a cabo en el parque nacional natural nevados, en la cordillera de los Andes centrales, Colombia, donde no se encontraron diferencias de concentración de nitrógeno amoniacal entre épocas de lluvia.

Figura 9.

Valores promedio de Nitrógeno amoniacal.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

5.4.6 Nitritos.

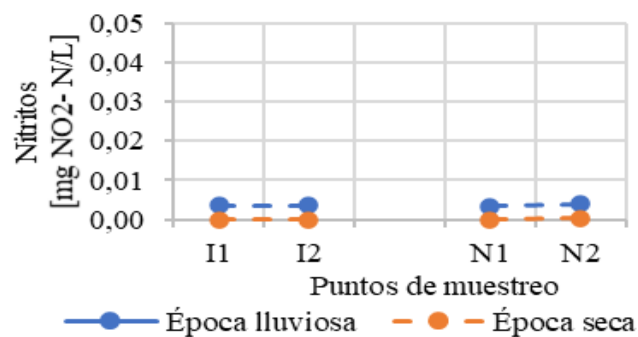
Las concentraciones de nitritos en las muestras recolectadas presentan valores muy bajos en época seca, en algunos casos nulos. Sin embargo, en época lluviosa se presentan concentraciones de $0,0037 \text{ [mg NO}_2 - \text{N/L]}$ en la naciente y el cierre de la unidad intervenida, y un incremento en la UH no intervenida que presentó una concentración de $0,0033 \text{ [mg NO}_2 - \text{N/L]}$ en la naciente y $0,0040 \text{ [mg NO}_2 - \text{N/L]}$ en el cierre. La prueba

ANOVA corrobora esta afirmación (Apéndice F), mostrando una diferencia significativa entre épocas, evidenciando que el nitrógeno es un nutriente altamente soluble y presenta facilidad para transformarse en los ecosistemas debido a su alta capacidad de reacción con los elementos presentes (Otero et al. 2011) el incremento de nitritos en época de lluvia puede asociarse a una mayor presencia de las formas de nitrógeno.

Por lo tanto, la lluvia fue un factor influyente en el estudio de nitritos, ya que en época de altas precipitaciones se obtuvieron las mayores concentraciones (Figura 10).

Figura 10.

Valores promedio de Nitritos.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

5.4.7 Nitratos

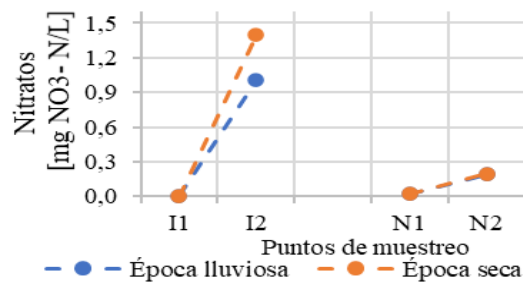
En la Figura 11, se puede observar la concentración de nitratos en la UH no intervenida y UH intervenida. La prueba ANOVA evidenció diferencias significativas entre épocas de lluvia, entre las nacientes y los cierres de las UH estudiadas y en la interrelación de los factores época y punto (Apéndice F). La UH no intervenida presenta un incremento en el cierre con respecto a la naciente. En la UH intervenida también se observa un incremento entre la naciente y el cierre. La comparación por parejas de Tukey permite afirmar que en temporada seca las concentraciones de nitratos son mayores en el cierre de la UH intervenida respecto de la época lluviosa, de igual

manera, los nacimientos de las UH no presentan diferencias significativas, por lo tanto, las diferencias en sus cierres se pueden atribuir a las actividades que se desarrollan en éstas.

Aunque las UH estudiadas presentan un incremento en la concentración de nitratos en su cierre, este es mayor en la UH intervenida, la marcada diferencia se puede asociar a la nitrificación del nitrógeno procedente del exceso de fertilizantes agrícolas que no son absorbidos por los cultivos y debido a que es altamente soluble y se puede transportar fácilmente por escorrentía y flujo subsuperficial, oxidándose a nitratos (Gómez & Quintero, 2020). En tanto a la interrelación de los factores época y punto, se evidencia únicamente en el cierre de la UH intervenida un aumento de la concentración de nitratos en época seca, es decir, la diferencia de épocas afecta solamente en este punto.

Figura 11.

Valores promedio de Nitratos.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

5.4.8 Fósforo reactivo soluble

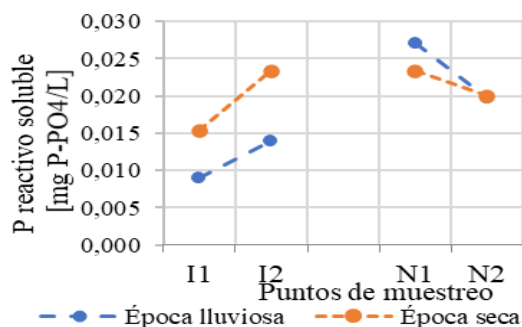
Aplicando ANOVA de dos factores, se obtuvo como resultado que no se presentan diferencias significativas entre las concentraciones para la época seca y época lluviosa en la zona de estudio, por lo tanto, la precipitación no fue un factor influyente en la concentración de

fósforo reactivo soluble en el estudio realizado. Por el contrario, existen diferencias significativas entre el nacimiento y el cierre de cada UH (Apéndice G).

En la Figura 12, se observa un incremento entre el nacimiento y el cierre de la UH intervenida, lo cual se puede atribuir a las descargas de contaminantes de fertilizantes fosforado y en la UH no intervenida se presenta una leve disminución, la cual se puede asociar a una dilución de condición natural en el trayecto (Gómez & Quintero, 2020). Sin embargo, todas las concentraciones se encuentran por debajo del promedio de 0.03 [mg P-PO₄/L] encontrado en el estudio de S. Ao, M. Chiu, X. Li et al., 2021. Por lo tanto, se puede concluir que, aunque se presentan comportamientos inversos en las UH las concentraciones siguen estando entre el promedio para este tipo de ecosistemas.

Figura 12.

Valores promedio de P reactivo soluble



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

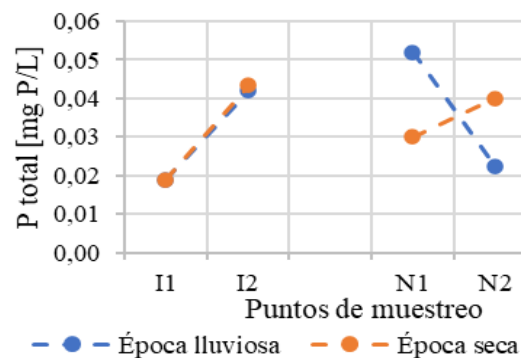
5.4.9 Fósforo total

En la Figura 13, se observa el fósforo total en la UH intervenida que tiene un comportamiento similar en ambas épocas de lluvia, en donde se evidencia un incremento en la concentración del cierre con respecto al nacimiento. En la UH no intervenida se presenta un comportamiento similar a la UH intervenida en época seca, sin embargo, en época lluviosa

sucede lo contrario. La prueba ANOVA no encontró diferencias significativas entre los factores analizados (Apéndice G), por lo que se puede afirmar que la precipitación no tuvo influencia en las concentraciones de fósforo. Por otra parte, en la UH intervenida se evidencia un incremento desde el nacimiento hasta el cierre, y según las prácticas agrícolas empleadas en la zona de estudio, durante todos los meses del año se aplican dos tipos de fertilizantes, Starmin, el cual no contiene fósforo en su composición, y Pollinaza la cual se aplica de manera manual sobre los cultivos, con $4.6 \pm 0.2 \%$ de concentración de óxido de fósforo (P_2O_5) (Apéndice F). Por lo tanto, se puede atribuir el incremento en el cierre de la UH intervenida a las actividades agrícolas desarrolladas en la zona.

Figura 13.

Valores promedio de P total.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

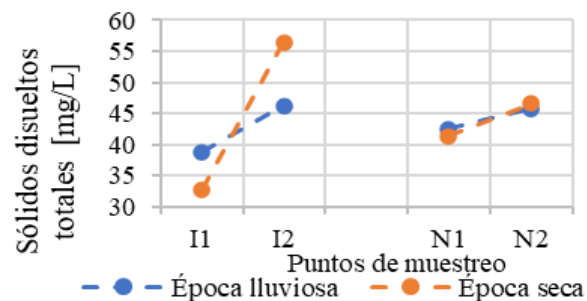
5.4.10 Sólidos disueltos totales (SDT)

En la Figura 14 se observan las concentraciones en la UH intervenida, en donde se presentan los valores máximos y mínimos, evidenciando una mayor variabilidad de las concentraciones, el valor $32.73 [mg/L]$ mínimo corresponde a en la naciente, y el valor máximo $56.47 [mg/L]$ en el cierre con un valor de , ambos en la época seca. Los valores hallados están en el rango determinado en el estudio de Gonzáles et al., 2019 en el Páramo del

Rabanal, Colombia, el cual va desde 20 [mg/L] a 76 [mg/L]. Sin embargo, la prueba ANOVA evidenció diferencias significativas entre los puntos y también en la interrelación de los factores época-punto (Apéndice F), al igual que las pruebas de Tukey y LSD de Fisher, presentando el valor máximo en la UH intervenida, esto se puede deber a los métodos de labranza empleados por los agricultores y a la concentración de sólidos contaminantes por insumos agrícolas (Gómez & Quintero, 2020). La prueba de Tukey para la interrelación de factores muestra diferencias significativas en la UH intervenida, evidenciando una fluctuación en los datos de esta unidad, por lo tanto, podemos afirmar que en esta UH la interrelación de los factores “Época” y “Punto” afectó significativamente, presentando un aumento en el cierre.

Figura 14.

Valores promedio de Sólidos disueltos totales.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

5.4.11 Sólidos suspendidos totales

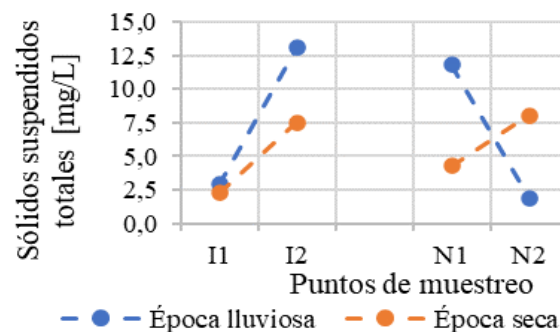
En la Figura 15 se observan las concentraciones de sólidos suspendidos totales en ambas UH, se aprecia un comportamiento similar en las dos temporadas de lluvia en la UH intervenida, caracterizado por un incremento durante el trayecto del cauce, aunque los valores en la naciente son similares, es mayor la concentración en temporada de lluvia y esto se hace más evidente en el cierre, esto se puede asociar al arrastre de materiales antropogénicos a lo largo del cauce,

debido a la escorrentía que aumenta en la época lluviosa (Gómez & Quintero, 2020). Sin embargo, la concentración de sólidos suspendidos totales es inferior a los valores típicos encontrados en ecosistema de páramo (10 a 18 [mg/L]) (González et al. 2019).

En la UH no intervenida se evidencian los diferentes comportamientos entre temporadas debido a que en época seca se presenta un aumento y en época lluviosa una disminución entre la naciente y el cierre. A pesar de la alta variabilidad entre puntos y épocas, la prueba ANOVA no encontró diferencias significativas entre los datos analizados.

Figura 15.

Valores promedio de Sólidos suspendidos totales.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

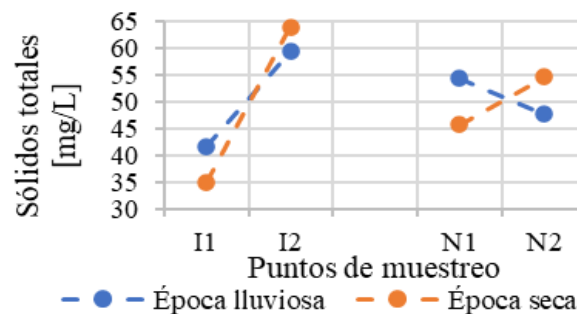
5.4.12 Sólidos totales

Los sólidos totales incluyen material disuelto y no disuelto, en la Figura 16 se presentan las concentraciones de estos en las dos UH estudiados en ambas épocas de lluvia. Las UH presentaron altos niveles en comparación a los sólidos suspendidos, por lo tanto, se puede afirmar que en su mayoría son sólidos disueltos, la UH intervenida presenta diferencias significativas entre su naciente y su cierre, debido a un notable incremento a lo largo del cauce,

esto se puede atribuir a las actividades antropogénicas que fomentan el transporte de sólidos, lo cual se puede relacionar con las propiedades hidrofísicas del suelo, las cuales pueden fomentar los mecanismos de transporte como la erosión. Sin embargo, los valores obtenidos se encuentran en el rango determinado en el estudio realizado por M. Gonzáles-Martínez, C. Huguet, J. Pearce et al., 2019 (González et al. 2019), en el Páramo del Rabanal, Colombia, el cual encontró valores de sólidos totales que oscilan entre 42 y 110 [mg/L]. La UH no intervenida no presenta diferencias significativas entre temporadas de lluvia ni entre los puntos estudiados, evidenciando un menor transporte de sólidos, por lo tanto, de nutrientes.

Figura 16.

Valores promedio de Sólidos totales.



Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020).

5.5 Propiedades hidrofísicas del suelo y cobertura vegetal

La cobertura vegetal previene la pérdida de nutrientes teniendo en cuenta dos características principales de ésta: i) el sistema de raíces de las cubiertas vegetales que aumenta la infiltración (Wu et al. 2019) y mantiene las partículas del suelo en su lugar, reduciendo así la susceptibilidad de éste a la erosión (Gao et al. 2019); y ii) los tallos de las plantas que disminuyen la velocidad del flujo, reduciendo los efectos generados por la escorrentía y la

sedimentación (Gao et al. 2019). Se han encontrado estudios a nivel de cuenca, donde la poca cobertura vegetal ha sido uno de los principales factores influyentes en la exportación de cargas de fósforo total en terrenos forestales, pastizales y tierras agrícolas (Zhuang et al. 2015). Estudios como el de Andrade et al. (2010), desarrollado en zona de alta montaña en el municipio de Torres en el estado Lara, Venezuela en donde la cobertura vegetal no es densa y las especies vegetales son de porte o altura bajas, registran las zonas boscosas y de cultivos como la caña de azúcar (*Sacharum spp.*) y la vid (*Vitis vinífera*) con los menores valores de pérdida de suelo.

El estudio realizado por Lei Wu et al. (2019) en la región de Loess, China, concluyó que los bosques son más efectivos para mitigar la erosión que los pastizales y las tierras agrícolas en zonas montañosas. Ouyang et al. (2018) sugieren que los pastizales y bosques pueden producir menos riesgos de erosión del suelo que las tierras cultivables; aun así, los estudios muestran que cualquier tipo de cobertura vegetal protege al terreno de la erosión en comparación al suelo desnudo.

Estudios desarrollados en parcelas de escorrentía, es decir, controlando variables como la precipitación y la pendiente, han comparado y analizado el efecto de las diferentes coberturas vegetales en mecanismos de transporte de nutrientes como la escorrentía y la erosión (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004) y han concluido que la cobertura es fundamental para disminuir la energía cinética producto de las gotas de lluvia y para aumentar la sorción de nutrientes por el suelo debido al aumento del grado de contacto suelo-agua (Gao et al. 2019). Suescún et al. (2017) mencionan en su estudio que los pastizales producen los mayores caudales de escorrentía superficial respecto a bosques, tierras de cultivo y cobertura de hierba alta, mientras que las tierras de cultivo tienen las mayores tasas de erosión. De igual manera, Ramos et al. (2019) obtuvieron como resultado de su estudio en zona montañosa de España que, en comparación con

los suelos agrícolas, las pérdidas de suelo en bosques, matorrales y tierras forestadas son 3, 4 y 10 veces menores, respectivamente. Sin embargo, en tierras áridas, las pérdidas de suelo pueden ser hasta 10 veces mayores (Ramos et al. 2019). En tanto a nutrientes, las pérdidas de nitrógeno orgánico fueron mayores en los suelos agrícolas y tierras áridas que en zonas boscosas y de matorrales con diferentes intensidades de lluvia, los valores más altos de pérdidas de fósforo se registraron en suelos agrícolas y aumentaron con la intensidad de la lluvia (Ramos et al. 2019).

Por otra parte, el estudio realizado por Durán Zuazo et al. (2004) en terrazas de cultivo en el sureste de España, sugiere que anualmente más del 50% de los nutrientes de la escorrentía y los sedimentos puede quedar retenido y ser asimilado por ciertos cultivos como el tomillo (*Thymus serpylloides* Bory sbsp. *Gadorensis*) y la salvia (*Salvia officinalis* L.) en áreas con pendientes pronunciadas. Finalmente, para mantener la erosión bajo límites aceptables (por debajo de 0.18 t / ha) a nivel de cuenca, se recomienda aumentar el porcentaje de superficie con cobertura vegetal por encima del 35 – 40% (Ruiz et al. 2017) y se sugiere la preservación de pastizales y bosques, ya que pueden producir menos riesgos de erosión del suelo respecto a tierras agrícolas.

La cobertura vegetal es fundamental para favorecer la infiltración, reducir la susceptibilidad del suelo a la erosión y disminuir los efectos de la escorrentía, reduciendo la velocidad de flujo. Se han encontrado diversos estudios que consideran a las áreas boscosas, pastizales y ciertos cultivos como zonas con bajos valores de pérdida de suelo, pero no se ha generalizado un tipo de cobertura como la más influyente al momento de proteger el suelo de la erosión y escorrentía. Suescún et al. (2017) concluye en su investigación que los pastizales generan los mayores caudales de escorrentía superficial y las tierras de cultivo las mayores tasas de erosión. Diversos estudios han concluido que los efectos de la erosión generan más

degradación en áreas desnudas sobre cualquier tipo de cobertura vegetal existente (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004; Wu et al. 2019; Ouyang et al. 2018).

Las propiedades hidrofísicas del suelo son una condición ampliamente estudiada debido a que determinan características del terreno como la infiltración y retención de agua. Además, en el suelo se almacenan los nutrientes, los cuales se pueden transportar por los diferentes mecanismos estudiados y alcanzar los cuerpos de agua superficial (Wang, Zheng & Römkens, 2013). Diversos estudios han analizado propiedades como la textura, densidad aparente, porosidad total, contenido de materia orgánica, pH y humedad, y los han relacionado con características que pueden favorecer los mecanismos de transporte de nutrientes (Suescún et al. 2017; Ouyang et al. 2018; IGACS, 2000).

El estudio realizado por Ouyang et al. (2018) desarrollado en la cuenca del río Abujiao en el noreste de China, analizó las texturas del suelo y encontró que suelos con poco limo, arcilla y materia orgánica favorecen la erosión, que a su vez está relacionada con la resistencia al corte del suelo (Fattet et al. 2011). Asare et al. (1997) determinaron que suelos con texturas franco limosa y franco arcillosas son más susceptibles a la erosión que aquellos con textura franco arenosa (Asare, 1997). Los suelos con ceniza volcánica tienen alta capacidad de retención de agua, alta porosidad y baja densidad (IGACS, 2000) y estos rasgos generan una alta capacidad de infiltración y, por tanto, bajos caudales de escorrentía (Suescún, 2017).

La tasa de infiltración del suelo disminuye a medida que aumenta la densidad aparente del suelo (Ouyang, 2018), por lo tanto es posible inferir que suelos con una baja densidad aparente favorecen el transporte subsuperficial debido a que reducen el transporte de nutrientes por medio del flujo superficial.

Por otro lado, la precipitación aumenta la formación de charcos, los cuales dispersan las partículas finas de arcilla en suelos con alto contenido de estas, lo que rompe los poros capilares y forma una capa arcillosa impermeable en la superficie, que desacelera la tasa de percolación del agua hacia el subsuelo, disminuyendo su capacidad de infiltración (Chandna, 2011). Por lo tanto, en suelos arcillosos hay menor infiltración, que en los suelos arenosos y suelos de textura franca, además estos suelos francos al tener partículas gruesas son más propensos a la erosión debido a que son débilmente cohesivos (Zhang et al. 2019).

Finalmente, Flores-López et al. (2011) encontraron que cuando el nivel freático está muy cerca de la superficie se produce un flujo subsuperficial, y las concentraciones de fósforo son mayores en aguas subterráneas poco profundas (<30cm de la superficie). Sin embargo, la concentración de fósforo en el agua que se mueve a través de la matriz del suelo es menor que la concentración en la escorrentía superficial, la cual disminuye a medida que aumenta el grado de contacto suelo-agua, ya que el fósforo se adhiere a las partículas de suelo. A diferencia del fósforo, el nitrógeno al ser más soluble se disuelve en el agua que se infiltra, por lo tanto las concentraciones de éste en el flujo subsuperficial van a ser mayores (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004).

De las propiedades objeto de estudio, la textura del suelo presenta resultados concisos respecto a los mecanismos de transporte que esta favorece, por ejemplo, suelos con poco contenido de limo, arcilla y materia orgánica favorecen la erosión (Fattet et al. 2011). Las texturas franco-limosa y franco-arcillosa son más susceptibles a la erosión que la textura franco-arenosa (Asare, 1997). En la zona de estudio se presentan texturas franco-arcillosa y franco-arenosa clasificadas según su granulometría como se puede ver en el Apéndice G 6.

Suelos con alta capacidad de retención de agua, alta porosidad y baja densidad generan mayores tasas de infiltración, reduciendo la esorrentía superficial (Wang, Zheng & Römken, 2013). La formación de charcos producto de la precipitación puede generar una capa impermeable en la superficie de suelos con altos contenidos de arcilla, afectando su capacidad de infiltración (Chandna et al. 2011). Por último, en zonas con nivel freático cercano a la superficie se puede generar un flujo subsuperficial que se caracteriza por tener una menor concentración de fósforo y mayor concentración de nitrógeno en comparación con el flujo superficial producto de la esorrentía (Zuazo, Raya & Ruiz, 2004).

Alba & Salazar (2020) identificaron 6 tipos de uso de suelo (arbusto denso, barbecho, cultivo de cebolla, cultivo de papa, vegetación nativa de páramo con alta y baja pendiente) (Apéndice H) sobre los cuales se determinaron las propiedades hidrofísicas en el área de estudio en la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tablas 2.

Resumen resultados propiedades hidrofísicas

Parámetro	Rango UH intervenida	Rango UH no intervenida
Materia orgánica	5% - 21%	7% - 22%
pH	4.2 - 5.3	4.0 - 4.8
Densidad aparente	0.4 - 1.15 [gr/cm ³]	0.58 - 1.02 [gr/cm ³]
Porosidad total	55% - 82%	55% - 75%
Humedad	21% - 52%	25% - 51%

Fuente: Elaboración propia Adaptado de Godoy y Medina (2019).

5.5.1 *Materia orgánica*

Como se puede observar en el anexo 7A, los mayores valores de materia orgánica se encuentran en la UH no intervenida en todos los tipos de cobertura y en las 3 profundidades de estudio, en todos los casos los valores fueron mayores que los obtenidos en la UH intervenida. Los menores valores de materia orgánica se encuentran en los cultivos de papa y cebolla y en la zona de vegetación nativa de alta pendiente en la UH intervenida en la profundidad C.

Según los resultados de la revisión bibliográfica, los suelos con bajo contenido de materia orgánica favorecen los procesos erosivos (Fattet et al. 2011), igualmente, Hernández & Plata (2018) en su revisión bibliográfica realizada para páramos andinos, encontraron que la reducción de materia orgánica afecta propiedades como la densidad aparente, porosidad, conductividad hidráulica y permeabilidad, lo cual conlleva a una menor retención de agua. De esta manera, se puede afirmar que la UH intervenida, principalmente en las zonas de cultivo, se puede presentar procesos erosivos que contribuyen a un mayor transporte de nutrientes, como el fósforo. Esto concuerda con los resultados de calidad del agua respecto al fósforo total en los cuales se puede apreciar un aumento, evidenciado en la prueba de Tukey y LSD de Fisher, en el cierre de la UH donde se ubican aproximadamente los cultivos y es aquí donde por medio de fertilizantes se agrega fósforo al sistema.

5.5.2 *Potencial de hidrogeno (pH)*

En el anexo 7B, se observan los valores de pH en las diferentes coberturas estudiadas es de apreciar que los suelos son altamente ácidos. Sin embargo, en las zonas de cultivo se pueden observar los mayores valores de pH, es decir, los suelos con menor acidez, estos valores se pueden asociar a que todo sustrato de cultivo necesita un rango de acidez para desarrollarse

(Pérez, 2014). Este rango de acidez óptimo oscila entre 5 y 6 y garantiza las condiciones favorables para el desarrollo del cultivo (Fao, 2002). Esto concuerda con lo descrito en la práctica agrícola respecto al uso de cal para aumentar el pH de los suelos.

Para lograr dichas condiciones de acidez, es decir, aumentar el pH de las condiciones naturales que tiene el suelo de páramo que como se puede observar en el anexo 7B es inferior a 5 en casi todas las coberturas, se requiere el uso de abonos y fertilizantes que alteran las propiedades químicas del suelo (Godoy & Medina, 2019). Aunque el pH no es una propiedad hidrofísica relacionada con el transporte de nutrientes, en la zona de estudio es un indicador del uso de fertilizantes en actividades agrícolas que puede generar exceso de nutrientes, sin embargo, es de destacar que el uso de cal, el cual es el agroquímico utilizado en la zona para acondicionar el suelo, es decir modificar el pH, no es intensivo puesto que el pH del suelo se encuentra muy cercano al rango óptimo para el desarrollo de cultivos y la dosificación utilizada corresponde a lo habitual para esta práctica agrícola. Esto indica que no hay un exceso de cal en el sistema que señale un amplio uso de fertilizantes, lo cual es coherente con el estudio de Estupiñán (2001) desarrollado en ecosistema de páramo en el cual se obtuvieron valores de pH en el suelo entre 3.90 y 5.40.

5.5.3 Densidad aparente

Se puede observar en el anexo 7C que el comportamiento de la densidad aparente de cada UH en las diferentes profundidades estudiadas fluctúa entre 0.4 gr/cm^3 y 1.15 gr/cm^3 (Godoy & Medina, 2019). En la UH intervenida el menor valor es el correspondiente a arbusto denso en cada profundidad, mientras que en la UH no intervenida el menor valor corresponde a la vegetación nativa de baja pendiente y de alta pendiente. La UH intervenida presenta los mayores valores de densidad aparente en las zonas de baja y alta pendiente, y la UH no intervenida

presenta mayores valores en las zonas de arbusto denso y barbecho. Por su parte, las zonas de cultivo presentaron valores de densidad aparente altos, aunque esto fue más evidente en el cultivo de cebolla.

Las bajas densidades aparentes contribuyen a que los suelos puedan retener grandes cantidades de agua, las cuales varían entre 0.15 g/cm^3 y 0.9 g/cm^3 en ecosistema de páramo andino (Harden, 2006).

La UH no intervenida mantuvo todos sus valores entre el rango que establece Harden (2006) para suelos capaces de retener grandes cantidades de agua, a excepción de la zona de arbusto denso en la profundidad C que superó ligeramente el límite superior. Debido a esto se puede afirmar que la UH no intervenida presenta mejores características, según la densidad aparente, para reducir el transporte de nutrientes por medio de la escorrentía, ya que se favorece el almacenamiento de agua.

El aumento en la densidad aparente en los suelos cultivados, se debe a la compactación del suelo por actividades antrópicas (Benavides et al. 2018), reduciendo su capacidad de retención de agua (Harden, 2006). Sin embargo, en el estudio realizado por Hernández & Plata (2018), se obtuvo un valor promedio de densidad aparente en cultivos desarrollados a nivel de páramo, este valor es de 0.53 g/cm^3 y es superior a los valores encontrados en la UH intervenida. Considerando lo anterior, se puede concluir que las actividades antrópicas no evidencian una afectación en la densidad aparente del terreno.

En las zonas de vegetación nativa de alta pendiente, las cuales son más susceptibles a la erosión por la lluvia (He, 2014), se observan valores altos de densidad aparente en la UH

intervenida que indican una menor tasa de infiltración, indicando que en estas zonas son más susceptibles a la escorrentía como mecanismo de transporte de nutrientes. Mientras los valores encontrados en la UH no intervenida se encuentran cercanos al promedio hallado en cobertura nativa de páramo a nivel superficial (Hernández & Plata, 2018).

5.5.4 Porosidad total

Los valores de porosidad total mostrados en el anexo 7D, tienen comportamientos muy similares en la UH intervenida como en la no intervenida. La UH no intervenida presenta poca variación en sus valores, sin embargo, su valor máximo está en la cobertura de vegetación nativa de baja pendiente y su mínimo en la cobertura de barbecho. La UH intervenida presenta un valor máximo en la zona de arbusto denso con una diferencia notoria frente a las demás coberturas. La UH intervenida mantiene su valor máximo en la zona de arbusto denso, con valores muy cercanos de la zona de barbecho y cultivo de papa.

Se observa una relación directa entre la profundidad y la porosidad total, ya que los valores de porosidad total disminuyen con la profundidad de la muestra. Es destacable el comportamiento de la porosidad en la zona de barbecho puesto que aumenta con la profundidad, esto puede atribuirse a que es una zona de descanso y antes de serlo era usada para cultivos (Godoy & Medina, 2019). La alta porosidad junto a otras propiedades como la baja densidad y alta capacidad de retención de agua pueden determinar una alta capacidad de infiltración, por lo tanto bajos caudales de escorrentía (Suescún et al. 2017), teniendo esto en cuenta es posible afirmar que en la zona de arbusto denso de la UH intervenida la escorrentía no es de gran relevancia para el transporte de nutrientes, lo cual corrobora las bajas concentraciones de nitrógeno obtenidas en el nacimiento de esta UH, que es donde según el Anexo 8 se encuentra

arbusto denso, ya que al haber bajos caudales de escorrentía el nitrógeno no se solubiliza en estos y por lo tanto no llega al cauce.

Alba & Salazar (2020) en su investigación no mencionan la presencia del nivel freático cercano a la superficie, sin embargo, al ser un ecosistema de páramo se puede deducir la presencia de un nivel freático cercano a la superficie, teniendo esto en cuenta, y como se puede observar en las Figuras 9 y 10 correspondientes a los resultados obtenidos de nitritos y nitratos respectivamente, en las cuales no hay diferencias significativas en las dos épocas de precipitación, se puede inferir que estos componentes se están transportando principalmente de manera subsuperficial. Por otro lado, en la UH no intervenida a pesar de que los valores de densidad aparente y porosidad son bastante similares en todas las coberturas, se puede observar que la vegetación nativa de páramo de baja pendiente tiene las características mencionadas anteriormente para favorecer la infiltración hasta la profundidad B, a mayor profundidad, es decir, en la profundidad C, la vegetación nativa de páramo de alta pendiente posee mayor capacidad de infiltración, la cual puede fomentar el transporte subsuperficial.

5.5.5 Humedad

En el anexo 7E, se observan los diferentes porcentajes de humedad en las coberturas estudiadas, se puede apreciar la disminución respecto al tipo de cobertura. Los menores valores se encuentran en las zonas de cultivo de cebolla y de papa, que se reducen en 20.49% con respecto a la vegetación natural de páramo (Godoy & Medina, 2019).

Los valores de humedad en las zonas de cultivo se encuentran por debajo del valor promedio hallado en la revisión de literatura realizada por Hernández & Plata (2018), que fue de

45.81%, en tanto a las zonas de vegetación nativa, si tiene un valor de humedad cercano al promedio en estas zonas de páramo.

Generalmente, al aumentar la humedad aumenta la resistencia de esfuerzos cortantes en el suelo (Singh & Thompson, 2016), haciéndolo menos susceptible a falla por condiciones ambientales. De esta manera se evidencia vulnerabilidad del suelo en las zonas con actividades antrópicas, que sumado a condiciones analizadas anteriormente pueden llevar al transporte de nutrientes desde estas zonas hasta las fuentes de agua superficial por medio de la erosión o escorrentía superficial. Igualmente, Hernández & Plata (2018) encontraron que la pendiente y la geomorfología de la cuenca contribuyen al contenido de humedad, pero este se ve mayormente afectado por el pisoteo del ganado.

5.6.6 Textura

En el anexo 7F, se muestran los contenidos de arena, limo y arcilla en las diferentes coberturas estudiadas en ambas UH. Las texturas se clasificaron en franco arcillosa para las zonas de arbusto denso y de cultivo de papa y cebolla, y franco arenoso para la zona de barbecho y vegetación nativa de páramo con alta y baja pendiente (Alba & Salazar, 2020). Asare et al. (1997) determinaron que suelos con textura franco arcillosa son más susceptibles a la erosión que aquellos con textura franco arenosa por lo tanto se puede afirmar que las zonas con cultivos y arbusto denso son más susceptibles a la erosión, esto se vio reflejado de igual forma en los resultados de sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sólidos totales ya que, presentan un aumento en el cierre de la UH intervenida el cual está justo después de las zonas de cultivo (Anexo 8).

De igual manera Ouyang et al. (2018) encontraron que suelos con poco limo, arcilla y materia orgánica favorecen la erosión, teniendo esto en cuenta, a pesar de que los suelos en las zonas con vegetación nativa de alta pendiente se clasifican con texturas franco arenosas se puede afirmar que es un tipo de cobertura propenso a la erosión debido a que presenta bajo contenido de limo y arcilla. Las zonas de cultivo y de arbusto denso tienen un contenido de arcilla entre 32% y 38% por lo que la precipitación puede dispersar las partículas finas de arcilla y formar una capa impermeable en la superficie que desacelere la tasa de percolación del agua hacia el subsuelo, disminuyendo su capacidad de infiltración según lo mencionado por Chandna et al. (2011). Por lo tanto, según la textura del suelo en estudio, se puede afirmar que las zonas de arbusto denso y de cultivo de papa y cebolla son más susceptibles a la erosión y la escorrentía.

6. Conclusiones

En la caracterización de la práctica agrícola se identificaron métodos de preparación del suelo, patrones de riego, calendario de cultivo, dosificación y composición de fertilizantes utilizados. Se encontró que estas prácticas son comúnmente usadas en los cultivos de páramo analizados y que además hay evidencia de que estas prácticas aportan 3 veces más nitrógeno del recomendado por entidades estatales. Esto puede indicar que los agroquímicos utilizados en las prácticas agrícolas generan un exceso de nutrientes en la UH intervenida.

Se encontró que la cobertura vegetal, las propiedades hidrofísicas y la pendiente favorecen los mecanismos de transporte estudiados, a su vez, la precipitación fue determinante en el transporte de las formas de nitrógeno analizadas. Se identificó que la cobertura de cultivos favoreció el transporte de nutrientes debido a que en esta zona se aplican directamente los

agroquímicos, de igual forma, en esta cobertura se fomenta la escorrentía debido a su bajo porcentaje de humedad, alta densidad aparente y alto contenido de arcillas, además, es susceptible a la erosión por su bajo contenido de materia orgánica, bajo porcentaje de humedad y su textura franco arcillosa.

Por otro lado, la cobertura de arbusto denso es susceptible a la erosión y escorrentía debido a su textura franco arcillosa, mientras que la vegetación nativa de baja pendiente fomenta mayor infiltración a causa de su alta porosidad, finalmente, la cobertura de vegetación nativa de alta pendiente favorece la escorrentía por su alto contenido de arcillas.

Desde la perspectiva de UH intervenida y UH no intervenida, la UH intervenida fomenta la escorrentía debido a la interrelación entre la alta densidad aparente y la alta pendiente, así como, la baja humedad, la cual puede ser generada por la presencia de ganadería, esta última propiedad hidrofísica también favorece la erosión en la UH. Por otro lado, en la UH no intervenida todas las coberturas presentan valores favorables de densidad aparente que facilitan la retención de agua, es decir, la infiltración.

Del análisis de calidad del agua realizado durante la época seca y lluviosa analizando las nacientes y cierres de las UH, se puede concluir que se fomenta el transporte de las formas de nitrógeno (nitrógeno total, nitrógeno orgánico y nitritos) debido a la temporada de lluvia que concuerda con la alta solubilidad de este compuesto, a excepción de los nitratos que presenta mayores concentraciones en temporada seca. De igual forma se observó que el aumento del nitrógeno se dio a lo largo del cauce de la UH intervenida obteniendo mayores concentraciones en el cierre de ésta en donde se encuentra la zona de cultivos.

La zona de estudio presenta pendientes altas que favorecen la erosión y la escorrentía en gran parte de su área, incluso alrededor del cauce, lo cual fomenta el transporte de las formas de fósforo estudiadas (fósforo reactivo soluble y fósforo total). Además, no se observó afectación en la concentración de fósforo reactivo soluble por la precipitación, sin embargo, fue mayor en el cierre de la UH intervenida, lo cual se puede relacionar con la erosión en esta zona y con la aplicación de fósforo por medio de fertilizantes en los cultivos. Finalmente, en los sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos totales, se observaron diferencias entre las nacientes y cierres de las UH, principalmente en sólidos totales y sólidos disueltos totales cuyas concentraciones tienen un marcado incremento a lo largo del cauce de la UH intervenida, esto denota un transporte de sólidos asociado a la erosión.

Los resultados obtenidos en este proyecto pueden orientar las futuras investigaciones en la zona de estudio enfocadas en las prácticas de conservación del suelo, en el estudio de las dosis necesarias de agroquímicos para no generar excesos de nutrientes en el sistema, en la viabilidad de franjas de atenuación y en el estudio de las altas pendientes alrededor del cauce que están fomentando la erosión.

Referencias Bibliográfica

- Abella, J & Martínez, M. (2012). Contribution of a tributary stream to eutrophication of lake tota (Boyacá, Colombia) ,” *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 41, no. 2, pp. 243–262.
- Alba, W & Salazar, J. (2020). “Análisis del efecto del cambio del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en el Páramo de Berlín (Santander).” Universidad Industrial de Santander.
- Alexiades, A., Encalada, A., Lessmann, J & Guayasamin, J. (2019). Spatial prediction of stream physicochemical parameters for the Napo River Basin, Ecuador. *J. Freshw. Ecol.*, vol. 34, no. 1, pp. 247–261, doi: 10.1080/02705060.2018.1542353.
- American Society for Testing and Materials. (2010). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass: ASTM D 2216-05*. ASTM International.
- Andrade, O., Kappas, M., & Erasmi, S. (2010). Assessment of erosion hazard in Torres municipality of Lara State (Venezuela) based on GIS. *Interciencia*, vol. 35, no. 5, pp. 348–356.
- Ao, S., Chiu, M., Li, X., Tan, L., Cai, Q., & Ye, L. (2021). Watershed farmland area and instream water quality co-determine the stream primary producer in the central Hengduan Mountains, southwestern China. *Sci. Total Environ.*, vol. 770, p. 145267, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145267>.

- Asare, S., Rudra, R., Dickinson, W., & Wall, G. (1997). Frequency of freeze-thaw cycles, bulk density and saturation effects on soil surface shear and aggregate stability in resisting water erosion. *Can. Agric. Eng.*, vol. 39, no. 4, pp. 273–280.
- Avellaneda, L., Sicard, T., & Rojas, E. (2018). Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of Neotropical high Andean Páramo ecosystem soils. *Sci. Total Environ.*, vol. 631–632, pp. 1600–1610, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.137>.
- Benavides, I., Solarte, M., 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*, vol. 73, no. 4, pp. 400–410.
- Briones, R., Ella, V., & Bantayan, N. (2016). Hydrologic impact evaluation of land use and land cover change in Palico Watershed, Batangas, Philippines Using the SWAT model. *J. Environ. Sci. Manag.*, vol. 19, no. 1, pp. 96–107.
- Celikkol, B. & Guven, E. (2017). n the Presence of Climate Change, the Use of Fertilizers and the Effect of Income on Agricultural Emissions,” *Sustainability* , vol. 9, no. 11. , doi: 10.3390/su9111989.
- Chandna, P., Khurana, M., Ladha, J., Punia, M., Mehla, R & Gupta, R. (2011). Spatial and seasonal distribution of nitrate-N in groundwater beneath the rice–wheat cropping system of India: a geospatial analysis. *Environ. Monit. Assess.*, vol. 178, no. 1–4, pp. 545–562, doi: 10.1007/s10661-010-1712-0.

Estupiñán, L. (2001). Los páramos, ecosistemas para conservar.

Fao. (2002). *Los Fertilizantes y Su USO una Guia de Bolsillo para los Oficiales de Extension*.
Food & Agriculture Org.

Fattet, M., Fu, Y., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulous, J & Stokes, A. (2011).
Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate
stability and shear strength. *Catena*, vol. 87, no. 1, pp. 60–69.

Flores, F., Easton, Z., Geohring, L & Steenhuis, T. (2011). Factors affecting dissolved
phosphorus and nitrate concentrations in ground and surface water for a valley dairy farm
in the northeastern United States. *Water environment research*, 83(2), 116-127.

Grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental GPH-UIS. (2020) .
“Análisis Participativo de la Influencia del Uso del Suelo en los Servicios Hidrológicos
de Suministro y Regulación Ofertados por el Ecosistema de Páramo Seco. Caso: Berlín
(Complejo Santurbán, Santander – Colombia),” Universidad Industrial de Santander UIS.

Gao, C., Cheng, J., Li, F., Zhang, H., Yang, F., & Dai, J. (2019). Experimental study of
herbaceous structure effects on reducing nutrient loss. *Polish Journal of Environmental
Studies*, vol. 28, no. 3, pp. 1675–1685, doi: 10.15244/pjoes/89902.

Godoy, D & Medina, H. (2019). Caracterización Y Clasificación De La Cobertura De Suelo De
Páramo Mediante Metodología De Cuencas Pareadas. Caso De Estudio: Páramo De
Berlín (Santander). *Revista de la facultad de ingenierías físico-mecánicas*. Universidad
Industrial de Santander, pp. 1–23.

- Gómez, G & Quintero, J. (2020). Análisis del efecto de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua superficial en el páramo de Berlín (Santander-Colombia) en época seca. Universidad Industrial de Santander.
- González, M., Huguet, C., Pearse, J., McIntyre, N., & Camacho, L. (2019). Assessment of potential contamination of Paramo soil and downstream water supplies in a coal-mining region of Colombia. *Appl. Geochemistry*, vol. 108, p. 104382, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104382>.
- Guhl, E. (1982). *Los paramos circundantes de la Sabana de Bogota: Su ecología y su importancia para el regimen hidrológico de la misma*. Jardin Botanico" José Celestino Mutis".
- Harden, C. (2006). Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology*, vol. 79, no. 3–4, pp. 249–263.
- He, Z., Weng, H., Ho, H., Ran, Q., & Mao, M. (2014). Soil erosion and pollutant transport during rainfall-runoff processes. *Water Resour.*, vol. 41, no. 5, pp. 604–611, doi: 10.1134/S0097807814050170.
- Hernández, Y & Plata, C. (2018). “Revisión sistemática de literatura acerca de los parámetros del suelo que afectan la cantidad de agua en los páramos andinos.” Universidad Industrial de Santander.
- Hofstede, R. (1995). Effects of livestock farming and recommendations for management and conservation of paramo grasslands (Colombia). *L. Degrad. Dev.*, vol. 6, no. 3, pp. 133–147.

- I.G. A. C. . S. Agrológica and C. D. A. N. de Estadístic. (2000). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Cundinamarca*, vol. 2. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología.
- Kinnell, P. (2016). A review of the design and operation of runoff and soil loss plots. *CATENA*, vol. 145, pp. 257–265, doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.013>.
- Knisel, W. (1980). *CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems* (No. 26). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Lai, C., Wang, Z., Chen, X., Xu, C. Y., Yang, B., Meng, Q., & Huang, B. (2016). A procedure for assessing the impacts of land-cover change on soil erosion at basin scale. *Hydrology Research*, 47(5), 903-918, doi: 10.2166/nh.2015.094.
- Matute, E. (2019). Variación de clorofila del perifiton en riachuelos de los Páramos en el Macizo del Cajas, Sur del Ecuador (Bachelor's thesis). Universidad del Azuay, Ecuador.
- Otero, J., Figueroa, A., Muñoz, F & Peña, M. (2011). Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area. *Ecol. Eng.*, vol. 37, no. 12, pp. 2035–2043, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.001>.
- Ouyang, W., Wu, Y., Hao, Z., Zhang, Q., Bu, Q., & Gao, X. (2018). Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. *Sci. Total Environ.*, vol. 613–614, pp. 798–809, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.173>.

- Peralta J. (2019). *Determinación del caudal y calidad de agua mediante bioindicadores en los páramos de la comunidad El Calvario, ubicado en el cantón Tisaleo, provincia de Tungurahua* (Bachelor's thesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Ecuador.
- Pérez, J. (2014). Uso de los fertilizantes y su impacto en la producción agrícola. *Escuela de Biociencias. Univ. Nac. Colomb.*
- Ramos, M., Lizaga, I., Gaspar, L., Quijano, L., & Navas, A. (2019). Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorous losses in soils with different use and soil hydrological properties. *Agric. Water Manag.*, vol. 226, doi: 10.1016/j.agwat.2019.105789.
- Ribbe, L., Delgado, P., Salgado, E., & Flügel, W. (2008). Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pocochay watershed, Chile. *Desalination*, vol. 226, no. 1, pp. 13–20, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.232>.
- Rickert, B., Chorus, I & Schmoll, O. (2016). *Protecting surface water for health. Identifying, assessing and managing drinking-water quality risks in surface-water catchments*. World Health Organization.
- Rincón, L. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Ingeniare*, (19), 127-136.
- Robineau, O., Châtelet, M., Soulard, C., Michel-Dounias, I & Posner, J. (2010). Integrating farming and paramo conservation: A case study from Colombia. *Mt. Res. Dev.*, vol. 30, no. 3, pp. 212–221, doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00048.1.
- Ruiz, D., Idrobo, J., Sarmiento, J & Casas, A. (2017). Effects of productive activities on the

- water quality for human consumption in an Andean basin, a case study. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 33, no. 3, pp. 361–375.
- Sagasta, J., Zadeh, S & Turrall, H. (2018). More people, more food, worse water?: a global review of water pollution from agriculture.
- Singh, H & Thompson, A. (2016). Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds. *Geoderma*, vol. 262, pp. 165–173.
- Suescún, D., Villegas, J., León, J., Flórez, C., García, V., & Correa, G. (2017). Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, vol. 17, no. 3, pp. 827–839, doi: 10.1007/s10113-016-1071-7.
- Villarroya, J., Farias, H., & Amarilla, M. (s.f). Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC: Automatización del cálculo mediante SIG y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo.
- Wang, B., Zheng, F & Römken, M. (2013). Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database, *Acta Agric. Scand. Sect. B — Soil Plant Sci.*, vol. 63, no. 1, pp. 69–79, doi: 10.1080/09064710.2012.718358.
- Wang, B., Zheng, F., & Römken, M. (2013). Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 63(1), 69-79.

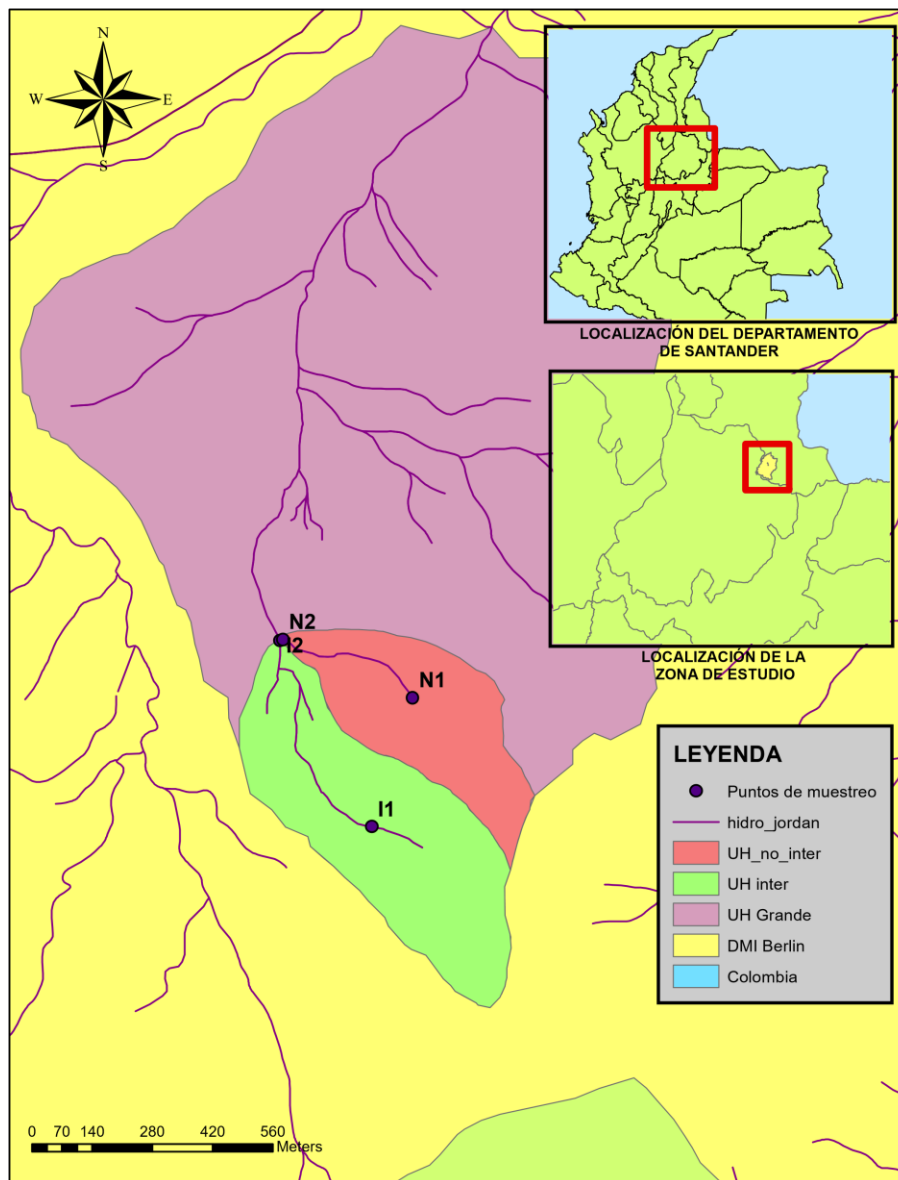
- Wischmeier, W & Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Wu, L., He, Y., & Ma, X. (2020). Can soil conservation practices reshape the relationship between sediment yield and slope gradient?. *Ecological Engineering*, vol. 142, 2020, doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.105630.
- Wu, L., Li, G., Jiang, J., & Ma, X. (2019). Using vegetation correction coefficient to modify a dynamic particulate nutrient loss model for monthly nitrogen and phosphorus load predictions: a case study in a small loess hilly watershed. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(31), 32610-32623, doi: 10.1007/s11356-019-06564-2.
- Wu, Y., He, G., Ouyang, W., & Huang, L. (2020). Differences in soil water content and movement drivers of runoff under climate variations in a high-altitude catchment. *Journal of Hydrology*, vol. 587, p. 125024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125024>.
- Zhang, R., Li, M., Yuan, X., & Pan, Z. (2019). Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 33, pp. 33963–33975, doi: 10.1007/s11356-018-2999-6.
- Zhang, W., Sun, F., Liu, M., & Li, C. (2017). Quantifying the Relationships of Impact Factors on Non-Point Source Pollution Using the Boosted Regression Tree Algorithm. *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 26, no. 1, pp. 403–411, doi: 10.15244/pjoes/64381.
- Zhuang, Y., Hong, S., Zhan, F. B., & Zhang, L. (2015). Influencing factor analysis of phosphorus loads from non-point source: a case study in central China. *Environ. Monit.*

Assess., vol. 187, no. 11, doi: 10.1007/s10661-015-4946-z.

Zuazo, V., Raya, A & Ruiz, J. (2004). Nutrient losses by runoff and sediment from the taluses of orchard terraces. *Water, Air, and Soil Pollution*, 153(1), 355-373, doi: 10.1023/B:WATE.0000019956.17314.88.

Apéndices

Apéndice A. Mapa de localización de la zona de estudio



N1: Nacimiento UH no intervenida
N2: Cierre UH no intervenida
I1: Nacimiento UH intervenida
I2: Cierre UH intervenida

Fuente: Elaboración propia

Apéndice B. Cuadro de las condiciones ambientales estudiadas, con su respectiva combinación de palabras claves y los resultados de cada filtro

Resultados revisión de literatura

Criterio de Búsqueda	Combinación de palabras clave	Resultados netos	Resultados Incluidos	Resultados NO repetidos	Filtro por título	Filtro por resumen	Filtro por contenido
Pendientes del terreno	Water AND (agriculture OR tillage) AND nutrients AND ("high altitude" OR "high mountain" OR paramo OR andes) AND ("non point source" OR "nonpoint source" OR "diffuse pollution") AND (slope OR topography) AND (runoff OR erosion OR rainfall OR infiltration OR "soil loss" OR "subsurface flow")	112	36	36	23	10	9
Precipitación	Water AND (agriculture OR tillage) AND nutrients AND ("high altitude" OR "high mountain" OR paramo OR andes) AND ("non point source" OR "nonpoint source" OR "diffuse pollution") AND (rainfall OR precipitation OR hydrograph) AND (runoff OR erosion OR infiltration OR "soil loss" OR "subsurface flow")	138	48	19	12	2	1
Cobertura vegetal	Water AND (agriculture OR tillage) AND nutrients AND ("high altitude" OR "high mountain" OR paramo OR andes) AND ("non point source" OR "nonpoint source" OR "diffuse pollution") AND ("vegetation cover" OR forest OR "horticultural crops" OR crocket OR pasture OR fallow) AND (runoff OR erosion OR rainfall OR infiltration OR "soil loss" OR "subsurface flow")	153	54	11	6	1	1
Propiedades hidrofísicas del suelo	Water AND (agriculture OR tillage) AND nutrients AND ("high altitude" OR "high mountain" OR paramo OR andes) AND ("non point source" OR "nonpoint source" OR "diffuse pollution") AND (ph OR "field capacity" OR "organic material" OR clay OR mud OR sand OR porosity OR humidity) AND (runoff OR erosion OR rainfall OR infiltration OR "soil loss" OR "subsurface flow")	96	35	7	6	4	4

Fuente: Elaboración propia

Apéndice C. Cuadro con información general de los 15 artículos científicos seleccionados.**Información general artículos científicos**

No.	Título del artículo	Año de publicación	País de publicación	Revista de publicación	Autores
1	Differences in soil water content and movement drivers of runoff under climate variations in a high-altitude catchment	2020	China	Journal of Hydrology	Yuyang Wu, Guojian He, Wei Ouyang, Lei Huang
2	Experimental study of herbaceous structure effects on reducing nutrient loss	2019	China	Polish Journal of Environmental Studies	Chunni Gao, Jinhua Cheng, Fei Li, Hongjiang Zhang, Fan Yang, Jinjun Dai
3	Spatio-temporal variation of erosion-type non-point source pollution in a small watershed of hilly and gully region, Chinese Loess Plateau	2016	China	Environmental Science and Pollution Research	Lei Wu, Xia Liu, Xiaoyi Ma
4	Influencing factor analysis of phosphorus loads from non-point source: a case study in central China	2015	China	Environmental Monitoring and Assessment	Yanhua Zhuang, Song Hong, F. Benjamin Zhan, Liang Zhan
5	Nutrient losses by runoff and sediment from the taluses of orchard terraces	2004	España	Water, Air, and Soil Pollution	Victor Hugo Durán Zuazo, Amando Martínez-Raya, José Aguilar-Ruiz
6	Effects of productive activities on the water quality for human consumption in an Andean basin, a case study	2017	Colombia	Revista Internacional de Contaminación Ambiental	Diana Marcela Ruiz, Juan Pablo Martínez Idrobo, Juan Diego Otero Sarmiento, Apolinar Figueroa-Casas
7	Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff	2019	China	Environmental Science and Pollution Research	Rui Zhang, Min Li, Xi Yang, Zhongcheng Pan
8	Quantifying the relationships of impact factors on non-point source pollution using the boosted regression tree algorithm	2017	China	Polish Journal of Environmental Studies	Wei Zhang, Fengyun Sun, Miao Liu, Chunlin Li
9	Using vegetation correction coefficient to modify a dynamic particulate nutrient loss model for monthly nitrogen and phosphorus load predictions: a case study in a small loess hilly watershed	2019	China	Environmental Science and Pollution Research	Lei Wu, Gouxia Li, Jun Jiang, Xiaoyi Ma
10	Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pochay watershed, Chile	2008	Alemania	Desalination	Lars Ribbe, P. Delgado, Eduardo Varas Salgado, Wolfgang Albert Flügel
11	Factors Affecting Dissolved Phosphorus and Nitrate Concentrations in Ground and Surface Water for a Valley Dairy Farm in the Northeastern United States	2011	Estados Unidos	Water Environment Research	Francisco Flores-López, Zachary M. Easton, Larry Duane Geohring, Tammo S. Steenhuis
12	Effect of land use/cover changes on runoff in the Min River watershed	2020	China	River Research and Applications	Kai Ma, Xiaorong Huang, Chuan Liang, Hongbin Zhao, Xingyu Zhou, Xiaoyue Wei
13	Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development	2018	China	Science of the Total Environment	Wei Ouyang, Yuyang Wu, Zengchao Hao, Qi Zhang, Qingwei Bu, Xiang Gao
14	Soil erosion and pollutant transport during rainfall-runoff processes	2014	China	Water Resources	Zhiguo He, Haoxuan Weng, Haoche Ho, Qihua Ran, Miaohua Mao
15	Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorus losses in soils with different use and soil hydrological properties	2019	España	Agricultural Water Management	Ramos, M.C., Lizaga, I., Gaspar, L., Quijano, L., Navas, A.
16	Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area,	2011	Colombia	Ecological Engineering	Otero, J.D., Figueroa, A., Muñoz, F.A., Peña, M.R.
17	Assessment of erosion hazard in Torres municipality of Lara State (Venezuela)	2010	Venezuela	Interciencia	Andrade, O., Kappas, M., Erasmí, S.

No.	Título del artículo	País del estudio	Zona de estudio	Tipo de área de estudio	Área de estudio	Altitud máxima [m.s.n.m]
1	Differences in soil water content and movement drivers of runoff under climate variations in a high-altitude catchment	China	Rio Jinsha	Subcuenca	-	6621
2	Experimental study of herbaceous structure effects on reducing nutrient loss	China	Beijing	Parcela	2x0.5 m	125
3	Spatio-temporal variation of erosion-type non-point source pollution in a small watershed of hilly and gully region, Chinese Loess Plateau	China	Rio Majiagou	Cuenca	73.83 Km ²	1100
4	Influencing factor analysis of phosphorus loads from non-point source: a case study in central China	China	Tangxun	Cuenca	260.64 Km ²	247
5	Nutrient losses by runoff and sediment from the taluses of orchard terraces	España	Andalucía	Parcela	menor a 100 m ²	180
6	Effects of productive activities on the water quality for human consumption in an Andean basin, a case study	Colombia	Rio las piedras	Cuenca	66.26 Km ²	3150
7	Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff	China	Beijing	Parcela	1x0.3 m	170
8	Quantifying the relationships of impact factors on non-point source pollution using the boosted regression tree algorithm	China	Rio Fan	Cuenca	1037.66 Km ²	1181
9	Using vegetation correction coefficient to modify a dynamic particulate nutrient loss model for monthly nitrogen and phosphorus load predictions: a case study in a small loess hilly watershed	China	La cuenca de Zhifanggou	Cuenca	8.27 Km ²	1420
10	Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pocochay watershed, Chile	Chile	Pocochay, Aconcagua	Cuenca	93 Km ²	1828
11	Factors Affecting Dissolved Phosphorus and Nitrate Concentrations in Ground and Surface Water for a Valley Dairy Farm in the Northeastern United States	Estados Unidos	Cannonsville, NY	Subcuenca	0.19 Km ²	600
12	Effect of land use/cover changes on runoff in the Min River watershed	China	Rio Min	Cuenca	22500 Km ²	6054
13	Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development	China	Rio Abujiao	Cuenca	142.5 Km ²	209
14	Soil erosion and pollutant transport during rainfall-runoff processes	China	Loess, Plateau	Parcela	3X1X0.5 m	1500
15	Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorous losses in soils with different use and soil hydrological properties	España	Sierra de Santo Domingo	Parcela	-	-
16	Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area,	Colombia	Páramo Purace	Parcela	10x6 m	3260
17	Assessment of erosion hazard in Torres municipality of Lara State (Venezuela)	Venezuela	Rio Tocuyo	Cuenca	6954 Km ²	2324

Fuente: Elaboración propia

Apéndice D. Cuadro con información del estudio realizado en los 15 artículos científicos seleccionados.

No.	Título del artículo	Condiciones ambientales			
		Pendiente	Cobertura vegetal	Precipitación	Prop. Hidrofísicas
1	Differences in soil water content and movement drivers of runoff under climate variations in a high-altitude catchment		X	X	X
2	Experimental study of herbaceous structure effects on reducing nutrient loss		X	X	
3	Spatio-temporal variation of erosion-type non-point source pollution in a small watershed of hilly and gully region, Chinese Loess Plateau	X	X	X	X
4	Influencing factor analysis of phosphorus loads from non-point source: a case study in central China	X	X	X	X
5	Nutrient losses by runoff and sediment from the taluses of orchard terraces	X	X	X	
6	Effects of productive activities on the water quality for human consumption in an Andean basin, a case study	X	X	X	
7	Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff	X	X	X	
8	Quantifying the relationships of impact factors on non-point source pollution using the boosted regression tree algorithm	X	X	X	
9	Using vegetation correction coefficient to modify a dynamic particulate nutrient loss model for monthly nitrogen and phosphorus load predictions: a case study in a small loess hilly watershed		X		
10	Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pochay watershed, Chile			X	
11	Factors Affecting Dissolved Phosphorus and Nitrate Concentrations in Ground and Surface Water for a Valley Dairy Farm in the Northeastern United States		X	X	
12	Effect of land use/cover changes on runoff in the Min River watershed	X	X	X	X
13	Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development				X
14	Soil erosion and pollutant transport during rainfall-runoff processes			X	
15	Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorous losses in soils with different use and soil hydrological properties	X		X	
16	Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area	X	X	X	X
17	Assessment of erosion hazard in Torres municipality of Lara State (Venezuela)	X	X	X	

Fuente: Elaboración propia

Información mecanismos de transporte artículos científicos

No.	Título del artículo	Pruebas estadística	Mecanismo de transporte		
			Erosión	F. Superficial	F. Subsuperficial
1	Differences in soil water content and movement drivers of runoff under climate variations in a high-altitude catchment	análisis estadístico multivariante y prueba de Spearman		SWAT	
2	Experimental study of herbaceous structure effects on reducing nutrient loss	ANOVA	Parcelas de escorrentía		
3	Spatio-temporal variation of erosion-type non-point source pollution in a small watershed of hilly and gully region, Chinese Loess Plateau	-	CSLE ecuación		
4	Influencing factor analysis of phosphorus loads from non-point source: a case study in central China	análisis de modelo lineal y SOM	SPSS		
5	Nutrient losses by runoff and sediment from the taluses of orchard terraces	-	Parcelas de escorrentía		
6	Effects of productive activities on the water quality for human consumption in an Andean basin, a case study	AKruskall Wallis y MannWhitneyU	Medición directa y simulación de lluvia		
7	Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff	regresión lineal múltiple	Parcelas de escorrentía		
8	Quantifying the relationships of impact factors on non-point source pollution using the boosted regression tree algorithm	árbol de regresión potenciado (BRT)	SWAT y R		
9	Using vegetation correction coefficient to modify a dynamic particulate nutrient loss model for monthly nitrogen and phosphorus load predictions: a case study in a small loess hilly watershed	-	RUSLE		
10	Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pochay watershed, Chile	-		Medición directa	
11	Factors Affecting Dissolved Phosphorus and Nitrate Concentrations in Ground and Surface Water for a Valley Dairy Farm in the Northeastern United States	Análisis de varianza y análisis de modelos mixtos con SPSS			Medición directa
12	Effect of land use/cover changes on runoff in the Min River watershed	-		SWAT	
13	Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development	-	USLE		
14	Soil erosion and pollutant transport during rainfall-runoff processes	-		Parcela de escorrentía	
15	Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorous losses in soils with different use and soil hydrological properties	Prueba de medias y análisis de varianza ANOVA	Parcelas de escorrentía		
16	Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area,	Mann - Whitney U, Wilcoxon W, Z y Sig asintótica. (bilateral)	Parcela de escorrentía		
17	Assessment of erosion hazard in Torres municipality of Lara State (Venezuela)	-	RUSLE		

Fuente: Elaboración propia

Apéndice E. Caracterización de la práctica agrícola.**Apéndice EA. Descripción de las prácticas agrícolas según calendario y cultivo**

Fuente: Adaptado de GPH-CPD-CEMOS (2020)

G. de investigación GPH-CPD-CEMOS, “Análisis Participativo de la Influencia del Uso del Suelo en los Servicios Hidrológicos de

CEBOLLA													
Número de cortes	Área	Calendario 2019											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.25 Ha	Arranca	Abona, fumiga y riega	Fumiga	Arranca	Abona y fumiga	Fumiga	Arranca	Abona, fumiga y riega	Fumiga	Arranca	Abona y fumiga	Fumiga
2	0.25 Ha	Fumiga	Arranca	Abona y fumiga	Fumiga	Arranca	Abona, fumiga y riega	Fumiga	Arranca	Abona y fumiga	Fumiga	Arranca	Abona, fumiga y riega
3	0.25 Ha	Abona, fumiga y riega	Fumiga	Arranca	Abona y fumiga	Fumiga	Arranca	Abona, fumiga y riega	Fumiga	Arranca	Abona y fumiga	Fumiga	Arranca

PAPA NEGRA													
Número de cortes	Área	Calendario 2019											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.5 Ha			Siembra			Florece				Arranca		
2	1.0 Ha					Siembra			Florece				Arranca

PAPA AMARILLA													
Número de cortes	Área	Calendario 2019											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	1.0 Ha			Siembra		Florece			Cosecha				
2	1.0 Ha								Siembra		Florece		cosecha
1	1.0 Ha								Siembra				

Suministro y Regulación Ofertados por el Ecosistema de Páramo Seco. Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander – Colombia),”
 Universidad Industrial de Santander UIS.

Apéndice EB. Caracterización de los agroquímicos empleados.

Agroquímico	Frecuencia de aplicación	Método de aplicación	Cantidad de aplicación	Cantidad de agua	Tipo de agroquímico	Composición
Pollinaza	c/3 meses	Manual	200 bultos/corte	N.A	Fertilizante orgánico	pH 9,5±0.02 Densidad 0.35 gr/cc Humedad(%) 25.8±0.2 Cenizas(%) 39±3 Nitrógeno(%) 2.3±0.2 Fósforo(%P ₂ O ₅) ... 4.6±0.2 Potasio (%K ₂ O) ... 2.1±0.1 M.O.(%) 39.6±8 C.O.(%) 23±5 C.I.C(meq/100) 125.0 Conductividad 4.1±0.1 ¹
Cal	c/año	Manual	20 bultos/corte	N.A	Acondicionador del suelo	CaCO ₃ equivalente91 % Ca(OH) ₂ 3.0 - 6.0 % Azufre (S) 1.5 - 2.0 % Magnesio (Mg) ... 0.8 - 1.8 % Humedad máxima 0.5 % pH 12.4 ²
Manzate	c/12 días	Manual	2 Kg	250 L	Fungicida	Mancozeb 80% Ingredientes inertes20% ³
Starmin	Sin información	Sin información	250 mL	250 L	Fertilizante orgánico	L-Aminoácidos 43.00% Nitrógeno (N) 7.00% Boro (B) 0.020% Hierro (Fe) 0.20% Zinc (Zn) 1.00% Manganeso (Mn) 0.020% Molibdeno (Mo) 0.005% Acondicionadores y Diluyentes 48.745% ⁴
Patrulla	c/12 días	Manual	50 mL	250 L	Fungicida	Ingredientes activos: Difenoconazole 125 g/L Kresoxim Methyl 250 g/L ⁵

Fuente: Elaboración propia

¹ Federación Nacional de Avicultores de Colombia, y Fondo Nacional Avícola. (2014). Estabilizador del suelo a partir de Gallinaza/Pollinaza. Tomado el 12 de enero del 2021 de https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/cartilla_estab_suelo_a_partir_de_gallinaza_pollinaza_dic2014.pdf

² SOPROCAL. (n.d.). Guía de uso Cal Agrícola. Tomado el 12 de enero del 2021 de https://puntoganadero.cl/imagenes/upload/_5cdc5dda3aa85.pdf

³ UNIPHOS COLOMBIA PLANT LIMITED. (2011). Hoja de datos de seguridad Fungicida Manzate 200 WP. Tomado el 12 de enero del 2021 de https://co.uplonline.com/download_links/LWNuirqHwNhv3vj7tYJMH7ZuL8Z4MpjzyYZSH3Lz/Hoja-De-Seguridad-Manzate-200-WP.pdf

⁴ DuxBiotech. (n.d.). Ficha Técnica Starmin50. Tomado el 12 de enero del 2021 de [http://www.duxbiotech.mx/2019a/F.T.STARMIN 50.pdf](http://www.duxbiotech.mx/2019a/F.T.STARMIN%2050.pdf)

⁵ QUIMICOS OMA S.A. (n.d.). Patrulla 375 SC. Tomado el 12 de enero del 2021 de http://www.ghcia.com.co/plm/source/productos/3287_58_167.htm

Apéndice F. Resultados de las pruebas estadísticas realizadas para los datos obtenidos en las campañas de muestreo de cada componente de calidad del agua.

Potencial de hidrogeno (pH)

Modelo lineal general: pH vs. Época; Punto

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	0,00926	0,009263	0,17	0,686
Punto	3	0,65142	0,217140	3,98	0,027
Época*Punto	3	0,07592	0,025305	0,46	0,711
Error	16	0,87253	0,054533		
Total	23	1,60913			

Conclusión: el valor p del factor “Punto” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para este factor.

Comparaciones para pH

Comparaciones por parejas de Tukey: Punto

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Punto	N	Media	Agrupación
I1	6	7,77042	A
I2	6	7,53982	A B
N1	6	7,43427	A B
N2	6	7,32468	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Punto	N	Media	Agrupación
I1	6	7,77042	A
I2	6	7,53982	A B
N1	6	7,43427	A B
N2	6	7,32468	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Conductividad eléctrica

Modelo lineal general: Conductividad eléctrica vs. Época; Punto

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	65,31	65,31	4,17	0,058
Punto	3	649,48	216,49	13,83	0,000
Época*Punto	3	212,13	70,71	4,52	0,018
Error	16	250,50	15,66		
Total	23	1177,42			

Conclusión: el valor p de los factores “Punto” y “Época*Punto” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para estos factores.

Comparaciones para Conductividad eléctrica**Comparaciones por parejas de Tukey: Punto****Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	45,2593	A
N2	6	39,3759	A B
N1	6	36,1497	B C
I1	6	30,9109	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	45,2593	A
N2	6	39,3759	B
N1	6	36,1497	B
I1	6	30,9109	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Tukey: Época*Punto**Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Época*Punto	N	Media	Agrupación
E1 I2	3	48,1908	A
E2 I2	3	42,3278	A B
E2 N2	3	41,5667	A B C
E2 N1	3	41,5389	A B C
E1 N2	3	37,1850	A B C D
E2 I1	3	32,8611	B C D
E1 N1	3	30,7604	C D
E1 I1	3	28,9607	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Época*Punto**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Época*Punto	N	Media	Agrupación
E1 I2	3	48,1908	A
E2 I2	3	42,3278	A B
E2 N2	3	41,5667	A B
E2 N1	3	41,5389	A B
E1 N2	3	37,1850	B C
E2 I1	3	32,8611	C D
E1 N1	3	30,7604	C D
E1 I1	3	28,9607	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Nitrógeno total

Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	0,9060	0,90598	13,87	0,002
Punto	3	7,2041	2,40137	36,75	0,000
Época*Punto	3	0,1404	0,04679	0,72	0,557
Error	16	1,0455	0,06534		
Total	23	9,2959			

Conclusión: el valor p de los factores “Punto” y “Época” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para estos factores.

Comparaciones para Concentración**Comparaciones por parejas de Tukey: Época****Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Época	N	Media	Agrupación
E2	12	1,07700	A
E1	12	0,68842	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Época**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Época	N	Media	Agrupación
E2	12	1,07700	A
E1	12	0,68842	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Tukey: Punto**Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	1,81850	A
N2	6	0,66883	B
N1	6	0,61833	B
I1	6	0,42517	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	1,81850	A
N2	6	0,66883	B
N1	6	0,61833	B
I1	6	0,42517	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Nitrógeno orgánico**Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto**

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	1.7334	1.73344	42.24	0.000
Punto	3	0.4183	0.13945	3.40	0.044
Época*Punto	3	0.2570	0.08567	2.09	0.142
Error	16	0.6566	0.04104		
Total	23	3.0654			

Conclusión: el valor p de los factores “Época” y “Punto” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para estos factores.

Comparaciones para Concentración**Comparaciones por parejas de Tukey: Época****Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Época	N	Media	Agrupación
E2	12	0.606667	A
E1	12	0.069167	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Época**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Época	N	Media	Agrupación
E2	12	0.606667	A
E1	12	0.069167	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Tukey: Punto**Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Punto	N	Media	Agrupación
N1	6	0.455000	A
I2	6	0.446667	A
N2	6	0.321667	A
I1	6	0.128333	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Punto	N	Media	Agrupación
N1	6	0.455000	A
I2	6	0.446667	A
N2	6	0.321667	A
I1	6	0.128333	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Nitrógeno amoniacal**Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto**

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	0.01870	0.01870	1.01	0.331
Punto	3	0.09025	0.03008	1.62	0.224
Época*Punto	3	0.04875	0.01625	0.87	0.475
Error	16	0.29720	0.01857		
Total	23	0.45490			

Conclusión: el valor p de los factores analizados es superior a la significancia (0.05), por lo tanto, no se presentan diferencias significativas.

Nitritos**Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto****Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	0.000077	0.000077	5.39	0.034
Punto	3	0.000001	0.000000	0.02	0.996
Época*Punto	3	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Error	16	0.000229	0.000014		
Total	23	0.000307			

Conclusión: el valor p del factor “Época” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para este factor.

Comparaciones para Concentración**Comparaciones por parejas de Tukey: Época****Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Época	N	Media	Agrupación
E2	12	0.0036667	A
E1	12	0.0000833	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Época**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Época	N	Media	Agrupación
E2	12	0.0036667	A
E1	12	0.0000833	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Nitratos**Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto****Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	0.05607	0.05607	5.93	0.027
Punto	3	5.85668	1.95223	206.49	0.000
Época*Punto	3	0.17217	0.05739	6.07	0.006
Error	16	0.15127	0.00945		
Total	23	6.23618			

Conclusión: el valor p de los factores “Época”, “Punto” y “Época*Punto” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para estos factores.

Comparaciones para Concentración

Comparaciones por parejas de Tukey: Época

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Época	N	Media	Agrupación
E1	12	0.404167	A
E2	12	0.307500	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Época

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Época	N	Media	Agrupación
E1	12	0.404167	A
E2	12	0.307500	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Tukey: Punto

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	1.20167	A
N2	6	0.19500	B
N1	6	0.02333	C
I1	6	0.00333	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	1.20167	A
N2	6	0.19500	B
N1	6	0.02333	C
I1	6	0.00333	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Comparaciones por parejas de Tukey: Época*Punto

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Época*Punto	N	Media	Agrupación
E1 I2	3	1.39667	A
E2 I2	3	1.00667	B
E1 N2	3	0.19667	C
E2 N2	3	0.19333	C
E2 N1	3	0.02333	C
E1 N1	3	0.02333	C
E2 I1	3	0.00667	C
E1 I1	3	-0.00000	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Época*Punto

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Época*Punto	N	Media	Agrupación
E1 I2	3	1.39667	A
E2 I2	3	1.00667	B
E1 N2	3	0.19667	C
E2 N2	3	0.19333	C
E2 N1	3	0.02333	D
E1 N1	3	0.02333	D
E2 I1	3	0.00667	D
E1 I1	3	-0.00000	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Fósforo reactivo soluble

Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	0.000057	0.000057	2.34	0.146
Punto	3	0.000513	0.000171	7.01	0.003
Época*Punto	3	0.000154	0.000051	2.10	0.140
Error	16	0.000391	0.000024		
Total	23	0.001115			

Conclusión: el valor p del factor “Punto” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para este factor.

Comparaciones para Concentración

Comparaciones por parejas de Tukey: Punto

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Punto	N	Media	Agrupación
N1	6	0.0251667	A
N2	6	0.0198333	A B
I2	6	0.0186667	A B
I1	6	0.0121667	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Punto	N	Media	Agrupación
N1	6	0.0251667	A
N2	6	0.0198333	A B
I2	6	0.0186667	B
I1	6	0.0121667	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fósforo total**Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto****Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	0.000003	0.000003	0.01	0.910
Punto	3	0.002136	0.000712	2.77	0.075
Época*Punto	3	0.001193	0.000398	1.55	0.240
Error	16	0.004105	0.000257		
Total	23	0.007438			

Conclusión: el valor p del factor “Punto” no es inferior a la significancia (0.05), sin embargo, se decidió realizar la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para este factor.

Comparaciones para Concentración**Comparaciones por parejas de Tukey: Punto****Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Punto	N	Media Agrupación
I2	6	0.0426667 A
N1	6	0.0410000 A
N2	6	0.0311667 A
I1	6	0.0190000 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	0.0426667 A	
N1	6	0.0410000 A	
N2	6	0.0311667 A	B
I1	6	0.0190000	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Sólidos Disueltos Totales**Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto****Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	5.70	5.704	0.37	0.554
Punto	3	786.64	262.212	16.83	0.000
Época*Punto	3	208.11	69.371	4.45	0.019
Error	16	249.30	15.581		
Total	23	1249.75			

Conclusión: el valor p de los factores “Punto” y “Época*Punto” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para estos factores.

Comparaciones para Concentración**Comparaciones por parejas de Tukey: Punto**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	51.3667	A
N2	6	46.1917	A B
N1	6	41.9750	B C
I1	6	35.7500	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	51.3667	A
N2	6	46.1917	B
N1	6	41.9750	B
I1	6	35.7500	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Tukey: Época*Punto**Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

Época*Punto	N	Media	Agrupación
E1 I2	3	56.4667	A
E1 N2	3	46.6333	A B
E2 I2	3	46.2667	A B
E2 N2	3	45.7500	A B
E2 N1	3	42.5500	B C
E1 N1	3	41.4000	B C
E2 I1	3	38.7667	B C
E1 I1	3	32.7333	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Época*Punto**Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%**

Época*Punto	N	Media	Agrupación
E1 I2	3	56.4667	A
E1 N2	3	46.6333	B
E2 I2	3	46.2667	B
E2 N2	3	45.7500	B
E2 N1	3	42.5500	B C
E1 N1	3	41.4000	B C
E2 I1	3	38.7667	C D
E1 I1	3	32.7333	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Sólidos suspendidos totales**Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto****Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	21,47	21,47	0,62	0,444

Punto	3	206,57	68,86	1,97	0,158
Época*Punto	3	165,93	55,31	1,59	0,232
Error	16	557,94	34,87		
Total	23	951,90			

Conclusión: el valor p de los factores analizados es superior a la significancia (0.05), por lo tanto, no se presentan diferencias significativas.

Sólidos totales

Modelo lineal general: Concentración vs. Época; Punto

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Época	1	5,04	5,042	0,08	0,778
Punto	3	1639,46	546,486	8,92	0,001
Época*Punto	3	280,46	93,486	1,53	0,246
Error	16	980,00	61,250		
Total	23	2904,96			

Conclusión: el valor p del factor “Punto” es inferior a la significancia (0.05) por lo tanto, se realiza la comparación por parejas de Tukey y LSD de Fisher para este factor.

Comparaciones para Concentración

Comparaciones por parejas de Tukey: Punto

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	61,6667	A
N2	6	51,1667	A B
N1	6	50,0000	A B
I1	6	38,3333	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Fisher: Punto

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

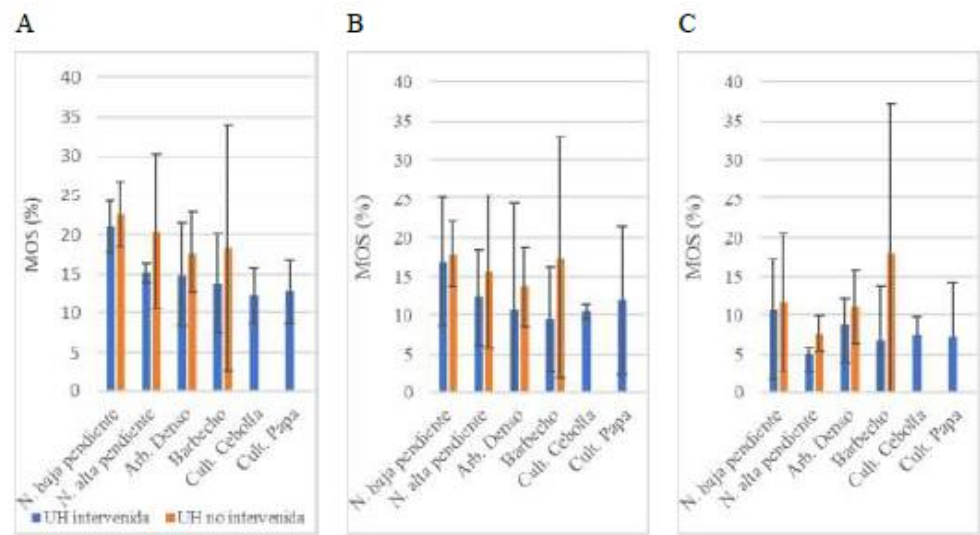
Punto	N	Media	Agrupación
I2	6	61,6667	A
N2	6	51,1667	B
N1	6	50,0000	B
I1	6	38,3333	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

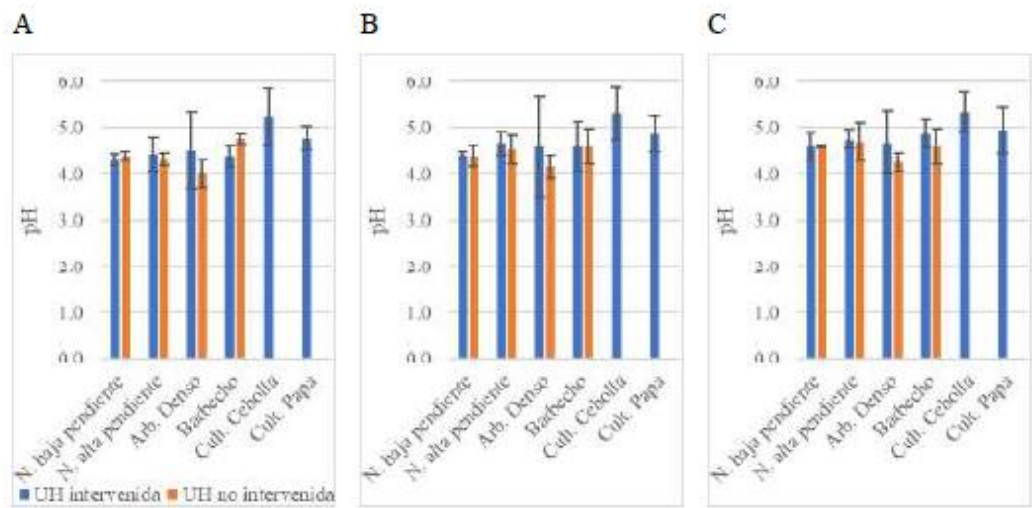
Apéndice G. Contraste de las propiedades hidrofísicas en las profundidades A: 0-5, B: 10-15, C: 20-25 cm

Nota: La totalidad de las gráficas son tomadas de Godoy y Medina (2019)

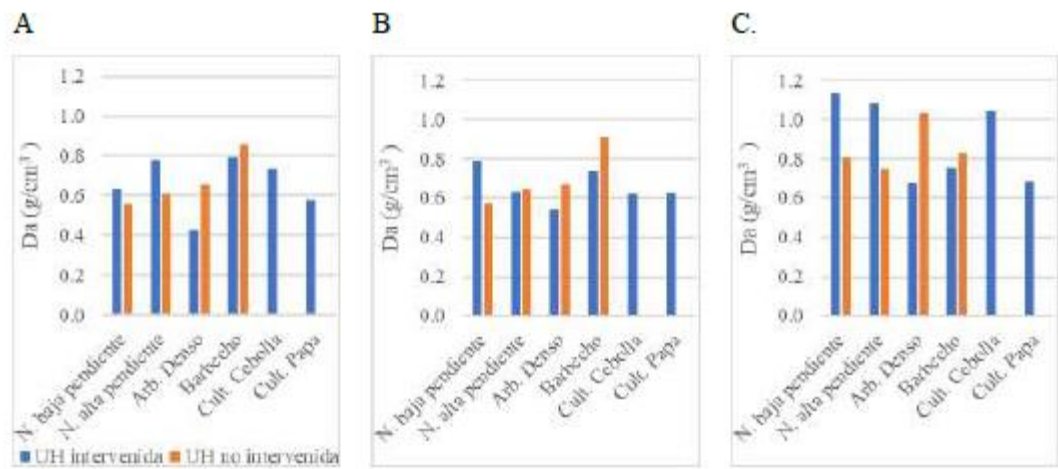
Propiedades hidrofísicas en las diferentes coberturas vegetales



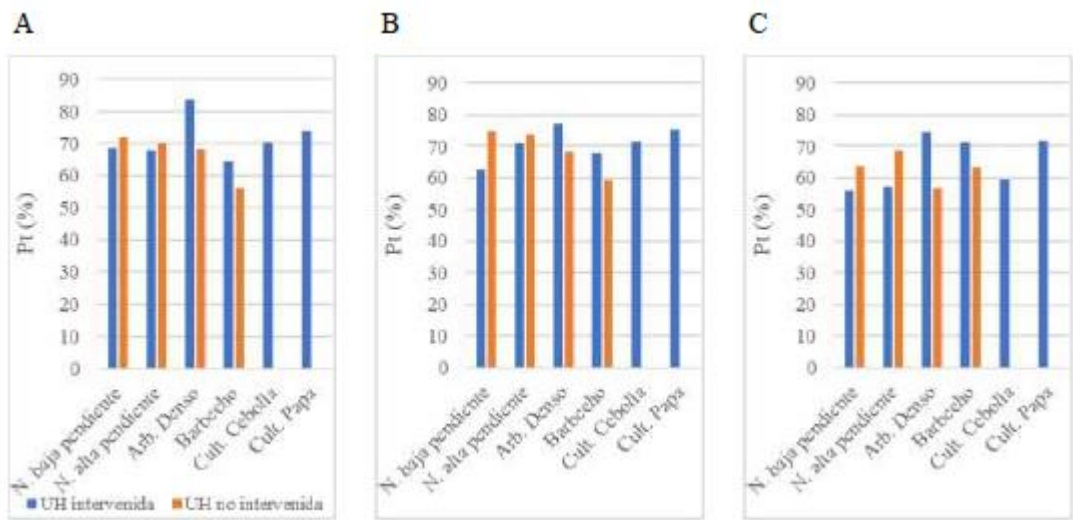
Apéndice G 1. Materia Orgánica.



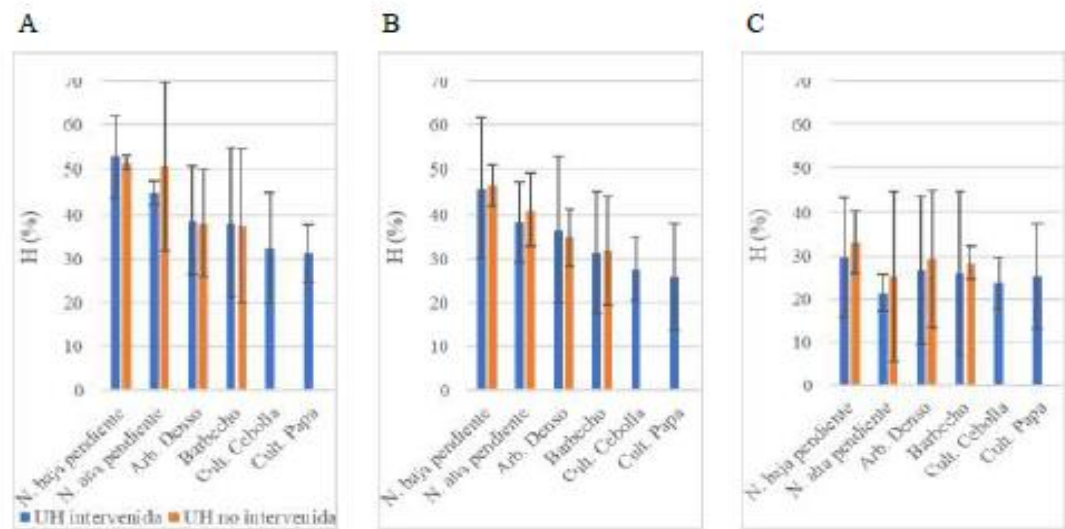
Apéndice G 2. Potencial de Hidrógeno (pH).



Apéndice G 3. Densidad Aparente.



Apéndice G 4. Porosidad Total.



Apéndice G5. Humedad.

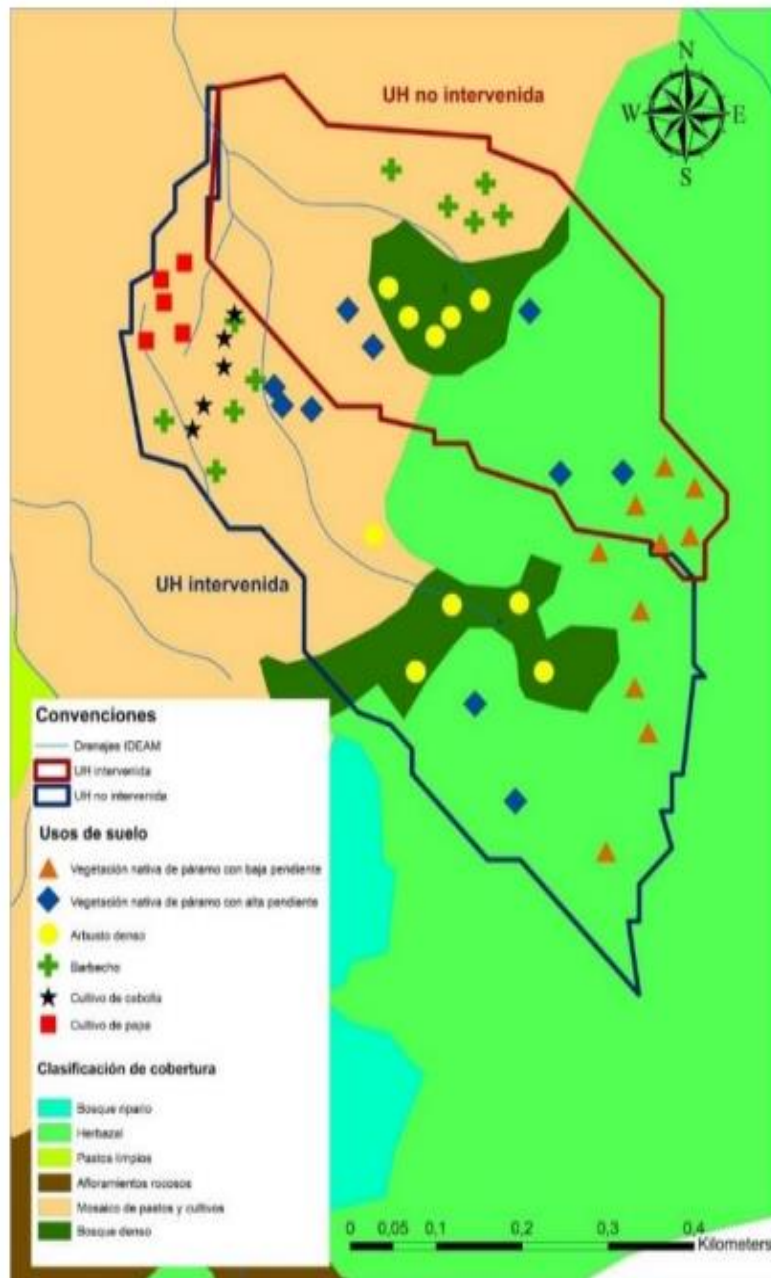
Textura en cada uso del suelo (arena, limo y arcilla).

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

Apéndice G 6. Textura del suelo.

Apéndice H. Mapa de clasificación de usos de suelo y cobertura vegetal

Nota: El mapa mostrado a continuación es tomado de Alba y Salazar (2020)

Mapa de clasificación de usos de suelo y cobertura vegetal

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