



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO**

DIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL CON MENCIÓN EN
RECURSOS HÍDRICOS**

TEMA:

**“PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS DEL SUELO COMO INSTRUMENTO
DE EVALUACION A LAS ESTRATEGIAS DE RECUPERACION: CASO DE
ESTUDIO MICROCUENCA ALTOANDINA (HUALCANGA) EN EL
PÁRAMO DEL CERRO IGUALATA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”**

AUTOR:

Ing. Brando Ariel Aillón Torres

TUTOR:

Ing. Carla Fernanda Silva Padilla, Mgs.

Riobamba – Ecuador

2025

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: **“Propiedades fisico-químicas del suelo como instrumento de evaluación a las estrategias de Recuperación: caso de estudio microcuenca altoandina (Hualcanga) en el páramo del cerro Igualata, provincia de Tungurahua”**, ha sido elaborado por el Ingeniero Brando Ariel Aillón Torres, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 27 de febrero, de 2025

Ing. Carla Fernanda Silva Padilla, Mgs.

TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Brando Ariel Aillón Torres**, con número único de identificación **180493106-9**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “Determinación de los estados de degradación y sus consecuencias: caso de estudio microcuenca Altoandina (Hualcanga) en el Páramo del Cerro Igualata, Provincia de Tungurahua” previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 27 de febrero de 2025

Ing. Brando Ariel Aillón Torres

N.U.I. 180493106-9

Agradecimiento

Al culminar esta etapa, expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de Chimborazo y la Dirección de Posgrado por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente. A mis padres y hermanos, por su amor y apoyo incondicional, pilares fundamentales en este camino. A mi amada Kiara Castro Franco, mi compañera de vida, por su paciencia, amor y aliento inquebrantable. A nuestro querido bebé, aún por llegar, pero ya mi mayor inspiración y motor para seguir creciendo. Finalmente, a todos quienes han sido parte de este proceso, gracias por cada enseñanza y apoyo incondicional.

Dedicatoria

Con gratitud y humildad, dedico esta tesis a Dios, cuya guía ha iluminado cada paso de mi vida, fortaleciéndome en los momentos de duda y bendiciéndome con la perseverancia para alcanzar mis metas.

A mis padres y hermanos, pilares inquebrantables de amor y fe, cuyo apoyo incondicional ha sido la esencia de mi fortaleza. Su dedicación, confianza y sacrificio han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante sin rendirme.

A todos aquellos que han sido parte de mi camino, brindándome su apoyo y compañía. A mi amada novia, mi compañera de vida y mi mayor inspiración. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles, por impulsarme a seguir adelante cuando sentí desfallecer y por compartir conmigo cada sonrisa, cada lágrima y cada victoria. Sin tu amor, paciencia y apoyo inquebrantable, este sueño no habría sido una realidad. Eres y siempre serás una parte esencial de cada uno de mis logros.

Hoy cerramos este capítulo con gratitud y alegría, sabiendo que cada esfuerzo ha valido la pena.

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Agradecimiento.....	iv
Dedicatoria	iv
Índice General.....	v
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Resumen	1
Abstract	2
Introducción.....	3
Capítulo 1 Generalidades.....	4
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Justificación de la Investigación.....	5
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica	7
2.1 Antecedentes Investigativos	7
2.2 Fundamentación Teórica	7
2.2.1 Cuenca hidrográfica.....	7
2.2.2 Ciclo hidrológico	7
2.2.3 Regulación hídrica.....	8
2.2.4 Propiedades físico - químicas del suelo.....	8
Capítulo 3 Diseño Metodológico.....	11
3.1 Enfoque de la Investigación	11

3.2	Diseño de la Investigación.....	11
3.2.1	Investigación correlacional.....	11
3.3	Determinación de las propiedades físico-químicas del suelo bajo páramo en la microcuena Hualcanga.	11
3.3.1	Puntos de muestreo.....	11
3.3.2	Recolección de muestras de suelo	12
3.3.3	Análisis de parámetros físico-químicos.....	14
3.4	Relación de las propiedades físicas del suelo con la capacidad de regulación hídrica	17
3.4.1	Reclasificación de usos y cobertura de suelo	17
3.4.2	Determinación de los grupos hidrológicos del suelo.....	18
3.4.3	Valores del método de Numero de Curva (CN)	19
3.4.4	Estimación de la precipitación.....	19
3.4.5	Cálculo de la regulación hídrica	23
3.5	Relación entre las características químicas del suelo con las dinámicas al que ha sido sometido el ecosistema.	23
	Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados	26
4.1	Análisis Descriptivo de los Resultados	26
4.1.1	Ubicación del estudio	26
4.1.2	Análisis de las propiedades físico-químico de la microcuena Hualcanga.....	26
4.1.3	Relación de las propiedades físicas del suelo con la capacidad de regulación hídrica	35
4.1.4	Relación entre las características químicas del suelo con las dinámicas al que ha sido sometido el ecosistema.	42
4.2	Discusión de los Resultados	43
4.2.1	Análisis de las propiedades físico-químico de la microcuena Hualcanga.....	43
4.2.2	Relación de las propiedades físicas del suelo con la capacidad de regulación hídrica	46

4.2.3 Relación entre las características químicas del suelo con las dinámicas al que ha sido sometido el ecosistema.....	48
Conclusiones.....	51
Recomendaciones.....	52
Referencias Bibliográficas	54
Apéndice	61
Apéndice A. Fase de recolección de muestras y laboratorio.....	61
Apéndice B. Resultados de la fase de laboratorio.....	62
Apéndice C. Tipos de cobertura de la microcuenca Hualcanga.....	64

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Descripción del proceso de recolección de muestras</i>	13
Tabla 2 <i>Parámetros físicos y químicos</i>	14
Tabla 3. <i>Características texturales del suelo</i>	14
Tabla 4. <i>Grupos hidrológicos de acuerdo con el tipo de suelo</i>	18
Tabla 5. <i>Asignación de números de curva</i>	19
Tabla 6. <i>Estaciones meteorológicas</i>	20
Tabla 7. <i>Parámetros de la superficie</i>	20
Tabla 8. <i>Propiedades de la red hídrica</i>	21
Tabla 9. <i>Procedimiento para la relación entre las propiedades químicas del suelo y las dinámicas a las que ha sido sometido</i>	23
Tabla 10. <i>Clasificación de la salinidad de los suelos según CE</i>	24
Tabla 11. <i>Escala de clasificación de los suelos según el pH</i>	25
Tabla 12. <i>Clase textural del suelo</i>	27
Tabla 13. <i>Potencial de hidrogeno del suelo</i>	30
Tabla 14. <i>Conductividad en diferentes tipos de cobertura en la microcuenca Hualcanga</i> . 31	

Tabla 15. <i>Materia orgánica del suelo en la microcuenca</i>	32
Tabla 16. <i>Carbono orgánico del suelo en la zona de estudio</i>	34
Tabla 17. <i>Parámetros de forma de la cuenca</i>	36
Tabla 18. <i>Propiedades de la red hídrica</i>	36
Tabla 19. <i>Precipitación media mensual del año 2023</i>	39
Tabla 20. <i>Resultados obtenidos</i>	40
Tabla 21. <i>Anexo fotográfico de la fase de laboratorio</i>	61
Tabla 22. <i>Datos de las muestras de suelo obtenidas en el laboratorio</i>	62
Tabla 23. <i>Anexo fotográfico de la cobertura</i>	64

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Mapa de Puntos de muestreo</i>	12
Figura 2. <i>Mapa de ubicación</i>	26
Figura 3. <i>Escala de colores correspondiente a los usos del suelo</i>	28
Figura 4. <i>Escala de colores correspondiente a los usos del suelo</i>	29
Figura 5. <i>Densidad aparente de cobertura del suelo</i>	30
Figura 6. <i>Intervalos de potencial de hidrogeno pH</i>	31
Figura 7. <i>Intervalos de conductividad del suelo en la zona de estudio</i>	32
Figura 8. <i>Intervalos de materia orgánica del suelo en la microcuenca</i>	33
Figura 9. <i>Intervalos de carbono orgánico del suelo en la zona de estudio</i>	34
Figura 10. <i>Tipo de cobertura de la microcuenca Hualcanga</i>	35
Figura 11. <i>Mapa de pendientes de la microcuenca Hualcanga</i>	37
Figura 12. <i>Estimación de la precipitación</i>	38
Figura 13. <i>Numero de curva (CN)</i>	40
Figura 14. <i>Comparación del uso de suelo y su contribución a la regulación hídrica</i>	41

Resumen

La presente investigación "Propiedades físico-químicas del suelo como instrumento de evaluación a las estrategias de Recuperación: caso de estudio microcuena altoandina (Hualcanga) en el páramo del cerro Iqualata, provincia de Tungurahua" tiene como objetivo analizar las características edáficas del suelo en la microcuena para comprender su impacto en la dinámica ecosistémica y la regulación hídrica. Se empleó una metodología basada en la interpretación de imágenes satelitales, análisis SIG y estudios de laboratorio para evaluar parámetros físico-químicos como pH, materia orgánica, carbono, densidad aparente, color, textura, porosidad y conductividad eléctrica.

Los principales hallazgos indican que la cobertura del páramo mantiene una mayor reserva de carbono y materia orgánica, favoreciendo la regulación hídrica, mientras que las áreas intervenidas (cultivos y pastos) presentan mayor compactación y degradación edáfica. Se evidenció que el uso del suelo influye directamente en la capacidad de retención de agua y estabilidad ecosistémica. En conclusión, el estudio confirma que la caracterización físico-química del suelo es una herramienta fundamental para la gestión sostenible de los ecosistemas.

Palabras claves: *Propiedades físico-químicas, microcuena, regulación hídrica, cobertura de suelo.*

Abstract

The present research, “Physical-chemical properties of the soil as an evaluation tool for recovery strategies: a case study of the high Andean micro-watershed (Hualcanga) in the paramo of Igualata hill, Tungurahua province,” aims to analyze the edaphic characteristics of the soil in the micro-watershed to understand its impact on ecosystem dynamics and water regulation. A methodology based on the interpretation of satellite images, GIS analysis, and laboratory studies was used to evaluate physicochemical parameters such as pH, organic matter, carbon, bulk density, color, texture, porosity, and electrical conductivity. The main findings indicate that the páramo cover maintains a more significant carbon and organic matter reserve, favoring water regulation. At the same time, the intervened areas (crops and pastures) present more excellent soil compaction and degradation. It was shown that soil use directly influences water retention capacity and ecosystem stability. In conclusion, the study confirms that soil physicochemical characterization is a fundamental tool for the sustainable management of ecosystems.

Keywords: Physical-chemical properties, micro-watershed, water regulation, soil cover.



Reviewed by:
Mgs. Kerly Cabezas
ENGLISH PORFESSOR
I.D. 0604042382

Introducción

Las cuencas hidrográficas son áreas de conservación y gestión del agua, donde el estudio de las propiedades físico-químicas del suelo influye directamente en la regulación del ciclo hídrico y la productividad agrícola. Estas propiedades determinan la capacidad del suelo para infiltrar, almacenar y drenar agua, así como para retener nutrientes esenciales. Un adecuado manejo de estas características contribuye a la sostenibilidad de los ecosistemas y garantiza beneficios económicos para las personas cercanas que dependen de estos recursos (Moreira et al., 2020).

El análisis de las propiedades del suelo es fundamental para comprender su influencia dentro de las cuencas hidrográficas y su capacidad de proveer servicios ecosistémicos como la regulación hídrica. Parámetros como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica y la textura del suelo desempeñan un papel crítico en la regulación de procesos biofísicos esenciales, tales como la retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana (Velázquez et al., 2022). Estas propiedades del suelo no solo sirven como indicadores de su calidad, salud y fertilidad, sino que también son determinantes para la planificación del manejo sostenible del territorio y la implementación de estrategias de restauración en suelos degradados. Asimismo, el suelo, al ser un componente central en la regulación del ciclo hidrológico y la provisión de servicios ecosistémicos como la captación de carbono y el suministro de agua, es un elemento crítico para la sostenibilidad ambiental (Ortega et al., 2022).

En el fondo de páramo Tungurahua (Gualshpa et al., 2017), se discuten diversas estrategias de recuperación enfocadas en mejorar la salud del suelo y promover la sostenibilidad agrícola. Entre estas, se destacan prácticas como la rotación de cultivos y el uso de abonos orgánicos, que restauran la fertilidad del suelo y previenen la erosión, por lo que cada una de estas prácticas generan un equilibrio entre uso y aprovechamiento sin llegar a la explotación. La construcción de sistemas de riego tecnificado y abrevaderos ayuda a conservar la humedad del suelo, mientras que los proyectos de reforestación mejoran su estructura y capacidad de retención de agua. Asimismo, la aplicación de estas estrategias fomenta el uso responsable de los recursos, apoyada por el monitoreo constante de las propiedades físico-químicas del suelo, lo que permite ajustar las prácticas de manejo y asegurar la sostenibilidad a largo plazo.

La microcuenca Hualcanga, en la provincia de Tungurahua, desempeña un papel fundamental en la gestión sostenible de los recursos naturales, destacándose por su importancia en la regulación hídrica y la biodiversidad local. Sin embargo, enfrenta grandes desafíos debido a la degradación del suelo, principalmente ocasionada por actividades humanas como la agricultura intensiva, la deforestación y la urbanización, lo que subraya la necesidad de su estudio y conservación en este ecosistema (Santander et al., 2021).

El presente estudio se enfoca en analizar las propiedades físico-químicas del suelo de la microcuenca (Hualcanga), en la provincia de Tungurahua como herramienta para evaluar la efectividad de las estrategias de recuperación aplicadas. Además, determinar cómo cada cobertura de suelo influye en las propiedades físico-químicas del suelo, y cómo afecta la capacidad de regulación hídrica. Por otro lado, un estudio de esta magnitud permitirá promover prácticas de manejo más efectivas y adaptadas a las condiciones locales, y mejorando la resiliencia ambiental (López & Hernández, 2023).

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

Las cuencas hidrográficas son fundamentales para la gestión del territorio en distintas altitudes, ya que vinculan las áreas altas, intermedias y bajas. Esta interconexión implica que las acciones en las partes altas afectan directamente a las partes bajas, influyendo en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en toda la cuenca (Ordóñez, 2019).

La disminución de la calidad del suelo dentro de una cuenca hidrográfica es de gran relevancia, ya que es una problemática a la que muchas áreas se enfrentan. En este contexto, la alteración de la estructura del suelo, la reducción del nivel de materia orgánica y la erosión acelerada no solo comprometen la fertilidad del suelo, sino que también afectan la capacidad de la tierra para retener agua, esto podría intensificar los problemas de escasez hídrica en la región, aumentando la presión sobre los recursos hídricos disponibles. Además, actividades antrópicas como la expansión agrícola descontrolada, la introducción de cultivos y plantaciones forestales no nativos, como el pasto (*Cynodon dactylon*) y el pino (*Pinus radiata*), pueden llevar a una pérdida irreparable de la biodiversidad local, alterando los ecosistemas y disminuyendo la capacidad de recuperación (B. Rodríguez et al., 2022).

Para mitigar y/o prevenir estos impactos, se han implementado estrategias de recuperación en diversos niveles. Los planes de manejo de cuencas hidrográficas se desarrollan a nivel comunitario y regional, buscando la conservación sostenible del ecosistema con la participación activa de las comunidades locales y políticas provinciales.

En la región interandina del Ecuador, el páramo representa grandes extensiones de la superficie total en las partes altas de las cuencas hidrográficas y estos son sumamente importantes debido a sus beneficios hidrológicos (Chuncho & Chuncho, 2019). El fondo de páramos Tungurahua actúan a nivel institucional, coordinando recursos para apoyar planes enfocados en reducir la presión antrópica y mejorar la gestión del agua en las cuencas hidrográficas, para atender las necesidades económicas de las comunidades. Finalmente, los acuerdos de conservación reflejan el compromiso comunitario para proteger áreas específicas del páramo y la efectividad de estas medidas depende de un diagnóstico de las condiciones del suelo, el cual puede lograrse mediante un análisis de sus propiedades físico-químicas (Gualshpa et al., 2017).

1.2 Justificación de la Investigación

A nivel global, el estudio del suelo es fundamental por su papel crítico en la sostenibilidad ambiental y en la provisión de recursos para la vida humana. Además de servir como hábitat para una diversidad de flora y fauna, el suelo es la base de la producción alimentaria. Sin embargo, enfrenta amenazas significativas, como la agricultura intensiva, la falta de políticas de conservación y los efectos del cambio climático. Su adecuada gestión y conservación son esenciales, dado que se trata de un recurso no renovable susceptible a la degradación, siendo la erosión uno de los principales factores de deterioro (Valdez et al., 2021).

El uso del territorio abarca coberturas como pastizales (*Cynodon dactylon*), áreas de cultivo, plantaciones de pino (*Pinus radiata*) y ecosistemas de páramo. Una planificación inadecuada en la ocupación de estas zonas genera la degradación de los recursos ecosistémicos, ya que la respuesta hidrológica está estrechamente ligada a las características edáficas. Por ello, resulta fundamental analizar las propiedades físico-químicas del sustrato para conservar su calidad y asegurar funciones críticas como la regulación hídrica y el soporte de la biodiversidad (Ortuño & Jiménez, 2024).

Al enfocarse en los procesos específicos que ocurren en los componentes edáficos y su impacto en las dinámicas ecosistémicas, esta investigación no solo profundiza en aspectos ecológicos, sino que también contribuye al desarrollo de estrategias adaptativas. Estas estrategias son aplicables en diferentes contextos de manejo sostenible y conservación, y son fundamentales para aprovechar las diversas coberturas del territorio (Patiño et al., 2024).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Analizar las propiedades físico-químicas del suelo como herramienta de evaluación de las estrategias de recuperación en la microcuenca altoandina (Hualcanga) en el páramo del Cerro Igualata, provincia de Tungurahua.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físico-químicas del suelo bajo páramo en la microcuenca hualcanga.
- Relacionar las propiedades físicas del suelo con la capacidad de regulación hídrica.
- Establecer la relación entre las características químicas del suelo con las dinámicas al que ha sido sometido el ecosistema.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1 Antecedentes Investigativos

Para (García et al., 2021) en su investigación “Efecto de diferentes usos del suelo en las propiedades físicas e hidrológicas de un Luvisol en Oaxaca, México” afirma que: como consecuencia del cambio en el uso de suelo, experimenta modificaciones en sus propiedades físicas, por la transformación de un área boscosa a un uso agrícola resulta en variaciones significativas en estas propiedades. Además, se concluyó que cualquier modificación en la cobertura del suelo conlleva una reducción notable en la capacidad de infiltración.

Un aspecto importante para esta investigación es que los cambios en las coberturas de suelo influyen directamente en la capacidad de regulación hídrica de una cuenca hidrográfica. (Osorio et al., 2023), En esta investigación, resalta que la cuenca alta del río Chinchiná, ubicada en Caldas, Colombia, presenta una disminución en su capacidad de regulación hídrica a razón de la expansión de coberturas herbáceas y pasto, ya que el aumento de la cobertura boscosa no compensa adecuadamente el crecimiento de las primeras dos coberturas.

Sin embargo, a pesar de la importancia del páramo y la vulnerabilidad de estos ecosistemas, no reciben un manejo adecuado, lo que provoca un impacto negativo considerable. La situación se agrava debido a la continua expansión de la agricultura, el pastoreo, las quemadas y la reforestación con especies exóticas (Chuncho & Chuncho, 2019).

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Cuenca hidrográfica

Según (Moreira et al., 2020) una cuenca hidrográfica es una región definida por divisorias de agua, donde las precipitaciones se recogen y drenan hacia un punto de salida común, como un río, lago o mar. Estas áreas, guiadas por la topografía, son cruciales para la gestión del agua, el control de inundaciones, la recarga de acuíferos y la preservación de ecosistemas.

2.2.2 Ciclo hidrológico

Según (Miranda, 2020), afirma que el ciclo hidrológico es un proceso natural donde el agua circula entre la atmósfera, la superficie terrestre y los cuerpos de agua. Inicia con la

evaporación, seguida de la condensación en nubes y finaliza con la precipitación, recargando acuíferos y alimentando ríos y lagos. Este ciclo es crucial para la distribución del agua, afectando el clima y los ecosistemas.

2.2.3 Regulación hídrica

La regulación hídrica es la capacidad de un ecosistema o infraestructura para manejar el agua, controlando su infiltración, almacenamiento, liberación y evaporación. Este proceso es esencial para evitar inundaciones, reducir el impacto de las sequías y garantizar una distribución adecuada del agua para el consumo humano, la agricultura y la salud de los ecosistemas (Cervantes et al., 2021).

2.2.4 Propiedades físico - químicas del suelo

Las propiedades físico-químicas del suelo definen su comportamiento físico y químico, afectando su capacidad para soportar la vida vegetal y la disponibilidad de nutrientes. Incluyen características físicas como textura, estructura y densidad, que influyen en la retención de agua y la aireación. También abarcan aspectos químicos como el pH, el contenido de carbono y nutrientes, que determinan la fertilidad del suelo y su capacidad para sustentar la actividad biológica (Velázquez et al., 2022).

2.2.4.1 Densidad aparente

La densidad aparente del suelo es la masa de las partículas sólidas por unidad de volumen, incluyendo los espacios porosos, medida en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3). Indica el grado de compactación del suelo, que afecta la retención de agua, la circulación de aire y el crecimiento de las raíces. Suelos con alta densidad están más compactados, mientras que una densidad baja sugiere un suelo más suelto y mejor para las plantas (Greco Cid et al., 2021).

2.2.4.2 Estructura

La estructura del suelo se refiere a cómo se agrupan las partículas de arena, limo y arcilla en pequeños bloques. Esta organización afecta cuánta agua y aire puede retener el suelo y cómo de fácil es para las raíces crecer. Una buena estructura mejora el flujo de agua y aire, y apoya la vida biológica, lo que hace el suelo más productivo (Osorio et al., 2023).

2.2.4.3 Color

Para determinar el color del suelo, se compara con los patrones de las tablas de Munsell, que utilizan matiz, brillo y croma para ofrecer colores precisos. Aunque se suelen usar colores como rojo, marrón, negro o gris, estos no son universales ni exactos. El sistema Munsell es el estándar aceptado para medir y comparar el color del suelo a nivel global, facilitando su estudio y comparación (Carrera, 2022).

2.2.4.4 Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción de partículas de diferentes tamaños, como arena, limo y arcilla, que lo forman. Esta característica afecta cómo retiene agua, su permeabilidad, aireación y su resistencia a la erosión. Conocer la textura del suelo es crucial para entender su comportamiento en agricultura, ecología y manejo del territorio (H. Mosquera et al., 2022).

2.2.4.5 Ph

El pH mide la concentración de iones de hidrógeno en una solución, siendo el logaritmo negativo de esta concentración. Un pH menor a 7 indica acidez, mientras que un pH mayor a 7 muestra alcalinidad. Las soluciones amortiguadoras, o buffers, mantienen el pH estable al neutralizar ácidos y bases con pares conjugados de ácido y base, evitando cambios bruscos en la acidez o alcalinidad (Cremona & Enriquez, 2020).

2.2.4.6 Materia orgánica

La materia orgánica del suelo está compuesta por residuos vegetales, animales y microorganismos en descomposición. Es esencial para la fertilidad del suelo, ya que mejora su estructura, retención de humedad, intercambio de nutrientes y proporciona energía a los microorganismos. También contribuye a la formación de humus, crucial para sostener la vida vegetal y gestionar nutrientes (Izquierdo & Arévalo, 2021).

2.2.4.7 Carbono

El carbono en el suelo proviene de la materia orgánica, que incluye residuos de plantas, animales y microorganismos en descomposición. Es fundamental para la fertilidad del suelo, ya que mejora la retención de agua y nutrientes. Además, actúa como un sumidero de carbono, ayudando a reducir el dióxido de carbono en la atmósfera y contribuyendo a mitigar el cambio climático (Muñoz et al., 2021).

2.2.4.8 Porosidad

La porosidad del suelo se refiere a cuánto del volumen del suelo está ocupado por espacios vacíos en lugar de partículas sólidas. Estos espacios, que pueden contener aire o agua, son vitales para la circulación de agua, aire y nutrientes. Una buena porosidad ayuda a que las raíces crezcan bien y a que los microorganismos encuentren un hábitat adecuado, lo cual es esencial para mantener un suelo saludable y productivo (Baldoce et al., 2021).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación

La presente investigación se determinó con un enfoque mixto: cuantitativo y cualitativo. A través del enfoque cuantitativo se determinó las propiedades físico-químicas del suelo bajo páramo en la microcuenca Hualcanga, debido a que se realizó la obtención y análisis de datos mediante mediciones de laboratorio. Además, con los datos de los mapas temáticos se relacionó las propiedades físicas del suelo y los efectos que puede generar el cambio de uso de suelo sobre la capacidad de regulación hídrica

3.2 Diseño de la Investigación

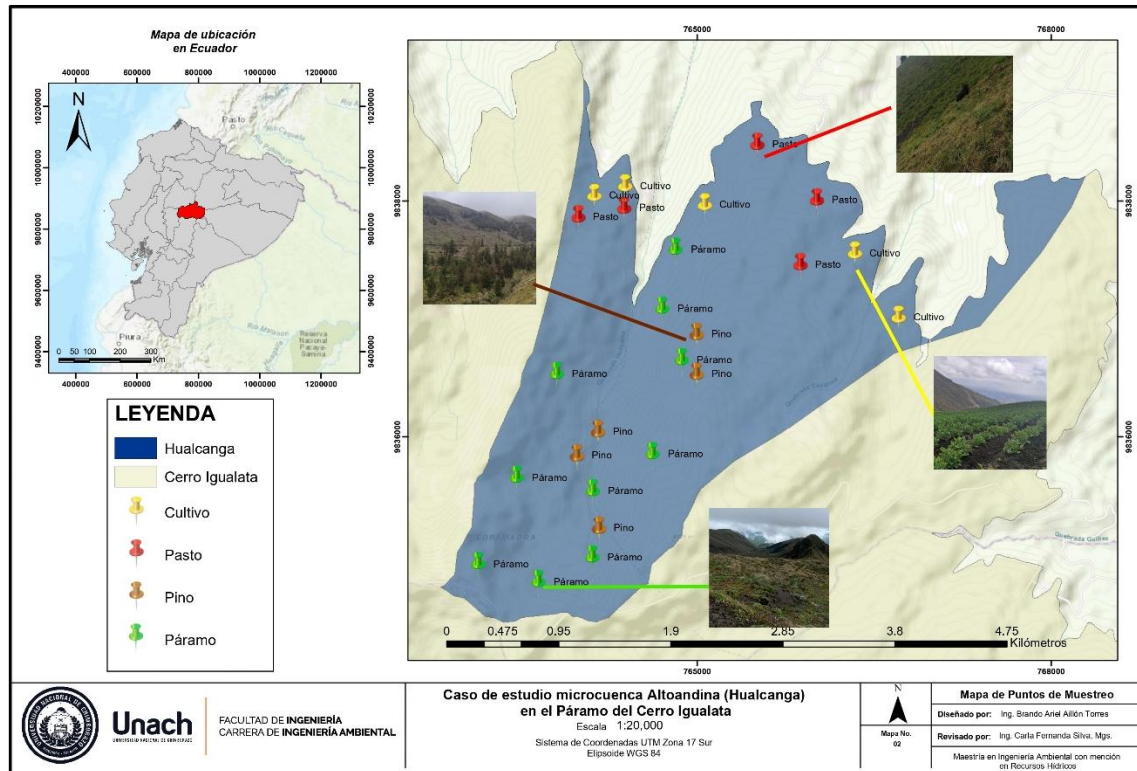
3.2.1 Investigación correlacional

Este diseño permitió analizar cómo las variables físico-químicas del suelo (textura, densidad aparente, materia orgánica, pH, carbono y color) se relacionan con parámetros que influyen en la regulación hídrica, como la infiltración, el almacenamiento de agua y el flujo hídrico. Mediante análisis estadísticos, se identificaron patrones y magnitudes de asociación, lo que facilitó determinar el impacto de las actividades antrópicas y las condiciones ambientales en la funcionalidad del suelo y la sostenibilidad del ecosistema en la microcuenca Hualcanga.

3.3 Determinación de las propiedades físico-químicas del suelo bajo páramo en la microcuenca Hualcanga.

3.3.1 Puntos de muestreo

La selección de los sitios de muestreo se realizó mediante la caracterización de los usos del suelo en la zona de estudio. Se utilizó la cartografía temática proporcionada por el Instituto Geográfico Militar (IGM). La zona de estudio corresponde a un ecosistema de páramo y áreas intervenidas por actividades antrópicas, que son: pino, cultivo y pasto, respectivamente.

Figura 1.*Mapa de Puntos de muestreo*

Nota. La Figura 1 muestra la distribución de los puntos de muestreo establecidos en la microcuenca Hualcanga, localizada en el Cerro Igualata, provincia de Tungurahua. Se identificaron 10 puntos en el área de páramo y 5 puntos en cada una de las zonas correspondientes a pasto, pino y cultivo, reflejando una planificación equitativa para la recolección de datos en los diferentes usos del suelo.

3.3.2 *Recolección de muestras de suelo*

Utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), se procedió a la delimitación de los puntos de muestreo en cada área, asegurando una distribución representativa de las diferentes coberturas, mismas que se clasificaron en cuatro tipos de cobertura: páramo, pino, pasto y cultivo. Se eligieron áreas de fácil acceso, lo que facilitó la selección de ubicaciones clave para la recolección de datos correspondientes a cada categoría mencionada, con un total de 10 puntos de muestreo en el área de páramo, y 5 puntos en cada una de las zonas de pasto, pino y cultivo.

En cada punto, se delimitó una parcela de 20 m x 20 m, donde se tomaron muestras en las cuatro esquinas y en el centro. Estas se mezclaron cuidadosamente para obtener una muestra compuesta, a una profundidad de 30 cm. Las muestras fueron colocadas en bolsas etiquetadas con su respectivo número de identificación, aplicando el procedimiento de manera uniforme en todas las coberturas, y posteriormente trasladadas al laboratorio para su respectivo análisis.

Tabla 1.

Descripción del proceso de recolección de muestras

Etapa	Descripción técnica
Delimitación de puntos	- Utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), se identificaron y delimitaron los puntos de muestreo representativos de cuatro tipos de cobertura: páramo, pino, pasto y cultivo.
Selección de áreas	- Se priorizaron áreas de fácil acceso, garantizando representatividad de cada cobertura y distribuyendo los puntos de muestreo de forma uniforme.
Distribución de puntos	- Páramo: 10 puntos de muestreo. - Pino, pasto y cultivo: 5 puntos cada uno.
Delimitación de parcelas	- En cada punto, se estableció una parcela de 20 m x 20 m, asegurando consistencia en todas las coberturas.
Recolección de submuestras	- Se recolectaron muestras en las cuatro esquinas y el centro de cada parcela, a una profundidad de 30 cm.
Obtención de muestra compuesta	- Las submuestras fueron mezcladas cuidadosamente para formar una muestra compuesta por parcela.
Identificación y embalaje	- Las muestras fueron colocadas en bolsas etiquetadas con su número de identificación, asegurando su trazabilidad.
Transporte al laboratorio	- Todas las muestras fueron trasladadas al laboratorio para análisis, siguiendo protocolos estandarizados de manejo y conservación.

3.3.3 Análisis de parámetros físico-químicos

Tabla 2

Parámetros físicos y químicos

Parámetros físicos	Parámetros químicos
Color	pH
Estructura	Conductividad
Porosidad	Materia orgánica
Densidad aparente	Carbono orgánico
Textura	

Nota. La caracterización de los suelos se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en la "Guía para la Descripción de Suelos" (FAO, 2009). Estos parámetros fueron seleccionados para 4 tipos de cobertura que son (Páramo, Pino, Pasto y cultivo).

3.3.3.1 Textura

La clase textural del suelo se determinó mediante el método organoléptico, basado en la percepción táctil de una muestra en estado húmedo o ligeramente mojado. Este enfoque permite diferenciar los componentes texturales según las siguientes características (FAO, 2009):

Tabla 3.

Características texturales del suelo

Componente Textural	Características Principales
Arcilla	<ul style="list-style-type: none"> - Se adhiere a los dedos. - Es cohesiva (pegajosa). - Alta plasticidad, fácilmente moldeable. - Superficie brillante al presionarla entre los dedos.
Limo	<ul style="list-style-type: none"> - Se adhiere débilmente a los dedos. - Poco cohesivo y escasamente moldeable. - Superficie áspera o rasposa al tacto.

	- Sensación harinosa, similar al polvo de talco.
Arena	- No se adhiere a los dedos. - No es cohesiva ni moldeable. - Textura granulosa al tacto.

3.3.3.2 Color

El análisis del color del suelo se efectuó utilizando las notaciones de matiz, valor y croma de la Carta de Colores de Suelos Munsell (Torres Barchino et al., 2018). Este procedimiento se aplicó en muestras en estado seco y húmedo, registrando el código de color correspondiente para cada estrato, conforme a las directrices de la (FAO, 2009).

3.3.3.3 Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente (Dap) se realizó mediante el método del cilindro de volumen conocido. Este procedimiento implicó la extracción in situ de muestras de suelo utilizando un anillo metálico de volumen predefinido, a una profundidad de 0 a 30 cm. Las muestras recolectadas fueron sometidas a un proceso de secado en horno a 105 °C durante 24 horas para eliminar la humedad, seguido del pesaje de estas (Greco Cid et al., 2021). La densidad aparente de cada muestra se calculó aplicando la ecuación:

$$Dap (g/cm^3) = \frac{Pss}{Vc} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Dap: representa la densidad aparente, expresada en g/cm³.

Pss: corresponde al peso del suelo seco en gramos.

Vc: al volumen del cilindro utilizado, medido en cm³.

3.3.3.4 Estructura

El análisis de la estructura del suelo se realizó utilizando una porción representativa de la muestra, la cual fue examinada bajo un microscopio. Posteriormente, se comparó con las ilustraciones de "Tipos de estructura del suelo y su formación" incluidas en la Guía para la descripción de suelos (FAO, 2009), lo que permitió clasificar el tipo de estructura correspondiente.

3.3.3.5 Potencial de hidrogeno (pH)

La determinación del pH se llevó a cabo mediante un procedimiento estándar para análisis de suelos, diseñado para garantizar precisión y reproducibilidad en los resultados.

Procedimiento:

- Pesado de 10 g de muestra de suelo seca y tamizada.
- Adición de 25 ml de agua destilada, manteniendo una relación suelo: agua de 1:2,5
- Agitación de la mezcla durante 30 minutos para garantizar su homogenización.
- Medición del pH utilizando un pH-metro (Thermo Scientific 9165NWP) calibrado con soluciones buffer de pH 4, 6 y 9, según especificaciones del fabricante (Cremona & Enriquez, 2020).

3.3.3.6 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se evaluó utilizando 10 g de suelo seco y tamizado, a los cuales se añadieron 25 ml de agua destilada, manteniendo una proporción suelo:agua de 1:2,5. La mezcla fue agitada durante 30 minutos para garantizar su homogenización. La medición se realizó con un conductímetro modelo Thermo Scientific 9165NWP, calibrado previamente con soluciones estándar, siguiendo las especificaciones técnicas (M. A. Rodríguez et al., 2015).

3.3.3.7 Materia Orgánica y Carbono Orgánico del suelo

La determinación del porcentaje de materia orgánica se realizó mediante el método de Pérdida por Ignición (LOI). Las muestras, previamente tamizadas a 2 mm y 150 μ m, se analizaron siguiendo el procedimiento descrito por (Chambers et al., 2011) e (Isaza et al., 2009), que consiste en la calcinación (LOI) controlada para cuantificar el contenido de carbono de acuerdo con el procedimiento detallado a continuación:

- La muestra de suelo se colocó en la estufa a 105°C durante 24 horas para su deshidratación.
- Se pesaron 5 g de muestra de suelo seco en un crisol.
- Posteriormente, la muestra se colocó en la mufla a 550°C durante 4 horas para realizar la calcinación.
- Tras el enfriamiento en un desecador, se registró el peso final de la muestra.

La ecuación presentada por (Chambers et al., 2011) e (Isaza et al., 2009) sugiere calcular la materia orgánica (MO) mediante la diferencia de pesos de la muestra de suelo.

$$\%MO = \frac{\text{Peso del suelo (5g)} - \text{Peso después de ignición}}{\text{Peso del suelo (5g)}} \times 100 \quad \text{Ec. 2}$$

El cálculo del porcentaje de materia orgánica (MO) se utiliza para estimar el contenido de carbono orgánico, estableciendo una relación con el factor empírico de (Dabadie et al., 2018). Este factor se basa en la suposición de que la MO del suelo contiene un 58% de carbono orgánico ($1/0,58 = 1,724$), lo que da lugar a la siguiente ecuación:

$$\% CO = \frac{\% MO}{1,724} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

% MO = Porcentaje de materia orgánica

% CO = Porcentaje de carbono orgánico

Se calculó el contenido de carbono en el suelo utilizando los datos previamente obtenidos (densidad aparente, profundidad, %CO), según lo indicado en la ecuación de (Zhang & Li, 2009):

$$\text{Contenido de carbono} = \left(\frac{\text{ton CO}_2}{\text{ha}} \right) = (Dap * P * C'' * 100) * \frac{44}{12} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

C''= Porcentaje de carbono orgánico

Dap: Densidad Aparente

P: Profundidad

3.4 Relación de las propiedades físicas del suelo con la capacidad de regulación hídrica

3.4.1 Reclasificación de usos y cobertura de suelo

Obtención y preprocesamiento de imágenes satelitales

Para la obtención de una imagen satelital correspondiente al año 2024 se utilizó una imagen de Sentinel-2B, misma que fue descargada en el programa *Copernicus Services Data Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA)* (Montiel et al., 2022). Además, mediante la

utilización de herramientas SIG se realizaron correcciones de esta imagen para el monitoreo de la vegetación y el mapeo de la cobertura terrestre, entre otras aplicaciones (Mendoza et al., 2021).

Mapas de uso y cobertura de suelo de la imagen Sentinel-2B

La clasificación digital se la realizó a través del complemento *Training Sample Manager* que se encuentra en Arc Map. De acuerdo con la selección de los sitios de muestreo que se realizó en el primer objetivo, la clasificación fue complementada con las coberturas y uso de suelo determinadas con la herramienta *Classification – Maximum Likelihood Classification – Raster to polígono*.

3.4.2 Determinación de los grupos hidrológicos del suelo

Para la determinación de los Grupos Hidrológicos del Suelo (GHS), se utilizó la información recopilada en la fase de laboratorio del primer objetivo de las propiedades físicas del suelo. Las características litológicas de cada unidad cartográfica permitieron definir el utilizando la textura y estructura como base principal de asignación (Saldaña et al., 2023).

Tabla 4.

Grupos hidrológicos de acuerdo con el tipo de suelo

Grupo hidrológico	Tipo de suelo
A	Altas tasas de infiltración: arenas y gravas profundas y bien drenadas.
B	Tasas moderadas de infiltración: suelos moderadamente profundos, bien drenados y con texturas moderadamente gruesas.
C	Bajas tasas de infiltración: suelos con capas compactas o texturas moderadamente finas.
D	Muy bajas tasas de infiltración: suelos arcillosos, con nivel freático alto o capa impermeable superficial.

Nota: Adaptado de “Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG” (p. 457), por A. Diaz, 2017, Ingeniería y Desarrollo, 35 (2)

De acuerdo con (Lian et al., 2020): los GHS generalmente se dividen en cuatro grupos [A, B, C y D] los cuales se pueden diferenciar por su tasa de infiltración, donde “A” es alta, el “B” es moderada, el “C” es moderada-baja y el “D” es baja.

3.4.3 Valores del método de Numero de Curva (CN)

Para la determinación de los valores CN, se asignaron valores numéricos de acuerdo con las capas de uso y cobertura de suelo, pendiente y el grupo hidrológico identificado para cada categoría. Con esto, se creó una capa preliminar a través de la herramienta *raster calculator* y se establecieron los valores de CN.

Tabla 5.

Asignación de números de curva.

Uso y cobertura de suelo	Pendiente	GHS			
		A	B	C	D
Páramo	> 3	43	65	76	82
	< 3	32	58	72	79
Pasto	> 3	68	79	86	89
	< 3	39	61	74	80
Cultivo	> 3	67	76	82	86
	< 3	64	73	78	82
Pino	> 3	56	67	78	89
	< 3	56	67	78	89

Nota: Adaptado de “Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG” (p. 466), por A. Córdova, 2017, Ingeniería y Desarrollo, 35 (2)

3.4.4 Estimación de la precipitación

Para la obtención de los datos pluviométricos, se seleccionó las estaciones cercanas al área de estudio, luego con la herramienta *Data Access Viewer* (DAV) de la página de la *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources* (POWER) se obtuvo las precipitaciones diarias y mensuales de cada estación meteorológica de la tabla 5. Luego se realizó la interpolación de datos pluviométricos, utilizando técnicas como *Kriging - IDW* (*Inverse Distance Weighting*) específicamente de la zona de estudio.

Tabla 6.*Estaciones meteorológicas.*

ID	Nombre de la estación	X	Y
M128	Pedro Fermin Cevallos (Colegio)	765155	9850010
M258	Querochaca (UTA)	766205	9848380
M377	Tisaleo	759001	9850477
M380	Huambaló	774894	9846158
M390	Urbina	757532	9835544
M1261	Ilapo	769764	9829538
M5107	Urbina - Iner	754535	9835331
EC18RB	Riobamba - Chimborazo	759238	9819686
EC18TS	Tisaleo	761505	9858401
EC18BN	Baños	789329	9845097

Tabla 7.*Parámetros de la superficie.*

Parámetro	Fórmula	Descripción de variables	Referencias
Índice de Compacidad (Ic)	$Ic = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}}$	P: Perímetro de la cuenca (km) A: Área de la cuenca (km ²)	– Ic = 1: cuenca redonda – 1.01 < Ic < 1.05: cuenca regular – Ic ≠ 1: cuenca irregular
Factor de Forma (Ff)	$Ff = \frac{A}{Lc^2}$	A: Área de la cuenca (km ²) Lc: Longitud del cauce principal (km)	
Relación de Elongación (Re)	$Re = 1.1284 * \frac{\sqrt{A}}{Lc}$	A: Área de la cuenca (km ²) Lc: Longitud del cauce principal (km)	– 0.80 < Re < 1.0 > Variedad de climas – Re = 1.0 > relieve bajo – 0.60 < Re < 0.80: Fuertes Pendientes
Relación de Circularidad (Rci)	$Rci = \frac{4\pi A}{P^2}$	A: Área de la cuenca (km ²) P: Perímetro de la cuenca (km)	– Rci=1: Circular – Rci=0.785: Cuadrada – Rci>1: Regular – Rci<0.785: Irregular

Ancho Promedio de la Cuenca (B)	$B = \frac{A}{Lc}$	A: Área de la cuenca (km ²) Lc: Longitud del cauce principal (km)
---------------------------------	--------------------	--

Nota. Todos los cálculos se realizan utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), las cuales permiten obtener los valores necesarios para las variables de entrada como perímetro, área y longitud del cauce principal.

Tabla 8.

Propiedades de la red hídrica.

N°	Paso / Descripción	Fórmula y Notas
1	Delimitación de la zona de estudio Herramienta: " <i>Extract by Mask</i> "	Se utiliza esta herramienta para recortar la red hídrica dentro del área de la microcuenca. Nota: Asegurar que el área de estudio esté correctamente definida.
2	Generación de la dirección de flujo Herramienta: " <i>Flow Direction</i> "	Crea un raster que indica la dirección de flujo de agua en cada celda del DEM. Nota: Asegurarse de que el DEM esté libre de errores antes de aplicar esta herramienta.
3	Cálculo de acumulación de flujo Herramienta: " <i>Flow Accumulation</i> "	Genera un raster que muestra la cantidad de flujo acumulado en cada celda. Nota: Este paso identifica las áreas de mayor acumulación de agua.
4	Relleno de depresiones Herramienta: " <i>Fill</i> "	Rellena las depresiones del DEM para mejorar la conectividad de la red hídrica. Nota: Asegurarse de que la corrección no altere la topografía del área de estudio.
5	Cálculo de la longitud de flujo Herramienta: " <i>Flow Length</i> "	Calcula la longitud total del flujo acumulado desde el punto más alto hasta el más bajo del cauce. Nota: Se utilizará como base para la generación de la red hídrica.
6	Generación de Link y Orden de la Red	Segmenta la red hídrica en ramales y asigna el orden de Strahler.

	Herramienta: " <i>Stream Link</i> "	Nota: El raster de acumulación de flujo es esencial para esta segmentación.
7	Exportación de datos a Excel Herramienta: " <i>Export</i> "	Exporta los atributos de la red hídrica, como longitud, orden de la red, etc., a una hoja de cálculo Excel para análisis adicional.
8	Cálculo de la densidad de drenaje (Dd)	<p>Fórmula:</p> $Dd = \frac{L_t}{A}$ <p>Condicionales:</p> <p>Lt: Longitud total de la red hídrica (km). A: Área de la microcuenca (km²).</p> <p>Nota: La densidad de drenaje mide la extensión de la red hídrica en relación con el área.</p>
9	Cálculo de la densidad hidrográfica (Dh)	<p>Fórmula:</p> $Dh = \frac{N_t}{A}$ <p>Condicionales:</p> <p>NT: Número total de ramales de la red hídrica. A: Área de la microcuenca (km²).</p>
10	Determinación de la altura máxima y mínima del río	Se identifican las coordenadas con las alturas más altas y bajas del cauce principal utilizando el DEM.
11	Cálculo de la pendiente media del cauce principal (Sm)	<p>Fórmula para calcular la pendiente media:</p> $Sm = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L}$ <p>- Hmax: Altura máxima del río (msnm). - Hmin: Altura mínima del río (msnm). - L: Longitud del cauce principal (km).</p> <p>Nota: Se utiliza para evaluar la inclinación del cauce principal.</p>

Nota. Todos los cálculos se realizaron en software ArcMap, con herramientas adicionales para análisis ráster y vectorial

3.4.5 Cálculo de la regulación hídrica

Para la estimación del servicio de regulación hídrica, se utilizó la metodología ECOSER, tomando en cuenta los valores de CN y la precipitación:

$$IE = \frac{25400}{CN_{2\alpha}} \quad \text{Ec. 5}$$

Fuente: (Jullian et al., 2018).

Donde:

IE = infiltración y evapotranspiración (mm),

CN_{2α} = valor CN ajustado por pendiente

$$REP = P - \frac{(P - 0.2 * IE)^2}{(P + 0.8 * IE)} \quad \text{Ec. 6}$$

Fuente: (Jullian et al., 2018).

Donde:

REP = retención de exceso de precipitación (mm),

IE = infiltración y evapotranspiración (mm),

P = precipitación (mm)

Los resultados obtenidos en la ecuación 6 fueron transformados de mm a m³. Así, multiplicado por la superficie (m²), se obtiene el valor en m³. Esto da una indicación de la cantidad de agua que el suelo puede retener y cómo esta agua puede ser regulada a lo largo del tiempo (Jullian et al., 2018).

3.5 Relación entre las características químicas del suelo con las dinámicas al que ha sido sometido el ecosistema.

Tabla 9.

Procedimiento para la relación entre las propiedades químicas del suelo y las dinámicas a las que ha sido sometido

Fase	Procedimiento	Herramientas y Fuentes
------	---------------	------------------------

Delimitación del área de estudio	Se definió la microcuenca Hualcanga SIG, mapas topográficos, imágenes como zona de análisis, considerando satelitales. sus características ambientales y límites geográficos.
Selección de coberturas vegetales	Se identificaron cuatro tipos de Análisis SIG, interpretación de cobertura: páramo, pasto, pino y imágenes satelitales, datos de uso del cultivo. suelo.
Caracterización espacial de las coberturas	Se analizó la distribución de cada SIG, cartografía temática, análisis cobertura y su extensión en la temporal de imágenes. microcuenca.
Análisis de las propiedades químicas del suelo	Se evaluaron parámetros químicos en Métodos analíticos estandarizados laboratorio para cada tipo de cobertura. (pH, materia orgánica, carbono, conductividad).
Evaluación de las dinámicas ecosistémicas	Se investigaron cambios en el uso del Artículos científicos, revistas suelo y transformaciones en cada actualizadas, estudios previos sobre la zona. cobertura.
Análisis de correlación	Se compararon los resultados de Análisis estadístico de correlación, laboratorio con la información sobre comparación con antecedentes. cambios en el ecosistema.

Tabla 10.

Clasificación de la salinidad de los suelos según CE

$CE_{1:5dsm}^{-1}$	CE_{psdsm}^{-1}	Calificativo
< 0.35	< 2	No salino
0.35 – 0.65	2 – 4	Ligeramente salino
0.65 – 1.15	4 – 8	Salino
> 1.15	> 8	Muy Salino

Nota. Adaptado de “Conductividad eléctrica del suelo” (p. 5), por M. Soriano, 2018, Universidad Politécnica de Valencia, 1 (10).

Tabla 11.*Escala de clasificación de los suelos según el pH*

Rango de pH	Clasificación
< 4.5	Extremadamente ácido
4.6 – 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 – 5.5	Fuertemente ácido
5.6 – 6.0	Moderadamente ácido
6.1 – 6.9	Ligeramente ácido
7.0	Neutro
7.1 – 7.3	Muy ligeramente alcalino
7.4 – 7.8	Ligeramente alcalino
7.9 – 8.4	Moderadamente alcalino
8.5 – 9.0	Fuertemente alcalino
> 9.0	Muy fuertemente alcalino

Nota: Adaptado de “Algunas Propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: el pH y la conductividad eléctrica” (p.5), por M. Cremona, 2020, EEA Bariloche, 1 (73).

Capítulo 4

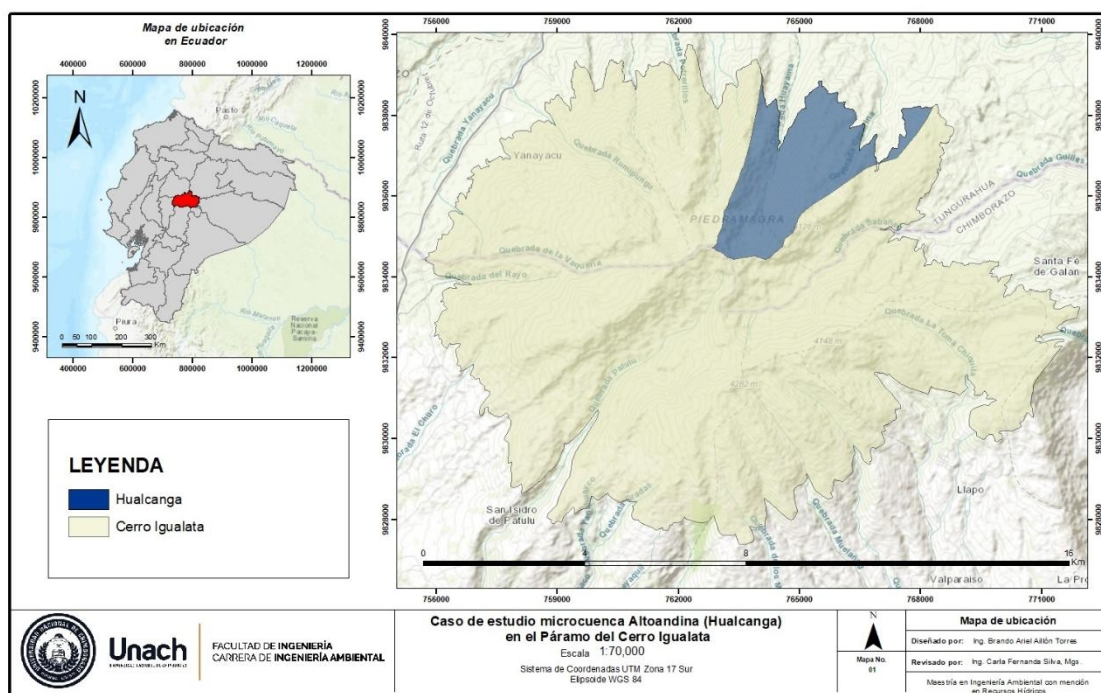
Análisis y Discusión de los Resultados

4.1 Análisis Descriptivo de los Resultados

4.1.1 Ubicación del estudio

Figura 2.

Mapa de ubicación



Nota. La Figura 2 representa la ubicación del estudio, realizado en la microcuenca Hualcanga, ubicada en el Cerro Igualata, provincia de Tungurahua. Las coordenadas UTM de la zona son 765247.45 Este y 9836688.11 Norte, correspondientes a la Zona 17S. La microcuenca tiene una extensión de 9.57 km².

4.1.2 Análisis de las propiedades físico-químico de la microcuenca Hualcanga

Indicadores Físicos en la microcuenca Hualcanga

— Textura

En la tabla 5 se presenta la clase textural de cada uno de los usos del suelo analizados en la microcuenca. La textura se determina por el porcentaje de arena, limo y arcilla que

contiene el suelo (H. Mosquera et al., 2022). Según los datos presentados, el suelo bajo páramo es franco arenoso (FA), pasto y en áreas de cultivo presenta una textura arenoso franco (AF). En los sitios con plantaciones de pino, la textura es similar al páramo, siendo franco arenoso (FA), lo que explica su textura predominantemente arenosa.

Tabla 12.

Clase textural del suelo

Cobertura de suelo	%a	%L	%A	Clase textural	Interpretación
Páramo	10	20	70	Franco Arenoso	Buen drenaje
Pasto	10	10	70	Arenoso Franco	Baja capacidad de retención hídrica
Pino	18	20	64	Franco Arenoso	Buen drenaje
Cultivo	10	10	84	Arenoso Franco	Baja capacidad de retención hídrica

Nota. El %a corresponde al porcentaje de arcilla, %L porcentaje de limo y %A porcentaje de arena.

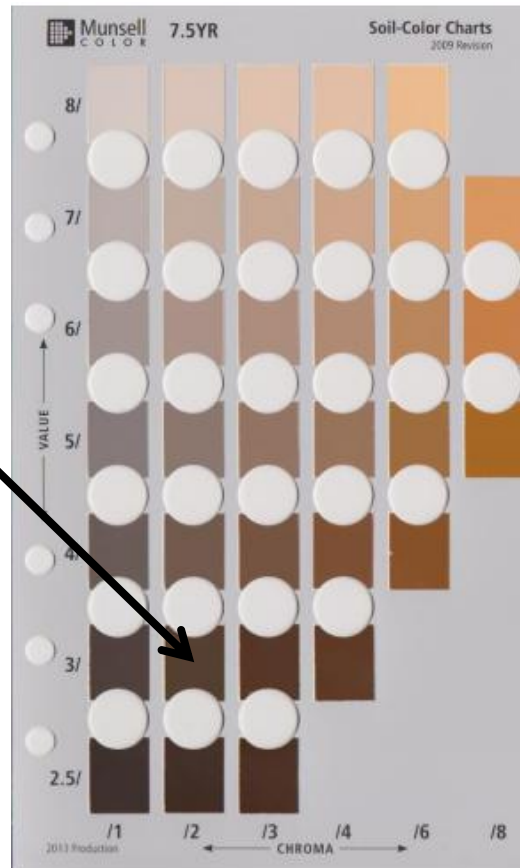
— Color

El color es una característica morfológica clave y de fácil determinación, siendo fundamental para la clasificación taxonómica de los suelos (Carrera, 2022). Además, este atributo está directamente vinculado con los componentes sólidos del suelo, como la materia orgánica y la textura, influyendo en su variabilidad cromática y proporcionando información sobre procesos edáficos. En la Figura 2, se observa el color de los suelos estudiados en la microcuena. Para páramo, el suelo es marrón oscuro húmedo (7.5 YR 3/2), bajo pino, marrón grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2), bajo pasto, marrón oscuro (10 YR 3/3), presenta buena aireación y estructura granular y el suelo en cultivos, similar al de pino (10 YR 3/2), sugiere una estructura más compacta y menos materia orgánica, afectando la permeabilidad y retención de agua.

Figura 3.

Escala de colores correspondiente a los usos del suelo

Páramo: 7.5 YR 3/2
Marrón oscuro



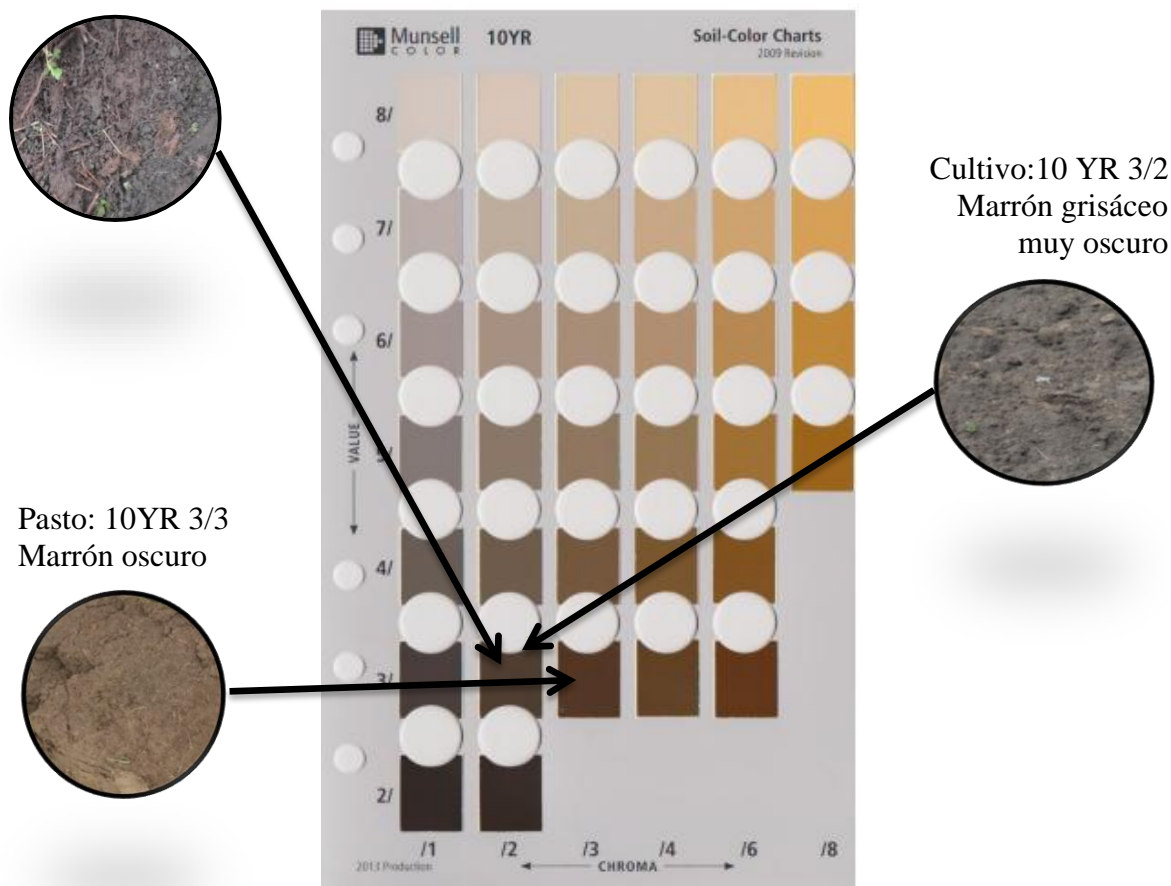
Nota. La Figura 3 representa la escala de color para la cobertura de páramo. Tomado de Tabla de color (Munsell, 2010). Munsell soil color charts. Michigan, Estados Unidos: Munsell color

Figura 4.

Escala de colores correspondiente a los usos del suelo

Pino: 10 YR 3/2

Marrón grisáceo muy oscuro



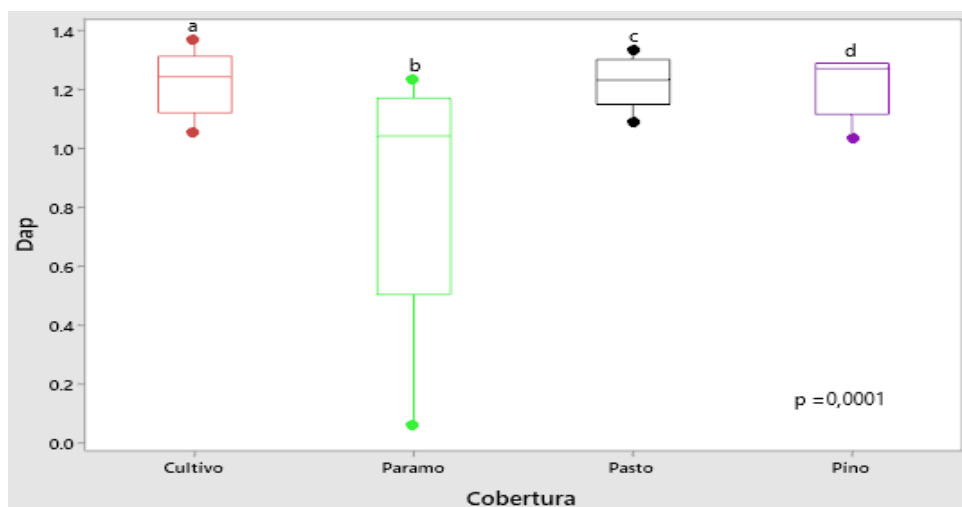
Nota. La Figura 4 representa la escala de color para la cobertura de pino, pasto y cultivo. Tomado de Atlas de color NCS (Torres Barchino et al., 2018) y Munsell (Munsell, 2010).

— Densidad Aparente

La densidad aparente (Dap) del suelo indica el grado de compactación, que afecta la retención de agua, circulación de aire y porosidad (Greco Cid et al., 2021). En la Figura 5, se muestran valores Dap en diferentes coberturas: páramo, pino, pasto y cultivos, a una profundidad de 0 a 30 cm en la microcuenca, los mismos presentaron diferencias significativas de ($P=0.0001$). En el páramo, la densidad aparente más baja (0.75 g/cm^3), el suelo bajo pino tiene una densidad de 1.22 g/cm^3 , lo que sugiere mayor compactación. El pasto, con la densidad más alta (1.23 g/cm^3), muestra una compactación mayor y los suelos bajo cultivos tienen características similares a los de los suelos bajo pino.

Figura 5.

Densidad aparente de cobertura del suelo.



Nota. La da de cada cobertura de suelo es de acuerdo con ANOVA de una vía y la prueba de significancia de Tukey.

Indicadores Químicos en la microcuenca Hualcanga

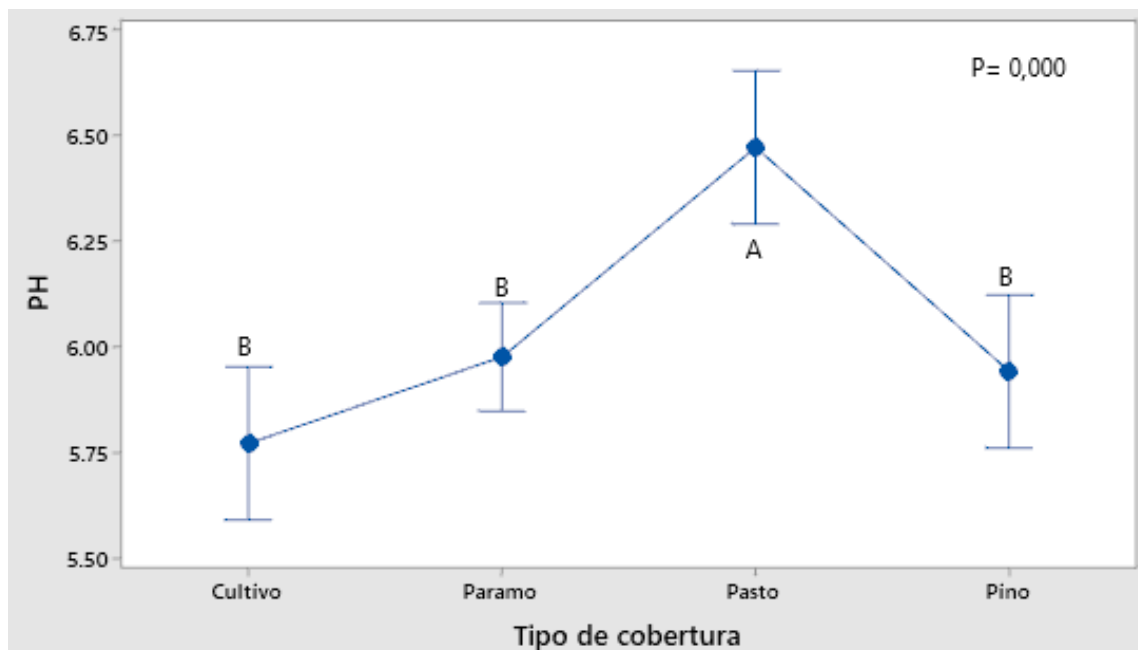
— Potencial de hidrogeno (pH)

Tabla 13.

Potencial de hidrogeno del suelo

Cobertura	N	Media	Agrupación
Pasto	15	6.4693	A
Páramo	30	5.9750	-
Pino	15	5.9407	-
Cultivo	15	5.771	-

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 6.*Intervalos de potencial de hidrogeno pH*

Nota. Esta Figura muestra una variación de potencial de hidrogeno pH en la microcuenca Hualcanga

En la Figura 6, se observa los datos de (pH) en cuatro tipos de cobertura: cultivo, páramo, pasto y pino. Los valores obtenidos oscilaron entre 5.76 y 6.39, lo que indica que todos los suelos presentan condiciones moderadamente ácidas, los suelos bajo pasto muestran pH alto (6.39), los suelos de cultivo, páramo y pino presentan valores de pH bajos, entre 5.76 y 5.98, lo que los coloca en el rango de ácidos.

— Conductividad

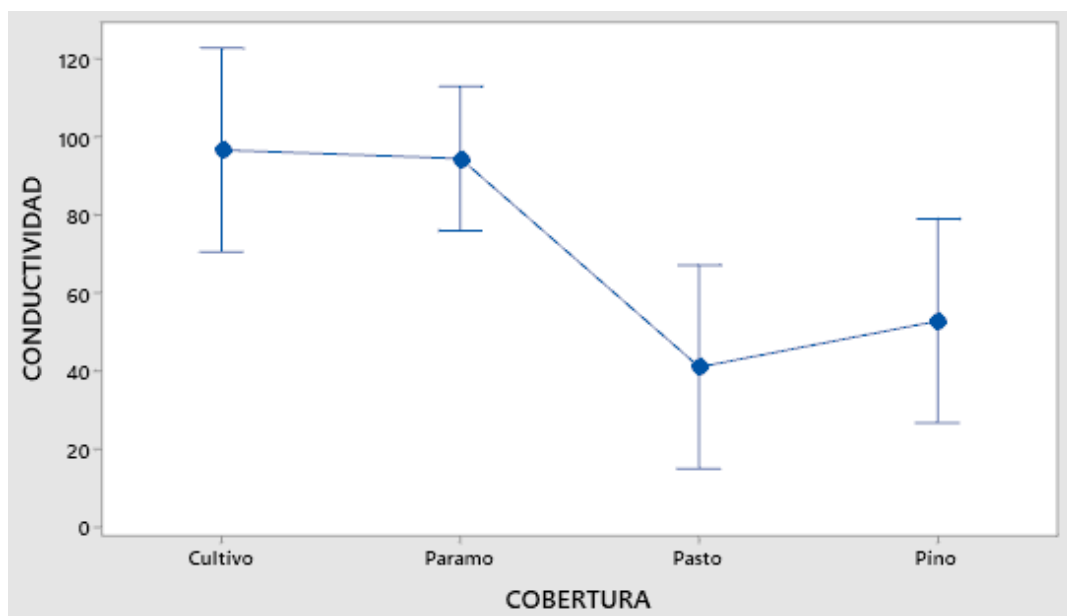
Tabla 14.*Conductividad en diferentes tipos de cobertura en la microcuenca Hualcanga.*

Cobertura	N	Media	Agrupación
Cultivo	15	96.67	A -
Páramo	30	94.5	A -
Pino	15	52.80	A B
Pasto	15	41.00	- B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 7.

Intervalos de conductividad del suelo en la zona de estudio



Nota. Esta Figura muestra la conductividad de cuatro tipos de cobertura de uso de suelo en la zona de estudio.

En la Figura 7, se observa que el suelo bajo cultivo y páramo presenta conductividades eléctricas cercanas a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual no clasifica como suelo salino, pero sugiere una ligera acumulación de sales solubles. En pasto, la conductividad disminuye a 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$, posiblemente por lixiviación intensiva, mientras que en pino se incrementa ligeramente a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, asociado a la descomposición de las acículas y la acumulación de materia orgánica ácida.

— Materia orgánica

Tabla 15.

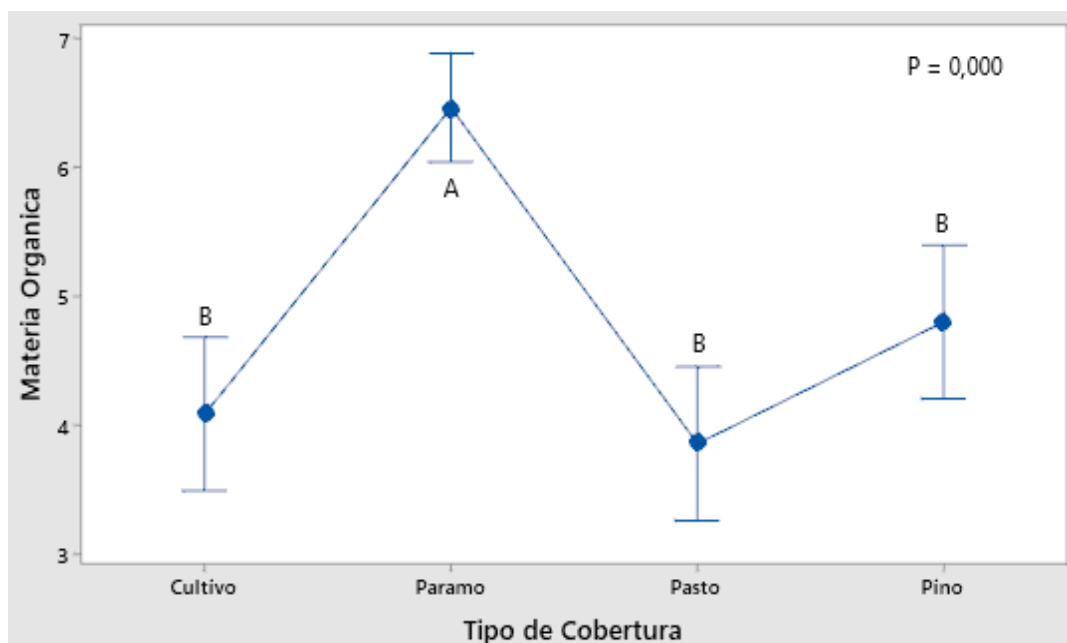
Materia orgánica del suelo en la microcuenca.

Cobertura	N	Media	Agrupación
Páramo	30	6.463	A
Pino	15	4.801	-
Cultivo	15	4.085	-
Pasto	15	3.855	-

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 8.

Intervalos de materia orgánica del suelo en la microcuenca



Nota. Esta figura muestra la materia orgánica de cuatro tipos de cobertura de uso en suelo en la zona de estudio.

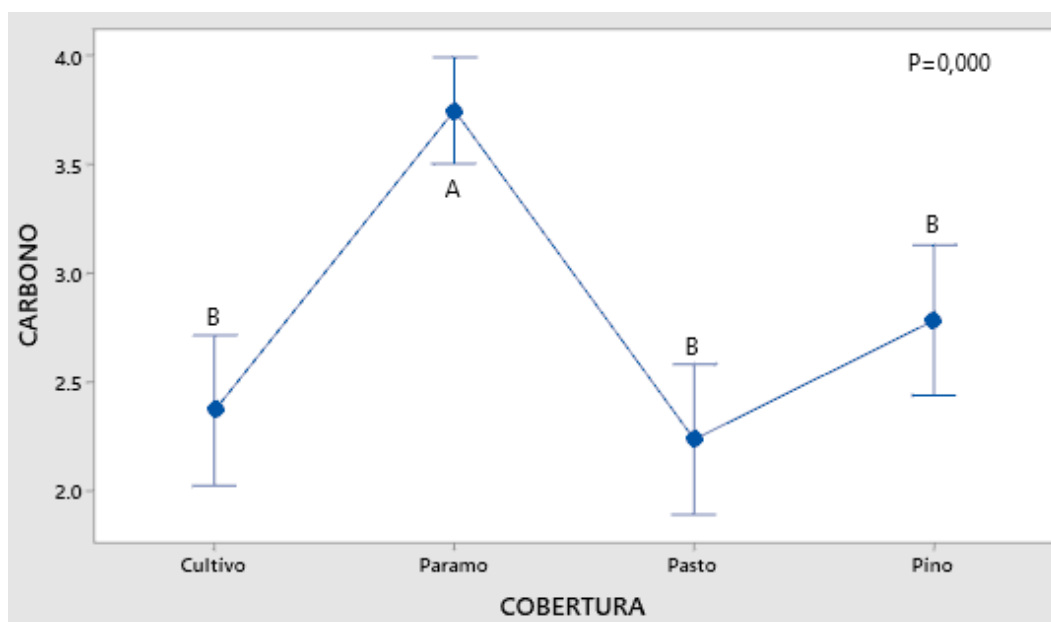
En la Figura 8, muestra el contenido de materia orgánica (MO) en suelos bajo diferentes coberturas: cultivo, páramo, pasto y pino, con una diferencia estadísticamente significativa ($P = 0,000$). El páramo presenta el mayor contenido de MO (6,5 %), lo que refleja su menor alteración y acumulación constante de materia orgánica debido a las bajas temperaturas y suelos poco intervenidos. Mientras que los suelos bajo cultivo y pasto los valores oscilan entre (4,2 % y 4,0 %, respectivamente), probablemente por la extracción continua de nutrientes y mayor exposición a erosión y lixiviación. El pino, aunque ligeramente superior (4,7 %), también muestra un nivel reducido de MO, asociado al efecto acidificante de las acículas, que limita la descomposición completa de la materia orgánica. Estos valores sugieren que el suelo del páramo tiene alta capacidad de retención de nutrientes y agua, mientras que los usos más intensivos (cultivo y pasto) evidencian una pérdida de calidad del suelo, lo que podría comprometer su sostenibilidad a largo plazo (Walteros et al., 2022).

— Carbono orgánico

Tabla 16.*Carbono orgánico del suelo en la zona de estudio*

Cobertura	N	Media	Agrupación	
Páramo	30	3.749	A	-
Pino	15	2.785	-	B
Cultivo	15	2.369	-	B
Pasto	15	2.236	-	B

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 9.*Intervalos de carbono orgánico del suelo en la zona de estudio*

Nota. Esta figura muestra carbono orgánico de cuatro tipos de cobertura de uso de suelo en la zona de estudio.

En la Figura 9, los valores de carbono en los suelos bajo diferentes coberturas muestran un patrón claro de variación según el uso del suelo. El páramo, con el valor más alto de carbono (3,8 %). En cuanto a los suelos de cultivo, pasto y pino presentan niveles más bajos de carbono (alrededor de 2,4 % a 2,8 %), lo que sugiere una mayor degradación. El manejo agrícola intensivo, el pastoreo y la plantación de pino reducen la materia orgánica, acelerando los procesos de oxidación y disminuyendo la fijación de carbono en el suelo. Esta pérdida de carbono limita la regeneración del suelo y aumenta su vulnerabilidad a la

erosión, afectando su capacidad para mantener su fertilidad y estructura (Walteros et al., 2022).

4.1.3 Relación de las propiedades físicas del suelo con la capacidad de regulación hídrica

La Figura 10, presenta la distribución de los tipos de cobertura del suelo en la microcuenca Hualcanga, ubicada en el páramo del Cerro Igualata, provincia de Tungurahua. Los resultados del análisis indican que la microcuenca tiene una extensión total de 956.65 ha, de las cuales la mayor parte corresponde a páramo con 406.55 ha (42.5%), seguido de pasto con 331.06 ha (34.6%), pino con 114.50 ha (12%) y cultivo con 104.53 ha (10.9%). Este análisis evidencia que el páramo constituye la cobertura dominante, lo cual resalta su importancia como recurso clave para la regulación hídrica y los servicios ecosistémicos. La reclasificación y representación cartográfica permiten identificar claramente las áreas de cada cobertura, sirviendo como base para la planificación y manejo sostenible de la microcuenca.

Figura 10.

Tipo de cobertura de la microcuenca Hualcanga

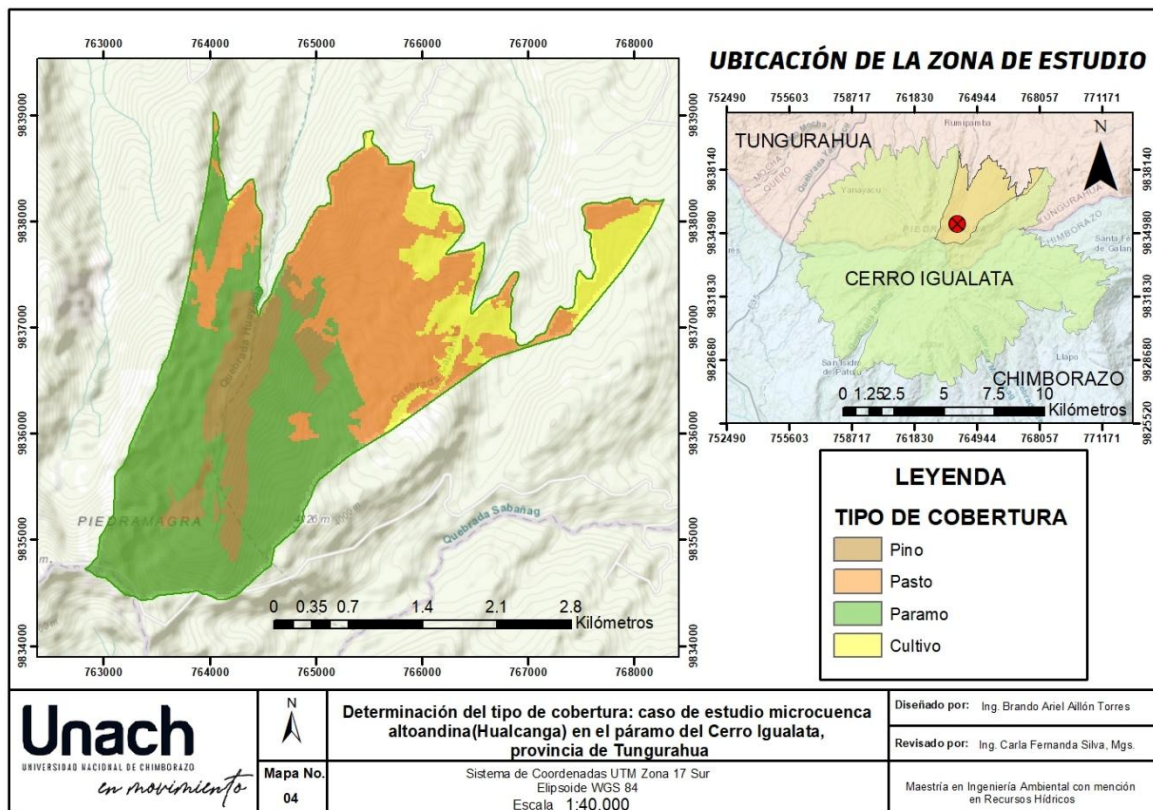


Tabla 17.*Parámetros de forma de la cuenca*

Propiedades de la superficie			
Nombre	Sigla	Unidad	Valores
área	A	km ²	9.57390
perímetro	P	km	23.8338
Cota máxima	Cmax	msnm	4320
Cota mínima	Cmin	msnm	3617
Índice de compacidad	Ic	adimensional	2.1722
longitud media	Lc	Km	2.1510
Factor de forma	Ff	adimensional	2.0692
relación de elongación	Re	adimensional	1.62318
relación de circularidad	Rci	adimensional	0.21179
Pendiente media de la cueca	Pmc	%	38

La cuenca estudiada presenta características típicas de un sistema hídrico joven y con un relieve altamente escarpado. El análisis morfométrico muestra que la cuenca tiene un área total de 9.5739 km² y un perímetro de 23.8338 km, lo que, junto con un índice de compacidad (2.1722) y una relación de circularidad (0.21179), confirma que la cuenca posee una forma irregular, favoreciendo un drenaje eficiente y una alta susceptibilidad a procesos erosivos.

En términos altitudinales, la cuenca se encuentra entre los 3617 msnm (cota mínima) y los 4320 msnm (cota máxima), con una altitud media aproximada de 3969 msnm, lo que evidencia su ubicación en una región de alta montaña. El factor de forma (2.0692) y la relación de elongación (1.62318) indican una morfología alargada, lo que contribuye a un flujo concentrado en áreas específicas, intensificando el transporte de sedimentos y agua.

Tabla 18.*Propiedades de la red hídrica.*

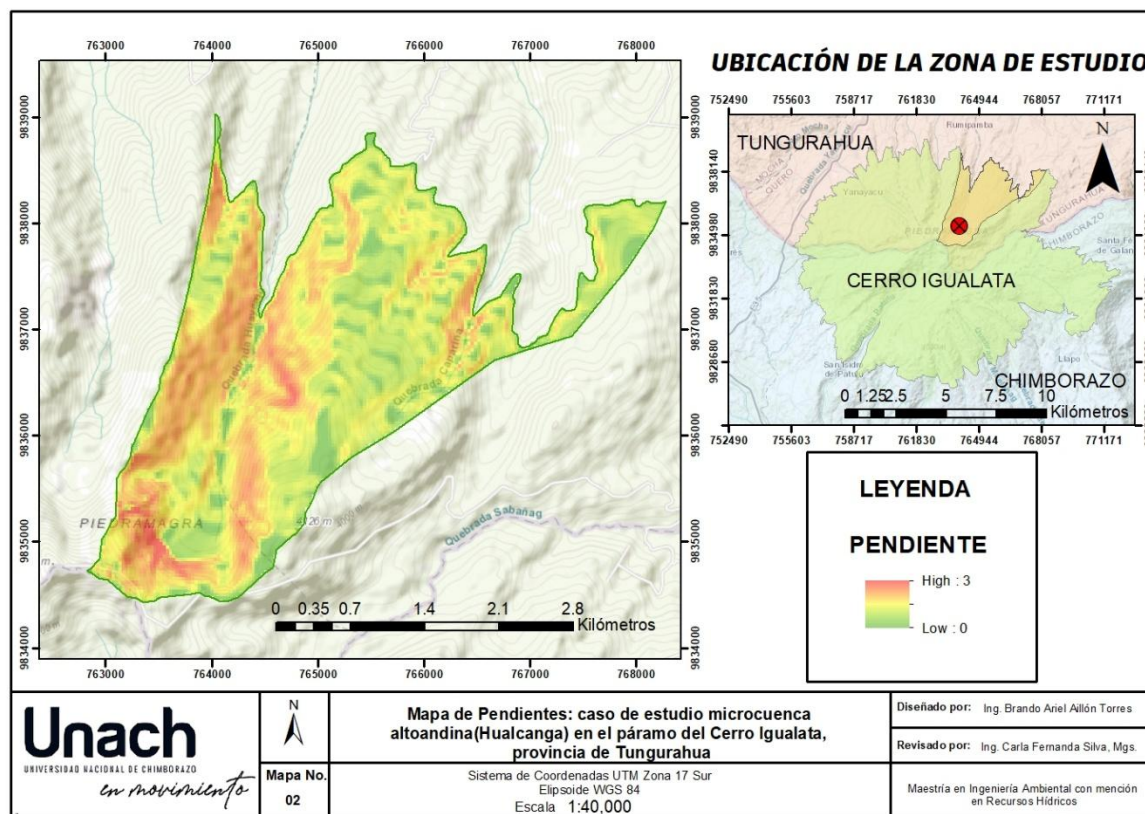
Propiedades de la red hídrica			
Nombre	Sigla	Unidad	Valores
Orden de la red hídrica	Or	adimensional	4
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	ΣRH	Km	315.467
Densidad de drenaje	Dd	Km-1	32.9508

Numero de canales o ramales	Nt	adimensional	2717
Densidad hidrográfica	Dh	Km-1	283.792
Altura máxima del rio	Hmax	msnm	4.320
Altura mínima del rio	Hmin	msnm	3.617
Pendiente media del cauce principal	Sm	adimensional	0.3267
Tiempo de concentración	TC	h	2.63

La red hídrica está compuesta por 2717 canales o ramales, con una longitud total de 315.467 km y una densidad de drenaje (32.9508 km^{-1}), lo que indica una marcada capacidad de transporte de agua superficial, influenciada por la pendiente media del cauce principal (0.3267) y una pendiente media de la cuenca (38%). Estas condiciones refuerzan el predominio de la escorrentía superficial sobre la infiltración, con un tiempo de concentración relativamente bajo (2.63 horas), típico de cuencas con pendientes pronunciadas.

Figura 11.

Mapa de pendientes de la microcuenca Hualcanga

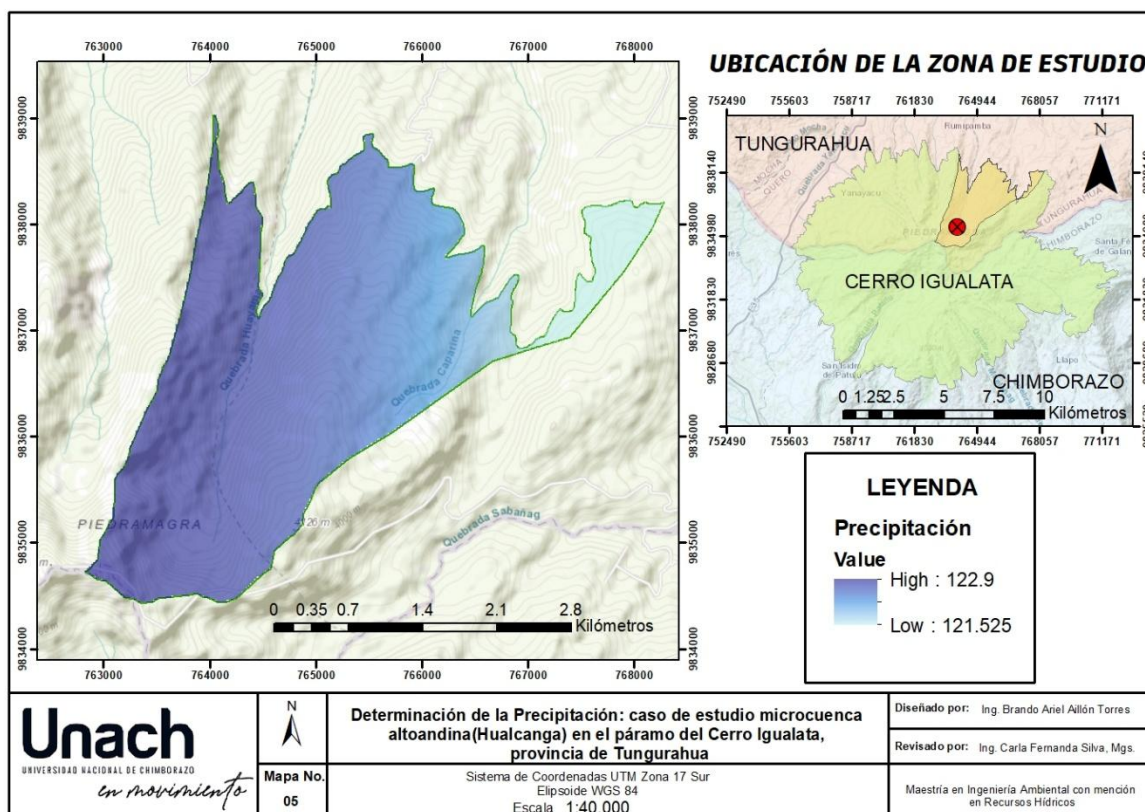


La Figura 11 muestra que la pendiente influye directamente en la respuesta hidrológica de la cuenca. En las zonas de alta pendiente, el agua de lluvia tiende a desplazarse rápidamente hacia los cauces principales, reduciendo el tiempo de concentración, que en esta microcuenca es de 2.63

horas. Además, la inclinación elevada limita la infiltración, favoreciendo una mayor generación de escorrentía superficial, lo que aumenta el riesgo de erosión y el transporte de sedimentos. Este análisis para la clasificación del número de curva (CN), es fundamental en la estimación de la escorrentía. El CN considera tanto el uso del suelo como las características del terreno, incluida la pendiente, para determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Figura 12.

Estimación de la precipitación.



La Figura 12 muestra la distribución espacial de la precipitación en la microcuenca. Los valores de precipitación oscilan entre 121.525 mm y 122.9 mm, evidenciando un rango relativamente estrecho que refleja una distribución homogénea influenciada por las características topográficas y climáticas propias de la región. Las áreas de mayor precipitación, representadas en tonos azul oscuro, se localizan principalmente en las zonas más altas de la cuenca, donde la exposición directa a corrientes de aire húmedo potencia los valores registrados. Las áreas de menor precipitación, identificadas en tonos claros, se asocian a sectores más bajos de la cuenca, posiblemente afectados por microclimas locales.

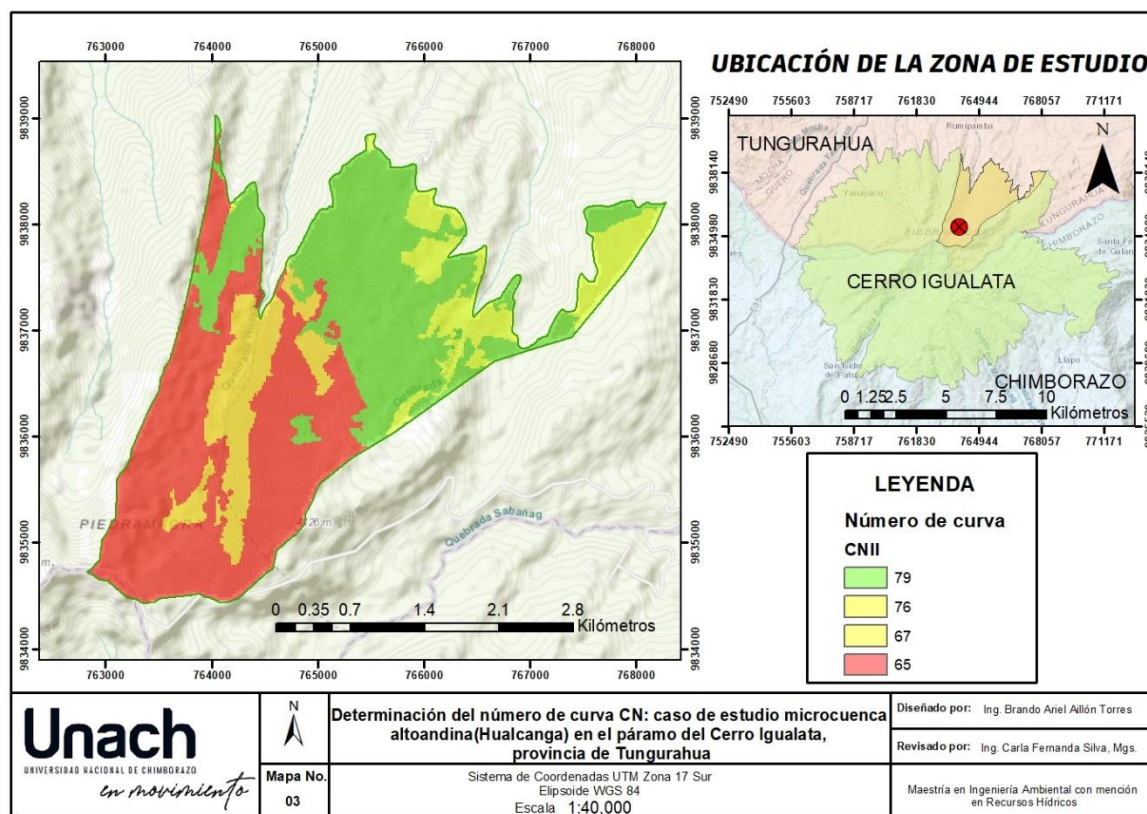
Tabla 19.*Precipitación media mensual del año 2023*

ID	Estación	Ene	Feb	Marz	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
M128	Pedro Fermin Cevallos (Colegio)	11.58	13.61	20.54	19.61	12.42	8.22	4.41	3.11	2.3	8.49	8.07	8.22
M258	Querochaca (UTA)	12.92	19.77	18.69	17.63	10.4	7.58	4.16	3.81	2.43	7.92	7.76	9.16
M377	Tisaleo	9.44	16.76	23.78	15.2	12.12	10.52	3.37	3.31	2.27	7.75	9.23	7.83
M380	Huambalo	11.76	17.05	20.94	20.28	11.68	9.39	4.34	3.67	2.64	9.82	8.84	9.6
M390	Urbina	14.18	16	20.86	15.69	10.31	8.73	4.15	2.89	2.45	7.31	10.19	8.64
M1261	Ilapo	11.58	16	22.02	20.3	13.1	6.59	4.5	3.79	2.18	7.99	8.68	8.78
M5107	Urbina - Iner	11.75	15.26	20.32	18.16	13.26	9.34	4.03	3.67	2.51	7.73	9.87	8.51
EC18RB	Riobamba - Chimborazo	11.28	16.68	18.51	16.94	11.95	9.31	4.74	2.68	2.35	7.88	8.94	8.11
EC18TS	Tisaleo	9.54	17.15	18.34	17.48	10.7	8.75	4.8	3.34	2.78	8.55	9.67	7.15
EC18BN	Baños	12.54	15.61	20.68	25.21	20.34	20.02	9.99	7.02	5.78	15.54	15.54	14.24

Para la estimación que la precipitación se constituye el principal insumo en la dinámica hídrica del sistema. La variabilidad espacial identificada influye directamente en la generación de escorrentía, la capacidad de infiltración y el almacenamiento hídrico en el suelo. Además, la tabla 13 permite analizar con mayor detalle las variaciones mensuales de las condiciones climáticas, lo que facilita una evaluación precisa de los impactos de las fluctuaciones estacionales en los flujos hídricos y la dinámica hidrológica de la región.

Figura 13.

Numero de curva (CN).



La Figura 13 establece la distribución del número de curva (CN) en la microcuenca Hualcanga, con un valor promedio de CN de 71.28, indicando una escorrentía potencial moderada a alta. Los valores de CN están relacionados con el tipo de uso del suelo, grupo hidrológico y su textura; las áreas en color rojo (CN 79) corresponden a suelos de páramo con textura franco-arenosa, caracterizados por una mayor escorrentía debido a su compactación superficial; el naranja (CN 76) representa áreas de pino con estructura arenoso-franca, mostrando una infiltración intermedia; el verde (CN 67) identifica zonas de pastos con textura franco-arenosa y mayor capacidad de retención hídrica; y el amarillo (CN 65) está asociado a áreas de cultivos con textura franco-arenosa, donde la alteración del suelo reduce la infiltración.

Tabla 20.

Resultados obtenidos.

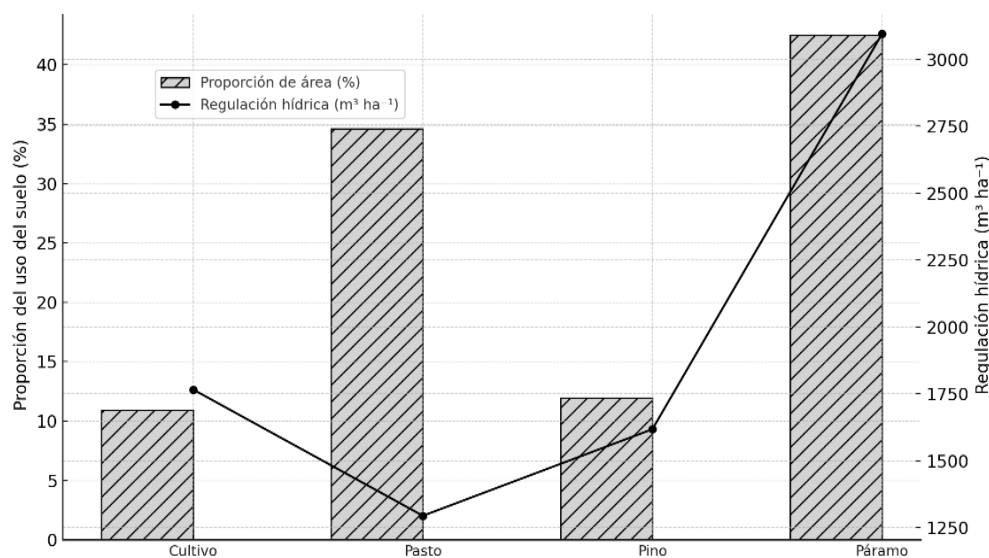
Código	Uso del suelo	Área (ha)	IE (mm)	Textura	Porcentaje (%)	Regulación hídrica (m ³ ha ⁻¹)
TBA1	Cultivo	104.53	6.35	Franco-arenosa	10.93	184,611

TBA2	Pasto	331.06	8.47	Arenoso-franco	34.60	428,721
TBA3	Pino	114.5	12.7	Arenoso-franco	11.97	185,305
TBA4	Páramo	406.55	25.4	Franco-arenosa	42.50	1,258,165
					100	2,056,802

En la tabla 15, la evaluación de la regulación hídrica evidencia diferencias significativas entre los usos del suelo estudiados. El cultivo, con un área de 104.53 ha, registra la menor capacidad de regulación hídrica total (184,611 m³), atribuida a su baja infiltración efectiva (6.35 mm) y textura franco-arenosa que abarca el 10.93% del área. El páramo, con 406.55 ha, presenta la mayor capacidad de regulación hídrica (1,258,165 m³), gracias a su alta infiltración efectiva (25.4 mm) y textura franco-arenosa, que representa el 42.50% del área total. Los usos pasto (TBA2) y pino (TBA3) presentan valores intermedios de regulación hídrica, con 428,721 m³ y 185,305 m³, respectivamente, influenciados por sus áreas de 331.06 ha y 114.5 ha, texturas arenoso-franco, y tasas de infiltración efectiva moderadas (8.47 mm y 12.7 mm).

Figura 14.

Comparación del uso de suelo y su contribución a la regulación hídrica.



La Figura 14, compara diferentes usos del suelo (cultivo, pasto, pino y páramo) en función de su proporción de superficie (%) y su contribución a la regulación hídrica (m³ ha⁻¹). El páramo, con la mayor proporción de área (40%) y la capacidad de regulación hídrica más alta, se posiciona como el principal regulador hídrico de la cuenca. El pasto, aunque ocupa un 35% del área, tiene una regulación hídrica significativamente menor que el páramo, similar a los usos de pino y cultivo, que

ocuparon un mayor territorio cada uno. Este análisis destaca las diferencias entre los usos del suelo y resalta la importancia del páramo en la provisión de servicios ecosistémicos hídricos en la microcuenca.

4.1.4 Relación entre las características químicas del suelo con las dinámicas al que ha sido sometido el ecosistema.

- Conductividad

De acuerdo con la Tabla 10, los valores registrados indican que los suelos de la microcuenca Hualcanga no son salinos, y la conductividad eléctrica (CE) varía según el tipo de cobertura. En los suelos de páramo, la CE es baja debido a la influencia de actividades como el pastoreo intensivo y la quema, que alteran sus propiedades. En suelos agrícolas, la CE está relacionada con la mineralización de la materia orgánica y la liberación de iones por actividad agrícola y procesos naturales, mientras que, en los suelos con pasto, la lixiviación intensa causada por una mayor infiltración de agua contribuye a su variabilidad. En suelos con cobertura de pino, se observa un incremento en la CE respecto a los suelos de pasto, lo que se asocia a la descomposición de acículas y la acumulación de compuestos ácidos que pueden aumentar la acidez del suelo, afectar la disponibilidad de nutrientes y favorecer la movilización de cationes como aluminio (Al^{3+}) y hierro (Fe^{2+}).

- pH

Las diferencias en el potencial de hidrógeno (pH) entre coberturas responden a procesos específicos de cada sistema edáfico. En pasto, la mineralización de la materia orgánica libera compuestos alcalinos que favorecen la actividad microbiana, elevando así el pH. En sistemas agrícolas, la acidificación del suelo está relacionada con el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados y la extracción de bases durante la cosecha. En el páramo, la acumulación de materia orgánica genera ácidos húmicos y fúlvicos, contribuyendo a la acidificación del perfil edáfico, mientras que en plantaciones de pino la descomposición de acículas libera compuestos fenólicos y ácidos orgánicos que reducen aún más el pH. En la Tabla 11 se presenta la clasificación según el rango de pH utilizada para identificar cada cobertura. Estos procesos determinan la disponibilidad de nutrientes y la fertilidad del suelo, impactando directamente su productividad y estabilidad ecológica.

- Materia y carbono orgánico

Los resultados mostraron que la materia orgánica (MO) y el carbono orgánico (CO) del suelo están directamente influenciados por el tipo de cobertura y su grado de intervención. En el páramo, un ecosistema poco alterado, las bajas temperaturas favorecen la acumulación de MO. Los efectos del cambio climático pueden modificar los patrones de acumulación de MO y el balance de carbono,

y si se producen cambios en el uso del suelo, como su conversión, se generaría una pérdida inmediata de carbono en los horizontes orgánicos. En suelos bajo cultivo y pasto, la extracción de nutrientes, la erosión y la lixiviación disminuyen los niveles de MO y CO, mientras que el sobrepastoreo reduce la cobertura vegetal y limita la acumulación de carbono. Además, el uso de fertilizantes y agroquímicos puede alterar la actividad microbiana y la descomposición de la MO. En suelos con plantaciones de pino, los niveles de carbono orgánico son reducidos debido al efecto acidificante de sus acículas, lo que impacta la disponibilidad de materia orgánica. Asimismo, la extracción de madera limita el ingreso de nuevos aportes orgánicos y disminuye el carbono almacenado en la biomasa. La erosión en pendientes pronunciadas intensifica la pérdida de estos compuestos, comprometiendo la fertilidad del suelo y su capacidad de retención hídrica. Estas condiciones afectan su estabilidad y su función como reservorio de carbono. Además, la acidificación del suelo restringe la descomposición de la materia orgánica, agravando su degradación

4.2 Discusión de los Resultados

4.2.1 *Análisis de las propiedades físico-químico de la microcuenca Hualcanga*

— pH

Los valores registrados de pH para las coberturas de páramo, pino, pasto y cultivo oscilan entre 5.76 y 6.39, esto indica que el pH de las diferentes coberturas fueron similares, lo cual concuerda con los datos reportados en la investigación de (Fernandez et al., 2019), donde las relaciones de pH de las coberturas de vegetación de páramo y forestal de pino tendieron a una similitud con una diferencia significativa en la profundidad de la recolección de muestras.

De acuerdo con el estudio de (Quichimbo et al., 2012) las coberturas antropizadas promueven la acidificación de los suelos debido a la reducción del porcentaje de saturación de bases, a diferencia de las coberturas sin alteración antrópica. Esto se relaciona ligeramente con los resultados de potencial de hidrógeno (pH) de la cobertura de cultivo, ya que esta presentó los valores más bajos de dicha propiedad en comparación con las otras coberturas de suelo: pino, pasto y páramo.

Los suelos bajo pasto muestran el pH más alto, ubicándose en un rango más cercano a la neutralidad, lo que sugiere que esta cobertura podría estar contribuyendo a una mayor alcalinidad relativa en comparación con las demás (Sierra et al., 2022). Sin embargo, es

notable que existen diferencias significativas en el grado de acidez según el tipo de cobertura.

— **Densidad aparente**

Estudios relacionados sobre las propiedades del suelo como el de (Hernández et al., 2009) mencionaron que la densidad aparente de suelos de páramo bajo vegetación nativa o no intervenidos presentan bajas densidades aparentes, lo que indica un suelo menos compacto, con mayor capacidad para infiltrar agua y aire. Esto refuerza la validez de los datos obtenidos en esta investigación donde la cobertura de páramo presentó los valores con menor densidad aparente con respecto a las demás coberturas, demostrando así la importancia de los suelos de páramo como reguladores hidrológicos por su capacidad de retención de agua.

Además de acuerdo con (Quichimbo et al., 2012) la densidad aumenta bajo condiciones antrópicas, esto reduce los espacios porosos y limita la circulación de agua y aire, afectando la disponibilidad de elementos esenciales para las raíces. La capacidad de infiltración disminuye, incrementando el riesgo de escurrimiento superficial, especialmente durante lluvias intensas. Tal como es el caso de las coberturas de pino, cultivos y pasto, donde la densidad aparente presentó valores relativamente altos, la realidad en la microcuenca Hualcanga, es que, sin prácticas adecuadas, la eficiencia del suelo disminuirá.

— **Materia y carbono orgánico**

Un estudio realizado en suelos de páramos en la sierra sureste del Ecuador (Pinos et al., 2021) menciona que la materia orgánica y el carbono orgánico en este tipo de cobertura de suelo mantiene altos valores de estas propiedades en comparación con otros tipos de suelo intervenidos. A partir de este análisis, se estableció que la cobertura del páramo de la microcuenca presenta una mayor reserva de carbono ya que favorece la acumulación de materia orgánica por su vegetación y condiciones climáticas (bajas temperaturas). Esto mejora la calidad del suelo, su capacidad de retención de agua y reduce las tasas de descomposición de la materia orgánica (Quiroz et al., 2021).

Por otro lado de acuerdo con el estudio de (Chamorro et al., 2017) los cambios en el uso de suelo producen modificaciones significativas en la fijación de carbono en el suelo, similar a esta investigación ya que las coberturas de suelo: pino, pasto y cultivo presentaron

valores por debajo del páramo y por consiguiente una disminución en la capacidad de almacenamiento de agua.

— **Color**

Analizando la investigación sobre la descripción morfológica de suelos para varios sitios de Botana en Colombia (Zúñiga et al., 2018), se establecieron diferentes coberturas de suelo, entre ellas páramo con 10YR, bosque con 7.5YR – 10YR y cultivo con 10YR, respectivamente. Estas coberturas mostraron similitudes con los resultados de la microcuenca Hualcanga, donde las coberturas de pino y cultivo registraron también una matiz 10YR. Sin embargo, el valor y croma varían debido a las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de cada zona.

En la microcuenca Hualcanga, las texturas predominantes fueron de tipo arenoso, lo que favorece una buena retención de humedad, mientras que en la investigación de (Zúñiga et al., 2018) los suelos presentaron texturas más arcillosas. Además, en las coberturas de páramo, pino, pasto y cultivo en Hualcanga, se identificaron tonalidades con escalas de marrones a grises, asociadas a un alto contenido de materia orgánica y una mayor descomposición de esta, particularmente en áreas bajo pino, donde la caída constante de hojas puede generar acidificación del suelo debido a la liberación de compuestos orgánicos durante su descomposición.

— **Textura**

En la investigación de (Fernandez et al., 2019), los resultados arrojaron que los suelos que tiene coberturas de plantaciones forestales de pino presentaron un color negro con la característica de que a partir del horizonte cuatro tuvieron un textura arenoso franco. Así mismo, de acuerdo con el análisis de la textura para los suelos de la microcuenca Hualcanga presentaban altos contenidos de arena, por lo que en las cobertura de pino y páramo resultaron ser franco arenoso (FA) similares al estudio de (Daza et al., 2014) . Cabe destacar que ambas coberturas presentaron una textura similar, debido a que la cobertura de pino se encontró ocupando territorio de páramo, ya que ambos suelos derivan principalmente de materiales de origen granítico o arenisco, ricos en minerales como cuarzo y feldespato.

De acuerdo con el estudio de (Taboada et al., 2016) indican que los suelos franco arenosos favorece el buen drenaje, a la vez que retiene suficiente humedad y nutrientes para el desarrollo vegetal mismos que concuerdan con los datos obtenidos.

4.2.2 Relación de las propiedades físicas del suelo con la capacidad de regulación hídrica

Para el análisis de cómo influyen las propiedades físicas del suelo en la capacidad de regulación hídrica no se enfocó en la oferta de agua sino en la regulación hídrica como servicio ecosistémico, ya que se identificó la cantidad de agua que es captada e infiltrada a capas subterráneas bajo diferentes coberturas de uso de suelo y las propiedades físicas del mismo.

De acuerdo con el estudio de (Jullian et al., 2018), sobre cómo la regulación hídrica se ve afectada por diferentes coberturas y usos suelo en 16 cuencas hidrográficas de la comuna de Panguipulli al sur de Chile, se demostró que escenarios con aumento de plantaciones forestales exóticas presentaron una muy baja capacidad de regulación hídrica, por la presencia de plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus nitens*) y pino (*Pinus radiata*), similares a escenarios con cultivos, mientras que escenarios bajo conservación de bosque y vegetación nativas presentaron valores más altos del servicio ecosistémico ya que fueron suelos de tipo A con texturas gruesas de muy buen drenaje lo que permitió una mayor capacidad de regulación hídrica.

Tal es el caso en la microcuenca Hualcanga, cuyos resultados de la capacidad de regulación hídrica fueron relativamente bajos en las coberturas de cultivos y pino con 10.93 y 11.97% en comparación con las coberturas de páramo y pasto 42.50 y 34.60%. Esto se debe principalmente a que las plantaciones de pino producen menores tasas de evapotranspiración y mayor consumo de agua durante su crecimiento (Huber et al., 2010), por lo que, el agua captada e infiltrada es menor disminuyendo la capacidad de regulación hídrica para esta cobertura. En el caso de la categoría de páramo, a pesar de que tuvo una textura franco-arenosa con estructuras granular medias a gruesas, la ausencia de intervención humana y la presencia de vegetación nativa reduce la ocurrencia de escorrentía superficial y facilita la entrada de agua en el suelo, favoreciendo la generación de flujo subsuperficial en las cuencas de páramo, y por consiguiente una mejor capacidad de regulación hídrica (G. Mosquera et al., 2023)

Por ende, es relevante mantener la vegetación nativa precisamente en estas áreas que presentaron una baja capacidad de este servicio ecosistémico, con el fin de otorgar mayor

capacidad para enfrentar la escasez hídrica a través del aumento en la capacidad de regulación hídrica.

Según la investigación de (Jiménez, 2018), cuando la densidad aparente del suelo aumenta, se incrementa la compactación, lo que afecta las condiciones de retención de humedad y tiene un impacto significativo en la capacidad de regulación hídrica. Los resultados de los análisis de laboratorio respaldan esta afirmación, ya que los suelos con baja densidad, como los del páramo, presentan mayor porosidad, lo que favorece la infiltración y el almacenamiento de agua. Los suelos más compactados, como los de cultivo, pasto y pino, limitan la infiltración, lo que incrementa la escorrentía superficial y reduce la recarga hídrica. Además, la densidad aparente de estos suelos está correlacionada con el grado de alteración de la materia orgánica; es decir, a medida que los materiales orgánicos se descomponen, la densidad aparente aumenta, lo que refuerza la idea de que la compactación y la descomposición de la materia orgánica son factores clave en la capacidad de regulación hídrica del suelo.

Según (Hofstede, 2020), existe una relación mutua entre agua y materia orgánica: existe abundante agua, la materia orgánica aumenta debido a la menor descomposición, y cuando hay mayor cantidad de materia orgánica, se mejora la absorción de agua. En este contexto, la materia orgánica (MO) mejora la retención y absorción de agua en el suelo. En el páramo, los altos niveles de MO favorecen una mejor retención de agua, aumentando su disponibilidad. Sin embargo, en suelos con menor MO, como los de cultivo, pino y pasto, la capacidad de retención hídrica disminuye, lo que genera un mayor escurrimiento. Así, la MO actúa como un regulador hídrico, manteniendo la humedad de los suelos.

Según (Pinzón, 2018), a pesar de ser una de las propiedades más estables del suelo, la textura puede alterarse gradualmente por un manejo inapropiado, por lo que es necesaria una observación frecuente por parte de especialistas para mantener una adecuada regulación hídrica. En ese contexto, la textura del suelo influye directamente en la regulación hídrica al determinar su capacidad de retención y movimiento del agua. En la microcuenca Hualcanga, los suelos franco arenosos (FA) y arenosos francos (AF) presentan una alta proporción de arena, lo que favorece una infiltración rápida, pero reduce la capacidad de retención de agua.

(I. Rodríguez et al., 2020) señalan que las propiedades físicas del suelo, como la textura, densidad, pH y materia orgánica, son clave para la regulación hídrica, ya que

influyen en la capacidad de almacenamiento y gestión del agua. La textura determina la infiltración y retención; suelos arcillosos retienen más agua, mientras que los arenosos drenan rápidamente. Lo que genera que la densidad impacte con la porosidad, afectando la circulación del agua; suelos más densos dificultan la infiltración y favorecen la escorrentía. La materia orgánica mejora la estructura, aumentando la retención de agua y favoreciendo la infiltración. El pH, al influir en la actividad biológica, afecta la disponibilidad de nutrientes y, por ende, la vegetación, que regula la humedad a través de la transpiración. En suelos con cobertura vegetal, estas propiedades contribuyen a un equilibrio hídrico, pero en áreas intervenidas por actividades como en cultivo y pasto, la alteración de estas propiedades reduce la capacidad del suelo para regular el agua, exacerbando problemas de erosión y escorrentía.

4.2.3 Relación entre las características químicas del suelo con las dinámicas al que ha sido sometido el ecosistema.

Páramo

Investigaciones de (Calispa et al., 2023) muestran que la reducción de la cobertura de páramo debido a la expansión agrícola (incremento un 838 % en ciertas áreas entre 1991 y 2017) y la ganadería intensiva ha generado una disminución del carbono del suelo y alteraciones en la vegetación nativa. La compactación y el pisoteo han favorecido especies más resistentes, como las almohadillas, mientras que la remoción total de la cobertura vegetal ha intensificado los procesos erosivos. En este contexto los resultados reflejan que la química del suelo en el páramo está estrechamente vinculada a su estado de conservación y a las presiones ambientales a las que ha sido sometido; el alto contenido de materia orgánica y carbono es indicativo de una dinámica natural donde la baja temperatura y la escasa intervención antrópica limitan la descomposición y favorecen la acumulación de estos compuestos, pero su estabilidad es frágil ante el cambio de uso del suelo. Factores como la ganadería, el pisoteo y los incendios no solo compactan y erosionan el suelo, sino que también aceleran la mineralización del carbono, comprometiendo su capacidad de regulación hídrica. A largo plazo, estas modificaciones pueden generar pérdidas de fertilidad, alterar el almacenamiento de carbono y reducir la funcionalidad ecosistémica del páramo, destacando la necesidad de monitoreo y estrategias de conservación para mitigar los efectos del cambio de uso del suelo y del cambio climático.

Pino

Con base en lo propuesto por (Fioroni et al., 2020), las plantaciones forestales modifican la dinámica del suelo, afectando su estructura, drenaje y capacidad de almacenamiento de carbono. Según los datos obtenidos en este estudio, las plantaciones de pino se ven afectadas en la estructura del suelo, su capacidad de almacenamiento de carbono y el contenido de materia orgánica y esto debido a la acumulación de acículas, que generan un pH más ácido y modifican la actividad microbiana, ralentizando la descomposición y formación de humus estable. Esta acidificación, junto con una menor diversidad radicular en comparación con ecosistemas nativos, reduce la estabilidad de los agregados del suelo, afectando su porosidad y capacidad de retención de agua.

Pasto y cultivo

Tal como lo indican (Pinos et al., 2021) la integración de la agricultura y con el pastoreo genera dinámicas que requieren un manejo adecuado de los recursos naturales. En este contexto los ecosistemas de pasto y cultivo en la microcuenca han sido modificados por su uso, afectando las propiedades químicas del suelo. La conductividad eléctrica (CE) en suelos de cultivo es más alta que en pasto esto debido al uso intensivo de fertilizantes, lo cual incrementa la concentración de iones solubles en el suelo. Este cambio en la conductividad refleja una alteración en la dinámica iónica, afectando la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. En pasto, la descomposición de la materia orgánica genera un equilibrio más natural de nutrientes, mientras que en los suelos de cultivo la fertilización y lixiviación contribuyen a una acidificación progresiva, alterando la estructura del suelo y reduciendo su capacidad de retención de agua y nutrientes. Con el paso del tiempo si estas prácticas continúan, la fertilidad del suelo podría deteriorarse aún más, promoviendo la erosión y la pérdida de biodiversidad, lo que afectaría gravemente la productividad y la estabilidad ecológica del ecosistema.

Las características químicas del suelo están estrechamente vinculadas a las dinámicas a las que ha sido sometido el ecosistema, ya que los cambios en la cobertura vegetal, el uso del suelo y las prácticas humanas influyen directamente en la composición y calidad del suelo. Las actividades como la agricultura intensiva, la deforestación o las plantaciones forestales, alteran las propiedades químicas como: el pH, la materia orgánica, el contenido de carbono,

la conductividad eléctrica y la capacidad de retención de nutrientes del suelo. Estos cambios impactan la estructura y función del suelo, afectando su capacidad para la regulación hídrica, soportar la biodiversidad y regular el carbono. Las dinámicas como la erosión, la compactación y la extracción de recursos naturales contribuyen a la degradación del suelo, reduciendo su fertilidad y acelerando procesos de oxidación y pérdida de nutrientes.

Conclusiones

- Se determinaron las propiedades físico-químicas del suelo en la microcuenca Hualcanga bajo diferentes coberturas de suelo: páramo, pino, pasto y cultivo, cuyas variaciones en estas propiedades se debió a las condiciones naturales del ecosistema y al impacto del uso en el suelo. La textura predominante en páramo y pino fue de franco arenoso (FA), mientras que en coberturas de pasto y cultivos fue arenoso franco (AF), cuya propiedad se debe a una mayor presencia de arenas en suelos intervenidos y su menor estabilidad estructural. La densidad aparente presentó valores más bajos en páramo (0.75 g/cm^3), lo que indica una estructura suelta y alta porosidad debido a la acumulación de materia orgánica (MO) y baja compactación, mientras que en pasto y cultivos los valores elevados (1.23 g/cm^3 y 1.22 g/cm^3) evidenciaron una compactación provocada por el pisoteo de ganado, la agricultura y la reducción del aporte de MO. Por lo tanto, con los resultados se determinó que existen diferencias en las propiedades del suelo, mismas que están relacionadas con el grado de intervención antrópica, la cobertura vegetal y los procesos edáficos propios de cada ecosistema.
- La relación de las propiedades físicas con la regulación hídrica de la microcuenca Hualcanga demostró que estas intervienen significativamente en la capacidad reguladora, ya que la cantidad de agua que es captada e infiltrada a capas subterráneas depende de propiedades como la textura, estructura y densidad aparente. A pesar de que la categoría de páramo tuvo una textura franco-arenosa con estructuras granular medias a gruesas, la ausencia de intervención humana y la presencia de vegetación nativa reduce la ocurrencia de escorrentía superficial y facilita la entrada de agua en el suelo, favoreciendo la generación de flujo subsuperficial en las cuencas de páramo, y por consiguiente una mejor capacidad de regulación hídrica, ya que presentó la mayor capacidad de $1,258,165 \text{ m}^3$. Sin embargo, la cobertura de cultivo registró la menor capacidad de regulación con $184,611 \text{ m}^3$ por su compactación superficial y baja infiltración, debido a la morfología irregular y las pendientes de la cuenca que favorecieron la escorrentía superficial, reduciendo la infiltración. Por último, el número de curva (CN) promedio fue de 71.28 indicó una escorrentía potencial moderada a alta en la microcuenca, con diferencias entre los tipos de cobertura del suelo: los suelos de páramo mostraron

mayor retención hídrica, mientras que los de cultivo y pino favorecieron una mayor escorrentía.

- Se determinó que las propiedades químicas tuvieron variaciones significativas de acuerdo a cada dinámica a la que fue sometida. En el caso de la cobertura de páramo, la vegetación nativa y su cobertura no intervenida presentó valores de conductividad eléctrica (CE) relativamente bajos, en comparación con otras coberturas de suelo como cultivos y pasto. En cuanto a la materia y el carbono orgánicos, se observó una mayor acumulación en páramo debido a las bajas temperaturas que reducen la descomposición de la MO y mineralización, mientras que en suelos agrícolas y de pasto, la extracción de nutrientes, los problemas de erosión y la lixiviación disminuyeron sus niveles. En suelos con pino, la acidificación restringió la descomposición de la materia orgánica, limitando su disponibilidad y afectando la fertilidad del suelo. El pH presentó diferencias asociadas a los procesos edáficos propios de cada cobertura: en páramo la acidificación natural en ecosistemas de altura, en pasto la mineralización favoreció su alcalinidad, mientras que, en cultivos el uso de fertilizantes y la acumulación de materia orgánica contribuyeron a su acidificación, siendo más pronunciada en suelos con pino por la descomposición de acículas.

Recomendaciones

- Se recomienda desarrollar e implementar proyectos de inversión en reforestación con especies vegetales nativas, con el objetivo de recuperar las áreas degradadas debido a la deforestación en la microcuenca Hualcanga. Estos proyectos deben considerar un enfoque ecosistémico, promoviendo la restauración de la biodiversidad, la mejora en la retención de agua y la mitigación de los impactos negativos derivados de la degradación ambiental.
- Es fundamental diseñar e implementar campañas de comunicación y sensibilización dirigidas a la población local, enfatizando la importancia de los servicios ecosistémicos en el bienestar social y ambiental. En particular, se debe destacar el rol del servicio ecosistémico de regulación hídrica en la provisión de recursos hídricos, así como los impactos que podría generar la alteración del ecosistema en la disponibilidad y calidad del agua.

- Se recomienda expandir el estudio de las propiedades fisicoquímicas relacionadas con la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica a otras microcuencas dentro del área de influencia del cerro Igualata. Dado que el presente análisis se realizó sobre una fracción limitada del territorio, es necesario considerar que las condiciones socioeconómicas y ambientales pueden variar significativamente según la localización de los oferentes del servicio ecosistémico.

Referencias Bibliográficas

- Baldoceda, Á., Maldonado, M., & Alcántara, F. (2021). Análisis del porcentaje de humedad , materia orgánica y porosidad del suelo de dos tipos de bofedales. *Facultada de Ingeniería Agraria, Universidad Católica Ica Sedes Sapientiae, Lima, Perú*, 20, 17–29. <https://doi.org/10.33326/26176033.2021.2.1204>
- Calispa, M., Vasconez, F. J., Santamar, S., & Samaniego, P. (2023). Los suelos de los páramos del Ecuador. In R. Hofstede, P. Mena, & E. Suárez (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 40–75). USFQ PRESS.
- Carrera, D. V. (2022). *Ciencia del suelo Caracterización y conservación en Ecuador* (E. de la U. de las F. Armadas-ESPE (ed.); 1era Edici). Revisión científica.
- Cervantes, R., Sánchez, J. M., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J., & Locatelli, B. (2021). Contribución de los ecosistemas Altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*, 20(2). <https://doi.org/10.21704/rea.v20i2.1804>
- Chambers, F., Beilman, D., & Yu, Z. (2011). Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density , organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. *Mires and Peat*, 7(September 2016), 1–10. http://pixelrauschen.de/wbmp/media/map07/map_07_07.pdf
- Chamorro, S. E., González, M. A., & Palacios, T. A. (2017). Almacenamiento de agua y fijación de carbono en reserva ecológica El Ángel y su impacto en el uso del suelo. In *Investigación y Desarrollo* (Vol. 2, Issue 8, pp. 42–48). <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.54>
- Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión Páramos del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71–81.
- Córdova, D., Paredes, D., & Alulema, R. (2017). Determination of the Hydrological Parameter Curve Number in the Basin of Batán , Usando Sistemas De Información Geográfica. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 2(8), 29–39.
- Cremona, M. V., & Enriquez, A. S. (2020). ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO QUE CONDICIONAN SU COMPORTAMIENTO: El pH y la conductividad eléctrica. *Cuando Se Solicita Un Análisis de Suelo, Los Primeros Parámetros Que Se*

Suelen Recomendar Son El PH y La Conductividad Eléctrica. Sin Embargo, a La Hora de Analizar Los Resultados En Conjunto, Suele Prestarse Más Atención a Los Otros Resultados Informados, 1, 5–8. <https://doi.org/73>

- Dabadie, M., Pérez, C., Arturi, M., Goya, J., & Sandoval, M. (2018). Calibración del método de pérdida de peso por ignición para la estimación del carbono orgánico en Inceptisoles del NE de Entre Ríos. *Revista de La Facultad de Agronomía, 117*(1), 157–162. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/70942>
- Daza, M., Hernández, F., & Alba, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, 67*(1), 7189–7200. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v67n1/v67n1a06.pdf>
- Díaz, Á., & Mercado, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo, 35*(2), 452–470. <https://www.redalyc.org/pdf/852/85252030011.pdf>
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. In *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación* (Cuarta). file:///C:/Users/Alina Belen Ortiz/Downloads/a0541s00 (1).pdf
- Fernandez, C. J., Cely, G. E., & Serrano, P. A. (2019). Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 28*(1), 121–133. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152.1>
- Fioroni, F., Soto, M., Fernández, N., & Carron, A. (2020). *Los Pinos Y Sus Efectos Invisibles. 17*(30), 40–48.
- García, C. S., Silva, I. C., Rodríguez, H. G., Díaz, M. I. Y., Monsiváis, J. G. M., & Meza, M. V. G. (2021). Efecto de diferentes usos del suelo en las propiedades físicas e hidrológicas de un Luvisol en Oaxaca Effect. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 12*(68), 151–177. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.982>
- Greco Cid, L., López, T., Herrera, J., & González, F. (2021). Variación de la Densidad Aparente para diferentes contenidos de agua en suelos cubanos Variation of Bulk

- Density for different water contents in Cuban soils. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11, 8. <https://doi.org/586266250001>
- Gualshpa, E., Villares, M., Velasco, M., Guevara, R., Jinde, K., & Rojas, O. (2017). FONDO DE PÁRAMOS TUNGURAHUA Y LUCHA CONTRA LA POBREZA. *Seguimos Caminando*, 112, 56.
- Hernández, F., Alba, F., & Daza, M. C. (2009). Efecto de actividades agropecuarias en la capacidad de infiltración de los suelos del páramo del Sumapaz. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, 8, 29–38.
- Hofstede, R. (2020). La Importancia Hídrica del Páramo y Aspectos de su Manejo. *Conferencia Electrónica “Estrategias Para La Conservación y Desarrollo Sostenible de Páramos y Punas En La Ecorregión Andina: Experiencias y Perspectivas,”* 1–5. http://infoandina.mtnforum.org/sites/default/files/publication/files/La_Importancia_H_drica_del_P_amo_y_Aspectos_de_su_Manejo.pdf
- Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C., & Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile Effect of *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations on water resource in the Coastal Range of Biobío r. *Bosque*, 31(3), 219–230.
- Isaza, G. C., Pérez Méndez, M. A., Laines Canepa, J. R., & Castañón Nájera, G. (2009). COMPARACIÓN DE DOS TÉCNICAS DE AIREACIÓN EN LA DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA. *Universidad y Ciencia*, 25(3), 233–243. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792009000300005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Izquierdo, J., & Arévalo, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Jiménez, A. (2018). LA DENSIDAD APARENTE Y SU RELACIÓN CON OTRAS PROPIEDADES EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA. *Journal Of Agricultural Education and Human Resource Development*, 41(1), 191–210. <https://doi.org/10.23840/agehrd.2009.41.1.191>
- Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., & Aguayo, M. (2018). Evaluación del servicio

- ecosistémico de regulación hídrica bajo escenarios de conservación de vegetación nativa y expansión de plantaciones forestales en el centro sur de Chile. *Bosque*, 39(2), 277–289. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200277>
- Lian, H., Yen, H., Huang, J. C., Feng, Q., Qin, L., Bashir, M. A., Wu, S., Zhu, A. X., Luo, J., Di, H., Lei, Q., & Liu, H. (2020). CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. *Water Research*, 177, 115767. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115767>
- López, D. J., & Hernández, R. (2023). *Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo* (F. Ayala & F. Bautista (eds.); Ciudad Uni).
- Mendoza, M., Giler, A., Aguilar, C., & Pimentel, R. (2021). Evaluación del uso y cobertura del suelo en la cuenca río Chico. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 8(13).
- Miranda, J. (2020). *CUENCAS HIDRICAS. UNA PROFUNDA DEFINICION DE LA CORTE SUPREMA DE JUSTICIA DE LA NACION. 1*, 50. <https://doi.org/29.189.322>
- Montiel, R., Bolaños, M., Macedo, A., Rodríguez, A., & López, A. (2022). Classification of land use and vegetation with convolutional neural networks. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 97–119. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1269>
- Moreira, B., García, P. H., Pinto, A. L., Chávez, E. S., & Oliveira, I. J. (2020). *Manejo integrado de cuencas hidrográficas : posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra * Integrated Management of River Basins : Possibilities and Advances in the Analysis of Land Use and Land Cover Gestão integrada de bacias. 29*, 69–85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>.
- Mosquera, G., Ochoa, A., Pesántez, J., Crespo, P., & Celleri, R. (2023). Hidrología de los páramos en el Ecuador. In R. Hofstede, P. Mena, & E. Suárez (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 76–101). USFQ PRESS. <https://doi.org/10.18272/usfqpress.71.c259>
- Mosquera, H., Ayala, G., & Gutiérrez, H. (2022). Contenido de nutrientes , acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico Nutrient content , acidity , and soil texture in areas degraded by mining in the biogeographic Chocó Resumen Introducción. *Programa de Biología, Facultad de Ciencias Naturales*,

- Universidad Tecnológica Del Chocó “Diego Luis Córdoba”, Quibdó, Colombia* 2, 46(179), 514–528. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1615>
- Muñoz, M., Delgado, M., & Borja, M. (2021). La biodiversidad y el carbono orgánico del suelo son esenciales para revertir la desertificación. *Ecosistemas Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 30(3), 1–10. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2238>
- Munsell. (2010). *Munsell SOIL-COLOR CHARTS*.
- Ordóñez, J. (2019). Aguas Subterráneas - Acuíferos. *Sociedad Geológica de Lima*, 1, 1–44. http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf
- Ortega, J. G., Zambrano, A., Vera, R., & Merchán, W. (2022). *Análisis físico y químico de los suelos agrícolas del Sur de Manabí y su relación con los cultivos*. 18, 207–228. <https://doi.org/2074-0735>
- Ortuño, V. M., & Jiménez, A. (2024). Biodiversidad de los ecosistemas subterráneos. *Ecosistemas*, 33(1), 1–3. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2813>
- Osorio, M. Á., López, S. E., Haro, J. P., & Carrillo, W. E. (2023). *EL SUELO Principios y Análisis* (P. Madero (ed.); 1era Edici). puertomaderoeditorial.com.ar. <https://doi.org/10.55204/pmea.29>
- Patiño, M., Aragundi, L., Macias, K., Paredes, E., & Villegas, A. (2024). Conservación y Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura : Una Revisión Sistemática de Prácticas Tradicionales y Modernas Conservation and Sustainable Soil Management in Agriculture : A Systematic Review of Traditional and Modern Practices Conservação. *Código Científico Revista De Investigación*, 5(E3), 1–28. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE3/303>
- Pinos, D., Morales, O., & Durán, M. E. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 157–179. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.8>
- Pinzón, A. (2018). Efecto en las propiedades físicas de un suelo de páramo por la acción antrópica. *Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, 46(1 y 2), 51–58.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos

- sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138–153.
- Quiroz, C., Crespo, P., Stimm, B., Mosandl, R., Cueva, J., Hildebrandt, P., & Weber, M. (2021). Impacts of pine plantations on carbon stocks of páramo sites in southern Ecuador. *Carbon Balance and Management*, 16(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00168-5>
- Rodríguez, B., Romero, K., & Maza, J. E. (2022). *DINÁMICA DE CAMBIO DE COBERTURA/USO DE SUELO: ESCENARIOS PROSPECTIVOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHILLAYACU DYNAMICS*. 1(26), 9. <https://doi.org/aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>
- Rodríguez, I., Pérez, H., García, R., & Quezada, A. (2020). Efecto del Manejo Agrícola en Propiedades Físicas y Químicas del Suelo en Diferentes Agroecosistemas. *UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD. Revista Científica de La Universidad de Cienfuegos*, 12(5), 389–398. <https://orcid.org/0000-0003-2403-0135>
- Rodríguez, M. A., Aramendía, A. M., & Rodríguez, A. M. (2015). *Prácticas de edafología : métodos didácticos para análisis de suelos*.
- Saldaña, R., Otalvarez, R., & Herrera, J. D. (2023). Oferta hídrica superficial del humedal el Gallinazo, ubicado en Aguachica-Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 221–249. <https://doi.org/10.22490/21456453.5959>
- Santander, S., Falcón, M. del C., Suárez, M., & Durán, J. L. (2021). *Structure Degradation in an Agrogenic Soil . Analysis of Incident Factors and Associated Conservation Measures Degradación de estructura en un suelo agrogénico : análisis de factores incidentes , medidas de conservación asociadas*. 30(4), 21–31. <https://doi.org/0000-0002-8614-1247>
- Sierra, M. M., Rosales, R. B., Henao, A. M. V., Tobón, J. F. A., & Muñoz, M. F. C. (2022). Existencias de carbono orgánico en suelos cultivados con pasto kikuyo en el norte de Antioquia. *Acta Agronómica*, 71(2), 119–129.
- Soriano, M. (2018). Conductividad eléctrica del suelo. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1, 1–10. <https://bit.ly/3tovKmx>

- Taboada, M. M., Rodríguez, M. L., Taboada, M. T., & Oropeza, J. L. (2016). Vulnerabilidad estructural en suelos de textura gruesa bajo cultivo y huerta. *Terra Latinoamericana*, 29(1), 11–21.
- Torres Barchino, A., Serra Lluch, J., & Delcampo Carda, A. (2018). *Atlas de color NCS y Munsell*. 8. <https://riunet.upv.es/handle/10251/104301>
- Valdez, X., Hidalgo, C. M., & Aguirre, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo : generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 1, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- Velázquez, R. V., Del, W., Holguín, V., Loor, P., & Iván, R. (2022). *Determinación de las propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas de la parroquia El Esfuerzo del cantón Santo Domingo de los Tsáchilas*. 2, 20. <https://doi.org/0000000250717523>
- Walteros, I., Palacios, S., Cely, G., Serrano, P., & Moreno, D. (2022). Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Científica*, 25(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1846>
- Zhang, M., & Li, J. (2009). Carbon nanotube in different shapes. *Materials Today*, 12(6), 12–18. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(09\)70176-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(09)70176-2)
- Zúñiga, F., Huertas, J., Guerrero, G., Dörner, J., Sarasty, J., & Burbano, H. (2018). Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 183–196. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.363>

Apéndice

Apéndice A. Fase de recolección de muestras y laboratorio

Tabla 21.

Anexo fotográfico de la fase de laboratorio



Apéndice B. Resultados de la fase de laboratorio

Tabla 22.

Datos de las muestras de suelo obtenidas en el laboratorio





N° muestra	Coordenadas		Uso de suelo	pH	Conduc (us/cm)	COLOR	TEXTURA	ESTRUCTURA	Materia orgánica MO %	Carbono orgánico CO %	%DA	%P	
	X	Y											
Pr1	763069.18	9834937.36	Paramo	5.71	263.00	3/2	7.5 YR	Franco arenoso	Granular	7.35	4.26	0.455	94.02
Pr2	763142.96	9834797.5	Paramo	5.91	72.67	3/2	7.5 YR	Franco arenoso	Granular	6.77	3.92	0.419	94.49
Pr3	763743.56	9834661.81	Paramo	5.80	70.00	3/2	7.5 YR	Franco arenoso	Granular	6.44	3.74	0.399	94.76
Pr4	763653.03	9834645.23	Paramo	5.85	75.33	3/2	7.5 YR	Franco arenoso	Granular	6.60	3.83	0.409	94.63
Pr5	764162.77	9835103.48	Paramo	6.08	98.00	3/2	7.5 YR	Arenoso franco	Granular	7.85	4.55	0.141	94.46
Pr6	764115.23	9835417.43	Paramo	6.11	74.00	3/2	7.5 YR	Arenoso franco	Granular	7.98	4.63	0.905	64.39
Pr7	763975.83	9835720.21	Paramo	5.85	196.33	3/2	7.5 YR	Franco arenoso	Granular	5.33	3.09	1.233	51.45
Pr8	764498.75	9837056.5	Paramo	6.06	34.00	3/2	7.5 YR	Franco arenoso	Granular	5.86	3.40	1.156	54.49
Pr9	764831.46	9837720.15	Paramo	6.09	30.67	3/2	7.5 YR	Franco arenoso	Granular	4.54	2.64	1.190	53.15
Pr10	764972.31	9837936.64	Paramo	6.29	30.67	3/2	7.5 YR	Franco arenoso	Granular	5.90	3.43	1.166	54.08
Pn1	764622.58	9835732.08	Pino	5.89	68.67	3/2	10 YR	Franco arenoso	Granular	6.75	3.91	1.035	59.24
Pn2	764993.39	9836412.55	Pino	5.84	82.67	3/2	10 YR	Franco arenoso	Granular	6.84	3.96	1.199	52.79

Pn3	764867.38	9836529.33	Pino	5.90	40.00	3/2	10 YR	Franco arenoso	Granular	2.99	1.73	1.292	49.13
Pn4	764991.75	9836749.22	Pino	6.03	35.33	3/2	10 YR	Franco arenoso	Granular	4.02	2.33	1.272	49.93
Pn5	763808.91	9836413.45	Pino	6.04	37.33	3/2	10 YR	Franco arenoso	Granular	3.42	1.98	1.288	49.28
Pt1	764155.3	9835922.53	Pasto	6.40	58.00	3/2	7.5 YR	Arenoso franco	Granular	2.87	1.66	1.281	49.57
Pt2	764926.9	9837529.2	Pasto	6.30	28.00	3/2	7.5 YR	Arenoso franco	Granular	4.70	2.73	1.090	57.10
Pt3	764379.21	9837821.69	Pasto	6.54	32.67	3/3	10 YR	Arenoso franco	Granular	4.18	2.42	1.211	52.31
Pt4	763987.23	9837743.99	Pasto	6.40	47.00	3/3	10 YR	Arenoso franco	Granular	2.93	1.70	1.326	47.81
Pt5	764123.48	9837926.23	Pasto	6.71	39.33	3/3	10 YR	Arenoso franco	Granular	4.59	2.67	1.233	51.47
Cl1	764385.53	9838005.12	Cultivo	5.86	151.33	3/2	10 YR	Franco arenoso	Granular	5.09	2.95	1.245	50.99
Cl2	765313.18	9838427.76	Cultivo	5.94	98.00	3/2	10 YR	Franco arenoso	Granular	4.58	2.65	1.269	50.02
Cl3	765455.29	9838575.58	Cultivo	5.25	57.33	3/2	10 YR	Arenoso franco	Granular	3.78	2.19	1.189	53.18
Cl4	765453.75	9838173.13	Cultivo	5.95	70.00	3/2	10 YR	Arenoso franco	Granular	3.76	2.18	1.054	58.49
Cl5	765555.27	9838357.64	Cultivo	5.85	106.67	3/2	10 YR	Arenoso franco	Granular	3.21	1.86	1.360	46.45

Apéndice C. Tipos de cobertura de la microcuenca Hualcanga

Tabla 23.

Anexo fotográfico de la cobertura

	
<p>Cultivo</p>	<p>Pasto</p>
	
<p>Pino</p>	<p>Páramo</p>