

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Análisis comparativo de las propiedades químicas e hidrofísicas del suelo con diferente cobertura vegetal en las microcuencas Yutujapina y Lluchucarrumi, ubicadas en la parroquia Cumbe del cantón Cuenca

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental


Autores:

Karina Raquel Méndez Contreras

Syayna Alejandra Molina Cabrera


Director:

Marco Tulio Ramírez Matamoros

ORCID:  0000-0002-2253-456X

Asesor:

Oscar Patricio Morales Matute

ORCID:  0000-0003-2109-7828

Cuenca, Ecuador

2023-06-27

Resumen

Los páramos son reguladores hídricos naturales y por ende importantes ecosistemas. Son sistemas frágiles en donde los suelos cumplen un papel elemental como indicadores de salud de los mismos, pudiendo degradarse principalmente por las actividades del hombre y presentar cambios de uso de suelo. En este contexto, esta investigación se llevó a cabo en dos microcuencas, una alterada (Yutujapina) y otra en proceso de recuperación pasiva (Lluchucarrumi) ubicadas en la parroquia San Luis de Cumbe del cantón Cuenca. El objetivo fue comparar propiedades químicas e hidrofísicas del suelo con diferente cobertura vegetal, para determinar si el cambio de uso de suelo afecta o no estos parámetros. Mediante georreferenciación se delimitaron las zonas de estudio y se definieron los usos de suelo, en donde se tomaron muestras alteradas e inalteradas y se realizaron pruebas in situ. Los principales resultados indicaron que los cambios de uso de suelo se dieron principalmente como consecuencia de procesos de antropización y a la introducción del bosque pino, especie exótica. Afectando las distintas variables analizadas, siendo la microcuenca Yutujapina la que muestra mayor perturbación. Las coberturas degradadas presentaron valores más bajos de materia orgánica, nitrógeno y conductividad hidráulica saturada, pero al analizar el potasio, densidad aparente, fósforo y capacidad de intercambio catiónico, mostraron resultados superiores. Mediante la construcción de las curvas pF se constató que los usos de suelo pajonal y pasto, poseen una disponibilidad de agua superior y el bosque de pino un contenido de agua muy por debajo de todas las coberturas analizadas.

Palabras clave: páramo, uso de suelo, cobertura vegetal, propiedades químicas, propiedades hidrofísicas



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Paramos are natural water regulators and therefore important ecosystems. They are also fragile systems where soils play an elemental role as indicators of their health, and can be degraded mainly by human activities and changes in land use. In this context, this research was carried out in two micro-watersheds, one altered (Yutujapina) and the other in the process of passive recovery (Lluchucarrumi), located in the San Luis de Cumbe parish of the Cuenca canton. The objective was to compare chemical and hydrophysical properties of the soil with different vegetation cover, to determine whether or not the change in land use affects these parameters. By taking georeferenced points, the study areas were delimited and the land uses were defined, where altered and unaltered samples were taken and in situ tests were carried out. The main results indicated that the changes in land use were mainly due to anthropization processes and the introduction of pine forest, an exotic species. This affected the different variables analyzed, with the Yutujapina micro-watershed showing the greatest disturbance. The degraded covers presented lower values of organic matter, nitrogen and saturated hydraulic conductivity, but when analyzing potassium, bulk density, phosphorus and cation exchange capacity, they showed higher results. Through the construction of the pF curves, it was found that the grassland and pasture land uses have a higher water availability and the pine forest has a water content well below that of all the coverages analyzed.

Keywords: Paramo, land use, vegetation coverage, chemical properties, hydrophysical properties, hydrophysical properties



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Generalidades.....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Identificación del Problema.....	14
1.3 Justificación.....	15
1.4 Objetivos.....	15
1.4.1 Objetivo General.....	15
1.4.2 Objetivos Específicos.....	16
1.5 Hipótesis.....	16
Revisión de literatura.....	17
2.1 Cuenca hidrográfica.....	17
2.1.1. Funciones de las cuencas hidrográficas.....	17
2.2 Área de recarga hídrica.....	18
2.2.3 Recarga hídrica y la actividad antrópica.....	18
2.2.4 Importancia de la recarga hídrica.....	20
2.3 Páramos.....	20
2.3.1 Importancia de los páramos.....	21
2.3.2 Suelos de páramo.....	21
2.4 Propiedades químicas e hidrofísicas del suelo.....	23
2.4.1 pH.....	23
2.4.1.1 Acidificación del suelo por influencia humana.....	24
2.4.2 Nitrógeno.....	24
2.4.3 Fósforo.....	25
2.4.3.1 Fósforo en la nutrición vegetal y fertilidad del suelo.....	26
2.4.4 Potasio.....	26
2.4.4.1 Potasio en la solución de suelo.....	27
2.4.4.2 Potasio en la nutrición vegetal.....	27
2.4.5 Capacidad de Intercambio Catiónico.....	28
2.4.6 Materia Orgánica.....	28
2.5 Propiedades hidrofísicas.....	29
2.5.1 Densidad aparente.....	29
2.5.1.2 Factores que afectan la densidad aparente de los suelos.....	30
2.5.2 Conductividad hidráulica.....	31
2.5.3 Infiltración del agua en el suelo.....	32
2.5.4 Capacidad de campo.....	33

2.5.5 Punto de marchitez permanente.....	33
2.5.6 Agua disponible.....	33
2.5.7 Curva de retención hídrica.....	34
2.6 Impactos de las actividades antrópicas en una microcuenca.....	34
2.6.1 Actividades agrícolas.....	34
2.6.2 Actividades Ganaderas.....	35
2.7 Marco Legal.....	35
2.7.1 Constitución de la República del Ecuador 2008.....	36
2.7.2 Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales.....	36
2.7.3 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. TÍTULO VII Ecosistemas Frágiles. Capítulo II Páramos.....	36
2.7.4 NTE INEN 686 y 687. Mecánica de Suelos: Toma de Muestras Alteradas e Inalteradas.....	37
2.7.5 ANEXO 2 del Libro Vi de Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo.....	37
2.7.6 Objetivo 15 de Desarrollo Sostenible (ODS). Vida de Ecosistemas Terrestres	37
Materiales y métodos.....	38
3.1 Introducción.....	38
3.2 Área de estudio.....	38
3.3 Caracterización.....	39
3.3.1 Delimitación de las microcuencas y sus coberturas vegetales.....	39
3.3.2 Muestreo de suelo.....	39
3.4 Análisis hidrofísicos.....	41
3.4.1 Determinación de la conductividad hidráulica saturada (KS).....	41
3.4.2 Determinación de la curva de retención de agua del suelo.....	43
3.4.2.1 Aparato de membrana a presión (Eijkelkamp).....	43
3.4.2.2 Método de etapas múltiples (Multistep).....	47
3.5 Análisis químicos.....	52
3.6 Análisis estadístico.....	52
Resultados y discusión.....	54
4.1 Delimitación de las microcuencas hidrográficas y sus diferentes tipos de cobertura vegetal.....	54
4.2 Análisis de las propiedades químicas e hidrofísicas del suelo.....	59
4.2.1 Propiedades químicas del suelo.....	60
4.2.1.1 pH.....	60

4.2.1.2 Materia orgánica (MO).....	62
4.2.1.3 Nitrógeno (N).....	64
4.2.1.4 Fósforo (P).....	66
4.2.1.5 Potasio (K).....	69
4.2.1.6 Capacidad de intercambio catiónico total (CIC).....	71
4.2.2 Propiedades hidrofísicas del suelo.....	73
4.2.2.1 Densidad aparente (DA).....	73
4.2.2.2 Conductividad hidráulica saturada (Ks).....	76
4.2.2.3 Curva de pF.....	78
4.2.2.3.1 Curva pF, uso de suelo Pajonal.....	79
4.2.2.3.2 Curva pF, sso de suelo Pasto.....	80
4.2.2.3.3 Curva pF, sso de suelo Bosque de Pino.....	81
4.2.2.3.4 Curva pF, uso de suelo Intervenido Arado.....	82
4.2.2.3.5 Curva pF, uso de suelo Bosque Nativo.....	83
4.3 Análisis de correlación de las variables químicas e hidrofísicas.....	84
4.4. Análisis de componentes principales (ACP).....	86
Conclusiones y recomendaciones.....	91
5.1 Conclusiones.....	91
5.2 Recomendaciones.....	94
Referencias.....	95
Anexos.....	111

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de las microcuencas Yutujapina y Lluchucarrumi.....	39
Figura 2. Diagrama de muestreo de suelo.....	41
Figura 3. Prueba de pozo invertido.....	43
Figura 4. Aparato de membrana de presión.....	44
Figura 5. Preparación de la muestra.....	45
Figura 6. Montaje del aparato de membrana a presión.....	45
Figura 7. Muestras de suelo en el aparato de membrana de presión.....	46
Figura 8. Secado y pesado de muestras.....	47
Figura 9. Equipo Multistep.....	48
Figura 10. Descripción del equipo Multistep.....	48
Figura 11. Presaturación de las muestras de suelo.....	49
Figura 12. Instalación de las muestras en las celdas de presión.....	50
Figura 13. Pesado de las muestras.....	50
Figura 14. Mapa de las Coberturas en la Microcuenca Yutujapina y puntos de muestreo.....	54
Figura 15. Mapa de las Coberturas en la Microcuenca Lluchucarrumi y puntos de muestreo.....	55
Figura 16. Porcentajes de Uso de Suelo Microcuenca Yutujapina.....	57
Figura 17. Porcentajes de Uso de Suelo Microcuenca Lluchucarrumi.....	58
Figura 18. Valores de pH para cada uso de suelo.....	61
Figura 19. Valores de Materia Orgánica de cada uso de suelo.....	63
Figura 20. Valores de Nitrógeno por uso de suelo.....	65
Figura 21. Valores de Fósforo por uso de suelo.....	67
Figura 22. Valores de Potasio por uso de suelo.....	70
Figura 23. Valores de CIC total por uso de suelo.....	72
Figura 24. Valores de DA total por uso de suelo.....	74
Figura 25. Valores de Ks por uso de suelo.....	77
Figura 26. Curva pF y ajuste para Pajonal Conservado de la microcuenca Lluchucarrumi.....	79
Figura 27. Curva pF, Uso de suelo Pajonal.....	80
Figura 28. Curva pF, Uso de Suelo Pasto.....	81
Figura 29. Curva pF, Uso de Suelo Bosque de Pino.....	82
Figura 30. Curva pF, Uso de suelo Intervenido Arado.....	83
Figura 31. Curva pF, Uso de Suelo Bosque Nativo.....	84
Figura 32. Porcentaje de contribución al PC1.....	87

Figura 33. Porcentaje de contribución al PC2.....	88
Figura 34. Varianza de los componentes principales de las variables químicas e hidrofísicas.....	88
Figura 35. ACP para las variables químicas e hidrofísicas.....	89

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de cobertura vegetal.....	44
Tabla 2. Parámetros y métodos para el análisis químico.....	56
Tabla 3. Coberturas de la Microcuenca Yutujapina en hectáreas.....	60
Tabla 4. Coberturas de la Microcuenca Lluchucarrumi en hectáreas.....	62
Tabla 5. Clasificación de la conductividad hidráulica, según la velocidad de movimiento....	80
Tabla 6. Valores característicos de la curva pF.....	82
Tabla 7. Matriz del análisis de correlación de las variables químicas e hidrofísicas.....	90

Agradecimientos

Queremos agradecer primeramente a Dios por la salud y la sabiduría. Así también a nuestros familiares y profesores quienes siempre estuvieron apoyándonos en este proceso académico. Agradecemos de manera especial a nuestro tutor de tesis el Ing. Marco Ramírez y al Ing. Oscar Morales quienes con su guía, paciencia, enseñanza y disposición siempre estuvieron prestos para solventar cualquier inquietud que se presentó durante el desarrollo del presente trabajo de titulación.

También agradecemos el financiamiento y disponibilidad de la Junta de Agua Potable de Cumbe, quienes en conjunto con la gestión ambiental de ETAPA EP nos brindaron la oportunidad de llevar a cabo este proyecto.

Karina Raquel Méndez Contreras

Syayna Alejandra Molina Cabrera

Dedicatoria

Primeramente a Dios por siempre darme la fortaleza para seguir adelante y no dejarme decaer pese a las circunstancias. Así también quiero dedicar este logro a mis padres Juan y Ninfa, quienes con su ejemplo de perseverancia, amor y esfuerzo siempre fueron los pilares para seguir adelante.

A mis hermanos en especial a Juan Carlos por su motivación y apoyo para alcanzar mis metas y sobre todo por siempre ser incondicional. También agradezco a Vanessa por ser una parte importante en mi proceso personal y profesional, quien con su amor, cuidado y entrega, siempre estuvo conmigo y me apoyó en los momentos más difíciles de la carrera.

A mi compañera de tesis Syayna con quien empezó toda esta travesía y en la cual hemos crecido tanto personal como profesionalmente. Este logro va dedicado en general a todas las personas que creyeron en mí.

Karina Raquel Méndez Contreras

Dedicatoria

A Dios, por ser la luz en mi camino y mi todo.

A mis padres, Raquel y Julio, por su amor, cuidado y apoyo incondicional. Así como a Ivan, por su infinito cariño.

A mis gorditos, Nathan Daniel y Ricky Alejandro.

Syayna Alejandra Molina Cabrera

Generalidades

1.1 Introducción

En el Ecuador los ecosistemas de páramo cubren alrededor de 12.560 Km² lo que representa el 5% del territorio nacional. El agua es el principal recurso que asegura este ecosistema para su aprovechamiento (Mena et al., 2001). Los páramos dominados principalmente por pajonal, están siendo progresivamente amenazados por las actividades antrópicas, principalmente la agricultura y ganadería. Ante una perturbación, la restauración de este ecosistema frágil, es muy baja por sus características peculiares; gran altitud, niveles bajos de descomposición, crecimiento y productividad primaria (Hofstede et al., 2002). A nivel local el cantón Cuenca es un espacio territorial, que también está sufriendo acelerados cambios de usos de suelo de manera extensa e intensa, disminuyendo así las zonas de páramo y bosques nativos (Pinos, 2016).

El cambio de uso de suelo en los ecosistemas altoandinos se ha convertido en una problemática ambiental. La deforestación, el sobrepastoreo, la expansión de la frontera agrícola y la urbanización, han transformado grandes extensiones de coberturas nativas, provocando la pérdida de flora, fauna, degradación del suelo y sobre todo el deterioro de las funciones ecológicas que los páramos nos brindan. El uso de suelo y los cambios que se dan en su cobertura natural, son problemas ambientales a nivel global, donde el papel del ser humano es protagónico. (Cuevas et al., 2010; Quichimbo et al., 2011).

La degradación y la pérdida de la cobertura vegetal natural, así como la velocidad a la que suceden estas alteraciones, perturban los procesos físicos, biológicos y químicos de este sistema natural. De ahí el interés de identificar la problemática causada por cambios en el uso del suelo. Conocer la distribución y extensión de las actividades antrópicas, resulta indispensable, ya que las intervenciones realizadas de manera intensiva no permiten un uso sostenido de los recursos, ejercen presión ambiental y comprometen el sustento de las futuras generaciones (Pérez et al., 2018; Guerrero et al., 2018).

Por la importancia que representa el páramo para la calidad de vida de la población en general y su creciente deterioro, el objetivo de este estudio tiene la finalidad de caracterizar el uso del suelo, evaluar la influencia del cambio de cobertura vegetal en las propiedades químicas e hidrofísicas de las microcuencas Yutujapina y Lluchucarrumi. Con la información obtenida se podrá contribuir a la investigación sobre la problemática del cambio de uso de suelo en estos ecosistemas. Así mismo, con una idea más clara del problema, las entidades correspondientes y/o la población aledaña, en base a la información obtenida, pueden implementar planes de manejo, conservación y recuperación en la zona de estudio.

1.2 Identificación del Problema

Las microcuencas hidrográficas son sistemas que ofrecen bienes y servicios a componentes físicos, bióticos y sociales (Caro & Velandia, 2019). Sin embargo, con el paso del tiempo estos recursos se han deteriorado. Las modificaciones ambientales se atribuyen a circunstancias naturales, como variaciones climáticas y fenómenos de la naturaleza, pero gran parte de estas variaciones son de tipo antropogénico. A nivel global, la pérdida y cambio de cobertura vegetal en las cuencas hidrográficas se ha convertido en un problema ambiental significativo, ya que la tierra es el principal recurso natural en el que se desarrollan las actividades económicas y sociales (Rosas et al., 2006). El hombre, desde un enfoque económico expansivo, modifica y deteriora estas unidades sin tomar en cuenta las consecuencias negativas que causa el cambio de cobertura vegetal (Lambin et al., 2001). Estas modificaciones se ven reflejadas en el deterioro de los servicios ambientales que ofrecen las microcuencas hidrográficas (modificación de ciclos hidrológicos, variaciones climáticas, fertilidad de suelos) y, consecuentemente, en un evidente riesgo para la sostenibilidad de las futuras generaciones.

Ecuador no se encuentra lejos de esta problemática ambiental. En las últimas décadas ha experimentado fuertes cambios en la cobertura vegetal natural por el avance de la frontera agrícola. El aumento desordenado de áreas de cultivos y ganadería a las laderas de las montañas, significa una amenaza para el recurso hídrico (Pinos, 2016). El deterioro de estas zonas afecta directamente la cantidad y calidad del agua. Además, cualquier alteración o actividad de intervención en la vegetación natural, puede disminuir la capacidad de retención de agua del suelo e infiltración de la zona (Barahona, 1997). Los páramos contienen alta humedad por las elevadas precipitaciones y vegetación propia de la zona, lo que favorece la capacidad de retención de agua en sus suelos. Las propiedades implícitas de los páramos generan cantidad y calidad de agua para alimentar a ríos y quebradas durante todo el año (Camacho, 2014; Caranqui et al., 2021). Este ecosistema es la fuente principal de agua para las poblaciones ecuatorianas, por lo que tiene gran importancia ecológica y económica en el país (Mena et al., 2011).

Los páramos son considerados ecosistemas frágiles; cualquier modificación implica afecciones en el ciclo del agua y alteraciones en las propiedades de regulación y retención hídrica. En estos ecosistemas es evidente los cambios de cobertura natural por zonas de labranza, forestación con pinos y pastoreo intensivo como extensivo afectan el equilibrio de los mismos (Hofstede, 2001; Josse et al., 2009). La microcuenca Yutujapina es un área de recarga hídrica del páramo y es parte de los siete sistemas de agua para consumo humano

de la parroquia San Luis de Cumbe (PDOT de cumbe 2020). La importancia de la zona de estudio radica en la generación de diversos servicios ambientales, entre ellos el que más resalta; el servicio de provisión de calidad y cantidad de agua a 6 barrios y 16 comunidades de Cumbe.

1.3 Justificación

El deterioro de las fuentes hídricas causa problemas ambientales que comprometen la calidad de vida de las personas. Con la finalidad de garantizar la conservación de los recursos naturales y contribuir al cuidado y buen manejo de las áreas de recarga hídrica, la importancia de este estudio parte de la necesidad de identificar una posible degradación ambiental como consecuencia del cambio de uso de suelo. De acuerdo a los resultados obtenidos, se podrán proponer planes de manejo y protección del área de recarga hídrica de la microcuenca Yutujapina generadora de agua para el consumo humano de la zona. Este estudio tiene un enfoque comparativo en base a los datos obtenidos del análisis químico e hidrofísico del suelo de las coberturas vegetales en las microcuencas Yutujapina (intervenida) y Lluchucarrumi (en proceso de recuperación pasiva). Además, el análisis de esta microcuenca contribuye a la recopilación de información. Esto es de suma importancia ya que la microcuenca Yutujapina abastece de agua para consumo humano a sectores de la parroquia San Luis de Cumbe y se evidencia en las laderas de la microcuenca una considerable y expansiva intervención agropecuaria (cultivos y pastos), por lo tanto, según los resultados se podrán promover e impulsar planes de conservación para la microcuenca Yutujapina que garantizara una mejor calidad de vida para las futuras generaciones. También con la investigación se facilitarán la gestión integrada del agua, ya que partiendo de una línea base, las medidas de conservación, manejo y restauración resultan más evidentes, aseguran el mantenimiento de la calidad y cantidad del recurso hídrico creando conciencia y generando alternativas sostenibles para conservar en lo posible el área de recarga hídrica, de la cual muchas de las familias locales dependen para su subsistencia.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Comparar las propiedades químicas e hidrofísicas del suelo con diferente cobertura vegetal en las microcuencas Yutujapina y Lluchucarrumi, con el fin de determinar si el cambio de uso de suelo afecta a las mismas.

1.4.2 Objetivos Específicos

Delimitar las microcuencas hidrográficas y los diferentes tipos de cobertura vegetal mediante análisis espacial.

Analizar los resultados obtenidos de las propiedades químicas e hidrofísicas de los suelos.

Determinar si el cambio de cobertura vegetal afecta o no las propiedades analizadas.

1.5 Hipótesis

Los resultados de la caracterización química e hidrofísica del suelo, muestran mayor deterioro o alteraciones en las coberturas vegetales de la microcuenca intervenida Yutujapina en comparación con la microcuenca Lluchucarrumi que se encuentra dentro de un proceso de recuperación pasiva.

Revisión de literatura

2.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un sistema natural definido topográficamente, estos sistemas transforman la precipitación en flujos de agua que drenan hasta alcanzar un punto en el canal de un arroyo, río, depósito natural de aguas o directamente al mar (Brooks et al., 2013). Cuando hablamos de una microcuenca, hacemos referencia a un derivado de la cuenca, delimitado naturalmente por la divisoria de las aguas, caracterizado por tener un área de drenaje menor a 500 Km² y que desemboca al cauce principal de una subcuenca, la misma que se divide en diversas microcuencas (Ordóñez, 2011).

2.1.1. Funciones de las cuencas hidrográficas

Las funciones que desempeñan las cuencas hidrográficas, se basan en aspectos ambientales, ecológicos, y socioeconómicos.

Funciones ambientales

- Regulación hídrica. - Este servicio ecosistémico está relacionado con las capas freáticas, vegetación y propiedades físicas del suelo, por lo tanto, la regulación y almacenamiento dependerá de las características y complejidad de los mismos. El proceso inicia en la intercepción de la precipitación, ya sea de forma indirecta (la cual incide en el dosel de vegetación) o directa (llega directo al suelo). Los acuíferos se encargan de aportar agua en épocas de sequías mientras que la recarga de los mismos dependerá de la capacidad de intercepción de precipitación. La regulación hídrica está expuesta a un constante cambio, depende de la evolución del uso del suelo. La modificación en el tipo de cobertura vegetal, tiene una relación directa con la cantidad de flujo que brindan estos servicios ecosistémicos (Jullian et al., 2018).
- Sumideros de Dióxido de carbono. - La vegetación de las cuencas hidrográficas, sobre todo el bosque nativo, desempeñan un papel importante como sumideros de carbono. Este servicio se lleva a cabo mediante la fotosíntesis, basándose en la transformación del dióxido de carbono (CO₂) mediante la absorción, para luego ser fijado en forma de biomasa y finalmente liberar oxígeno (O₂) a la atmósfera (Velasco et al., 2011).

Funciones ecológicas

- Las cuencas hidrográficas cumplen un papel importante en la conservación de la biodiversidad de especies, flora y fauna. Esto se debe a la estrecha relación que tienen estos sistemas con el agua, cuya dinámica es crucial para la supervivencia, estabilidad y prosperidad de los ecosistemas (Barrientos, 2006).

Funciones socioeconómicas

- Suministran recursos naturales tanto renovables como no renovables, además de promover espacios de desarrollo social y cultural.

2.2 Área de recarga hídrica

En general se le conoce como recarga al proceso natural en el cual se incorpora agua a un acuífero, agua que proviene de fuera del contorno que delimita un acuífero. Generalmente con la precipitación que se infiltra en el suelo y en las rocas, los acuíferos de manera natural se van recargando, no obstante, existen más fuentes de esta recarga, como la infiltración de aguas superficiales, y agua que se transfiere desde otro acuífero. La zona o área en el que sucede la recarga se llama “zona de recarga” y son lugares en los cuales es alta la capacidad de infiltración (Matus, 2009), misma que puede ser aún mayor cuando además de la precipitación local, se da una escorrentía superficial de alguna área tributaria (INAB, 2003).

Desde el punto de vista de la hidrología, los fenómenos más importantes referentes a los acuíferos son la recarga y descarga de los mismos. En el ciclo geológico normal, el agua suele ingresar al acuífero en las denominadas zonas de recarga muy lentamente atravesando el manto freático y termina saliendo por las llamadas zonas de descarga, formándose manantiales y fuentes que retornan a la superficie del agua. Es un fenómeno frecuente la descarga de un acuífero a un río, igualmente es habitual si sucede de manera contraria. Por otra parte, la recarga natural que se da en el acuífero tiene un límite de capacidad de almacenamiento, de manera que en un determinado punto el agua que arribe al acuífero no consigue ser almacenada y traspasa a otra área como un río, lago u otro acuífero (Matus, 2007).

2.2.3 Recarga hídrica y la actividad antrópica

Las zonas de recarga hídrica, son una parte fundamental del sistema hidrológico de las cuencas hidrográficas, por lo que si se presenta algún tipo de fenómeno que perturba el estado natural de las cuencas, ocasionará un efecto negativo en los acuíferos y por ende en el aprovechamiento del agua, tanto en su calidad y cantidad (Donis, 2015). Durante mucho

tiempo han sido señalados los impactos significativamente adversos del desarrollo humano en la dinámica de la recarga hídrica, entre los cuales se pueden mencionar: el crecimiento urbanístico, demográfico, deforestación, expansión de las fronteras agropecuarias. Estas actividades perturban, compactan y erosionan el suelo, ocasionando una mayor escorrentía superficial, disminuyen su permeabilidad (dejan el suelo descubierto), la tasa de recarga de agua subterránea y dificultan la infiltración del agua, a su vez tienen un efecto negativo en humedales, arroyos, y diversos cuerpos de agua disminuyendo su calidad, volumen y velocidad de flujo, perjudicando finalmente el abastecimiento de agua (Donis, 2015).

Una de las amenazas existentes en las zonas de recarga hídrica que es importante destacar, son las que están asociadas al tipo de uso de suelo, que tiene relación con el cambio de cobertura natural presente por otro tipo de coberturas, causada principalmente por actividades humanas como la ganadería y agricultura, que pueden alterar las características de funcionamiento normales de estas zonas (Masache, 2018).

El agua transporta todas las sustancias que adquiere en el transcurso de su recorrido en el ciclo hidrológico, ya sea de forma disuelta o en suspensión; entendiéndose como contaminación a la existencia de sustancias o elementos en concentraciones no deseadas, de tal manera que puedan afectar el bienestar o salud del hombre o significar una amenaza para la naturaleza. Las alteraciones existentes en la calidad del agua subterránea son a causa de la incorporación de sustancias químicas o biológicas en el medio ambiente subterráneo como consecuencia de las actividades antropogénicas, interferencia en los esquemas de circulación natural, procesos naturales, o por las distintas combinaciones que pueden ocurrir entre todos ellos.

Las características y componentes que se utilizan para determinar la calidad del agua, son los mismos agentes implicados tanto en la contaminación superficial como en la subterránea. Estos son el calcio, magnesio, potasio, sales de iones de cloruro. Compuestos nitrogenados como los nitritos, nitratos, materia orgánica biodegradable y no biodegradable; compuestos orgánicos o tóxicos como el mercurio, arsénico o plomo. También pueden ser agentes contaminantes los microorganismos patógenos o compuestos radioactivos. Raramente se origina de forma espontánea y natural contaminación en los acuíferos, normalmente detrás se encuentra las actividades humanas, tales como: actividades mineras, vertidos de desechos urbanos, nula protección o conservación de estas zonas de recarga, introducción de líquidos provenientes por ejemplo de fosas sépticas los cuales son nocivos para el medio permeable, siendo estos los focos contaminantes principales (Matus, 2007).

Son de tres tipos los contaminantes de un acuífero subterráneo de acuerdo con su distribución espacial (Faustino, 2006):

- Contaminaciones puntuales: En gran parte están asociados con la eliminación de aguas residuales, residuos mineros y desperdicios urbanos.
- Contaminaciones lineales: Los canales de riego y los ríos con aguas contaminadas pueden convertirse de efluentes a influentes por inversión provocada por la sobreexplotación en los acuíferos.
- Contaminaciones dispersas: Algunas actividades agrícolas como fertilizar los cultivos, la utilización de productos plaguicidas, herbicidas e insecticidas.

2.2.4 Importancia de la recarga hídrica

Al menos desde el siglo XX el agua subterránea es un insumo esencial para todas las actividades de índole económico, y el reservorio hídrico principal del planeta, representa el 97% del agua dulce que no está congelada. La Unesco estima que aproximadamente la mitad de la población mundial se abastece de forma directa del agua subterránea y los sectores que más aprovechan este recurso son: el doméstico (67%), industria (22%) e irrigación (11%) (Kuri, 2017).

La relevancia de estas zonas de recarga se debe también al hecho de que forma parte del ciclo hidrológico, mantiene el equilibrio ecológico y dentro del ámbito social por su aprovechamiento; brindan varios servicios ecosistémicos hídricos esenciales para el bienestar humano y de los propios ecosistemas, entre los cuales se pueden mencionar a los “Servicios de Abastecimiento”, que como su nombre lo indica proveen un abastecimiento, seguro y rentable de agua para el consumo humano, las actividades agropecuarias y los ecosistemas acuáticos. También están los “Servicios de regulación” que ayudan a la regulación del agua y del ciclo hidrológico y los “Servicios de apoyo”, puesto que en las zonas de recarga hídrica se encuentran hábitats riparios, hábitats de bosques tropicales, bosques de coníferas, bosque nuboso, manglares, entre otros, es importante mencionar que al ser un servicio de bajo costo beneficia a regiones que no disponen de sistemas de abastecimiento de agua, por consiguiente es necesario mantener la cantidad y calidad de este recurso hídrico a largo plazo (Madrid et al., 2015)

2.3 Páramos

El concepto páramo hace referencia a un sistema biótico, que alberga ecosistemas de alta montaña dominados por pastizales húmedos con vegetación herbácea y arbustiva. Su clima es frío y las precipitaciones anuales tienen una variabilidad espacio-temporal considerable,

al año las precipitaciones van de 500 a 2000 mm. La alta humedad de estos ecosistemas da origen a cuerpos de agua como ríos y lagos, además influye considerablemente en el desarrollo del suelo (Patiño et al., 2021). Se encuentran a lo largo de las cordilleras occidental y oriental de los Andes, que va desde el límite con Colombia al norte hasta el sur limitando con Perú. Los páramos habitualmente se ubican sobre los 3500 metros en el norte o centro del país, pero en las provincias de Azuay o Loja ubicadas al sur, por las características más bajas de la Cordillera de los Andes, se encuentran a los 3000 m.s.n.m (Hofstede et al., 2014).

2.3.1 Importancia de los páramos

Son ecosistemas muy diversos, presentan una amplia gama de servicios ecosistémicos lo que les confiere una importancia a nivel regional y mundial. Su importancia es reconocida como una prioridad global para la conservación, como parte del objetivo 15 de los ODS de las Naciones Unidas de la Agenda 2030. Estos ecosistemas tienen un papel crucial en el abastecimiento regional de agua para el altiplano andino, recolectan, almacenan y proporcionan agua en cantidad y calidad que servirá para suministro, uso agrícola, y generación de energía hidroeléctrica (Patiño et al., 2021). A lo largo de la cordillera de los Andes, el ecosistema del páramo sustenta aproximadamente a 100 millones de personas, de las cuales 40 millones de personas dependen directamente de este ecosistema para obtener sus recursos hídricos (Flores et al., 2016).

Tienen una excepcional biodiversidad, cuenta con riquezas de especies tanto animales y vegetales con alto nivel de endemismo (628 especies de plantas son endémicas de los páramos en el Ecuador, lo que representa el 15% de toda la flora endémica del país y el 4% del total de su flora). Por su alta capacidad de acumulación de carbono en sus suelos, juega un papel importante en la mitigación y adaptación al cambio climático, además los suelos de páramo están estrechamente relacionados con la provisión de agua, cumple un papel de amortiguador estacional del caudal, es decir almacena agua en épocas húmedas y sostiene el flujo de agua en estaciones secas.

2.3.2 Suelos de páramo

Sus suelos son excepcionalmente jóvenes, su formación inicia hace apenas 10000 años a partir de la meteorización de la roca expuesta por las glaciaciones. Al norte y centro del Ecuador los páramos están ubicados sobre volcanes, por lo tanto, sus suelos son de origen volcánico. La poca longevidad de sus suelos, se debe a factores que ralentizan el proceso de formación, como el clima, las bajas temperaturas influyen en las reacciones químicas, la

vegetación considerada como un factor para la formación del suelo, se relaciona con la acumulación de materia orgánica, en donde el proceso de descomposición se ve influenciado por las bajas temperaturas, puesto que disminuye la actividad microbiana. Es por esto que se forman horizontes superficiales de color negro o tonos muy oscuros, el proceso de formación de humus y la mineralización se producen de forma lenta, la materia orgánica tiende a acumularse parcialmente descompuesta. En general los suelos del páramo tienen un alto contenido de materia orgánica, hasta un 40%. En general entre mayor humedad mayor acumulación de materia orgánica.

En los suelos de origen volcánico, la descomposición de materia orgánica es aún más lenta, la ceniza volcánica aporta aluminio que, al combinarse con la materia orgánica, forma vesículas más resistentes a la descomposición y es por esto que son considerados ecosistemas almacenadores de carbono. Además, el gran contenido de materia orgánica otorga las características de los suelos de páramo; profundos, con baja densidad y alta porosidad (Hofstede et al., 2014). Existe varios tipos de suelo en el páramo: Andosoles, Histosoles, Umbrisoles, Cambrisoles, Regosoles, Leptosoles, sin embargo, el 80% de su superficie está cubierta por Andosoles, razón por la cual se considera a este tipo de suelo como característico. Los andosoles se derivan del material volcánico, tienen elevada porosidad y coloración oscura, altos porcentajes de aluminio y hierro con una fijación de fósforo considerable (Llambí et al., 2012).

Dentro de algunos parámetros característicos de los suelos Andosoles se puede mencionar:

- Por su alto contenido de materia orgánica, el horizonte superior tiene una coloración negra.
- Son suelos con alta permeabilidad, porosidad y buena tasa de humedad.
- Baja densidad aparente, en un rango 0.3 a 0.4 g/cm³.
- Tasa de retención de agua elevada, este parámetro está relacionado con la alta porosidad.
- Alta tasa de carbono orgánico, sulfatos y fosfatos (retención de fósforo superior al 85%).

En los páramos de Ecuador se pueden distinguir al menos tres tipos de suelos andosoles. El primero corresponde al andosol vítrico, de todos este es el menos evolucionado. Son suelos formados de cenizas frescas de volcanes activos, la presencia de minerales primarios no cristalizados es alta lo que contribuye a que la densidad de este tipo de suelo sea mayor (entre 0.9 a 1.2 g/cm³). Por su granulometría muy arenosa tienen baja capacidad de retención de agua y la tasa de carbón orgánico es menor en comparación con los otros

tipos de suelos. El segundo se describe como andosol alofánico, es un tipo de suelo menos fértil en comparación con los demás, suelos con poca cantidad de aluminio, fósforo y azufre, tienen pH superior a 5. Tienen exceso de humedad, lo que reduce el porcentaje de fertilidad. Y por último tenemos el andosol no alofánico, es el más evolucionado, tiene mayor retención de agua y carbono, pH con valores bajos, y un intercambio catiónico débil. Estos suelos se encuentran generalmente en zonas con climas fríos (Mena et al., 2000).

2.4 Propiedades químicas e hidrofísicas del suelo

2.4.1 pH

El pH del suelo es posiblemente la medida más informativa que se puede llevar a cabo para establecer las características del suelo (Thomas, 1996). La alcalinidad y la acidez naturalmente se cuantifica con la utilización de la escala de pH, que indica la concentración o actividad de iones H^+ que se encuentran presentes en una solución (Brady & Weil, 2017). El pH utiliza una escala de medición cuyo rango de oscilación va de 0 a 14. Usualmente, se considera que los suelos con $pH < 7$ son ácidos y si el $pH > 7$ son alcalinos (Osorio, 2012). En la solución del suelo el pH generalmente oscila entre 4 a 8 (Brady & Weil, 2017).

El pH influye en una extensa variedad de propiedades y procesos, químicos, biológicos y físicos del suelo, por lo que se le describe como la "variable maestra del suelo" (Neina, 2019). Esta variable química afecta en gran parte a la probabilidad de que las raíces de las plantas asimilan elementos nutritivos, tóxicos, y en el rendimiento de la biomasa. De modo que el pH del suelo es un indicador crítico al momento de predecir la probabilidad de que un contaminante en específico pueda contaminar las aguas superficiales, las aguas subterráneas y las cadenas alimentarias.

La acidificación es un proceso natural vinculado en la formación del suelo. Sin embargo, las actividades humanas, como la aplicación de fertilizantes, tienen un efecto considerable en varios procesos productores de ácido. Por tanto, la salud de los suelos ha disminuido, ya que son incapaces de resistir los impactos de la acidificación provocada por el ser humano, la cual impide el crecimiento microbiano, disminuyendo su diversidad y abundancia (Brady et al., 2017).

En términos agrícolas o edafológicos, los suelos paramunos, presentan un pH o comportamiento denominado fuertemente ácido, debido a la existencia de cenizas volcánicas que poseen un alto contenido de Aluminio (USDA, 2015). Ya que el pH controla la disponibilidad de todos los nutrientes que intervienen en el desarrollo de las plantas, un pH ácido en consecuencia afecta dicho crecimiento (González, 2016).

2.4.1.1 Acidificación del suelo por influencia humana

Fertilización nitrogenada. - Las actividades agrícolas han crecido considerablemente, aumentando así la cantidad de nitrógeno que circula por los suelos del mundo. La causa de esta intensificación del ciclo del nitrógeno se debe en su mayoría por el uso de fertilizantes químicos, los mismos que han favorecido a que los suministros mundiales de alimentos permanezcan por delante del crecimiento poblacional, pero como consecuencia los suelos de las tierras de cultivo del mundo han presentado una acelerada acidificación (Brady & Weil, 2017). Dichos fertilizantes tienen efectos sobre las características químicas del suelo y alteran la calidad del medio ambiente (Sadeghian, 2004).

Materiales orgánicos formadores de ácido. - La utilización de materiales orgánicos como compost, estiércol animal y ciertos tipos de desechos vegetales pueden reducir el pH del suelo, tanto por la liberación por oxidación del nitrógeno amónico, como por los ácidos orgánicos e inorgánicos formados en el transcurso de la descomposición (Brady & Weil, 2017).

2.4.2 Nitrógeno

La lenta descomposición de la materia orgánica, característica propia de los suelos paramunos, ocasiona una disponibilidad baja de nitrógeno (N) mineral en el suelo. Por lo que en su gestión se invierte más esfuerzo y dinero que en cualquier otro elemento nutritivo. Actividades como la aplicación de fertilizantes o el arado, llevadas a cabo en estos suelos, incrementan los niveles de mineralización de este elemento, y por ende la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de microorganismos (Cortázar et al., 2012). Las deficiencias de nitrógeno serían universales y se reducirían a un mínimo los ecosistemas, si ciertos microbios del suelo no realizarán el proceso de fijación biológica del nitrógeno atmosférico y por el reciclaje de regreso de la mayoría del nitrógeno absorbido por la vegetación al suelo. Siendo importante recalcar que estos ciclos se interrumpen en donde los seres humanos cosechan alimentos de la tierra.

Para las plantas, el nitrógeno es un elemento integral de diversos compuestos indispensables, se destaca su rol como componente de los aminoácidos, que son las unidades estructurales de las proteínas. En los sistemas agrícolas es frecuentemente necesario este elemento, así que miles de millones de personas en la búsqueda de proteínas, alientan la demanda de los fertilizantes nitrogenados, los cuales contienen aproximadamente una sexta parte de estas proteínas, como consecuencia se transforma globalmente el ciclo del N y la agricultura.

Ahora los excedentes de nitrógeno son prácticamente comunes al igual que las deficiencias, y pueden impactar negativamente tanto a los ecosistemas como a la salud humana. En suelos excesivamente enriquecidos, la fuga de nitrógeno puede provocar la contaminación de aguas subterráneas por nitratos, por lo que el agua ya no es apta para el consumo del ser humano o los animales (Brady et al., 2017).

2.4.3 Fósforo

Existen en el suelo distintas formas químicas de fósforo, estas incluyen el orgánico e inorgánico y tienen múltiples fuentes de origen estos componentes, tanto natural como antropogénico, que se diferencian ampliamente en cuanto a su comportamiento como en su destino, ya sea en los suelos naturales y/o cultivados (Lozano et al., 2012). Los suelos nativos, en su mayoría, poseen una baja cantidad total de fósforo y de lo que se encuentra presente, la mayor proporción, no está disponible para beneficio de las plantas (Brady et al., 2017).

El pH que prevalece en los suelos de páramo, también establece en gran parte las formas en las que se puede encontrar el fósforo, esto sumado a la cantidad y tipo de nutrientes que puedan presentar los suelos (Espinosa, 2015).

Históricamente, la pérdida y remoción de fósforo se ha acelerado a causa de los usos agrícolas de la tierra, usos que no alientan su reciclaje ni reemplazo. A causa de la poca cubierta vegetal que alberga la tierra despejada por el avance de la frontera agrícola, la tierra está sujeta a la erosión que degrada todavía más los suelos y contamina los lagos y ríos con escorrentías que transportan sedimentos. Este escenario ocurre en la actualidad en varios países, en donde la deficiencia de fósforo en los suelos, y el inapropiado suministro de fertilizantes fosforados, han contribuido a que sea inseguro el abastecimiento de alimentos.

Los países industrializados, durante muchos años, han añadido a los suelos agrícolas mucho más fósforo del que se elimina en las cosechas, compensando en exceso la baja disponibilidad de fósforo inicial. Esta excesiva aplicación de fósforo a causa de los fertilizantes, la concentración de ganado y sus respectivos desechos orgánicos, han provocado la acumulación de este elemento en muchas cuencas hidrográficas en sus suelos superficiales. La escorrentía que se da de manera natural, junto con el agua de escorrentía que contiene fósforo de las cuencas mencionadas y los flujos de aguas residuales, compone uno de los tipos más peligrosos de contaminación del agua. Este tipo de contaminación es particularmente perjudicial para los ecosistemas de agua dulce, lo que

puede poner en riesgo el abastecimiento de agua potable y limita la utilización de los recursos acuáticos para la pesca, producción y recreación (Brady et al., 2017).

2.4.3.1 Fósforo en la nutrición vegetal y fertilidad del suelo

Fósforo y Crecimiento Vegetal. - Una óptima nutrición de fósforo mejora los procesos esenciales de la fotosíntesis, fructificación, la floración, producción de semillas y la maduración. Además, es esencial un buen suministro de fósforo para una eficaz fijación biológica del nitrógeno, el contenido de proteínas de las plantas, y el crecimiento resultante (Brady et al., 2017).

Efectos del fósforo en la calidad ambiental. - La degradación de la tierra debido a una disponibilidad de fósforo en el suelo muy baja y la degradación del agua, sumado a una acelerada eutrofización causada por un exceso de fósforo, son dos problemas ambientales globales asociados con el papel del fósforo como nutriente vegetal del suelo.

Degradación del suelo. - En el suelo perturbado, la capacidad de abastecimiento de fósforo se vuelve tan baja rápidamente, que es escaso el rebrote de vegetación natural y los rendimientos del suelo no son útiles. Se podría esperar que las plantas repongan en el suelo los suministros de nitrógeno y que también mejoren la productividad y diversidad de los ecosistemas, pero por la deficiencia de fósforo estas son afectadas, suministrando poca cobertura vegetal, de tal forma que no evitan que las fuertes lluvias desplacen la superficie del suelo. La erosión resultante disminuye incluso aún más la fertilidad del suelo, así como la capacidad de retención de agua, acelerando la degradación y haciendo que los suelos puedan sostener cada vez menos la cubierta vegetal.

Por otra parte, las partículas perdidas debido a la erosión del suelo, se transforman más abajo en la cuenca en sedimentos, recargando embalses, obstruyendo lagos, estuarios y aumentando la turbidez de los ríos (Brady et al., 2017).

2.4.4 Potasio

El potasio (K) se encuentra presente como un catión con carga positiva (K^+) en la solución del suelo (Brady & Weil, 2017). En la planta se moviliza en todos sus órganos de una parte a otra fácilmente. Cumple un rol importante, ya que actúa en distintos procesos metabólicos, entre los cuales se puede mencionar: la fotosíntesis, la síntesis de carbohidratos y proteínas, también influye en el crecimiento meristemático de las plantas y el balance de agua. Las plantas adquieren naturalmente el potasio procedente de la meteorización de los

minerales, la mineralización de los residuos orgánicos o antropogénicamente de los fertilizantes y abonos (Conti, 2000).

La demanda de potasio en las plantas es alta, 5 a 10 veces mayor a los requerimientos de fósforo y parecidos a los del nitrógeno. Aun cuando en los suelos, la mayor parte de ellos, la cantidad total presente de potasio es lo suficientemente grande, contiene formas no intercambiables y de disponibilidad lenta. Por ende, comúnmente se aplica fósforo a los suelos para aumentar su fertilidad, a través de fertilizantes.

Más que por procesos microbiólogos, las propiedades de intercambio catiónico, así como la meteorización mineral son las que influyen principalmente el comportamiento del potasio en el suelo. Este nutriente no provoca problemas ambientales fuera del lugar en el momento que deja el sistema del suelo. Habitualmente no forma ningún gas en la atmósfera en el cual pueda perderse. Tampoco es tóxico, ni origina eutrofización en los sistemas acuáticos. No obstante, el uso excesivo de este en fertilizantes puede afectar la asimilación de calcio y otros cationes que son indispensables para las plantas, impactando de forma negativa la calidad física del suelo (Brady et al., 2017).

2.4.4.1 Potasio en la solución de suelo

Sólo cantidades muy pequeñas se encuentran disponibles en forma inmediata en la solución del suelo para que sea absorbido por las plantas. Con el paso del tiempo este elemento se puede liberar en formas intercambiables, y las plantas cuando están en su fase de crecimiento extraen el potasio rápidamente de la solución del suelo, esta concentración se restituye y equilibra gracias al proceso de adsorción - desorción (Conti, 2000; Brady et al., 2017).

2.4.4.2 Potasio en la nutrición vegetal

El potasio cumple un papel esencial como componente de la solución citoplasmática, en la reducción del potencial hídrico osmótico celular de la planta, que disminuye la pérdida de agua de los estomas de las hojas e incrementa la capacidad para absorber agua del suelo en las células de raíz. Al hablar de estrés ambiental, el potasio es importante, en particular para ayudar a las plantas a adaptarse, por ejemplo, si existe una eficiente nutrición con potasio, se da una mejor tolerancia ante la sequía, el invierno, así como una mayor tolerancia a las plagas de insectos y se fortalecen los tallos, también puede contrarrestar varios de los perjudiciales efectos del exceso de nitrógeno.

En cambio, cuando existe una deficiencia de potasio en las plantas, estas son más susceptibles a enfermedades, a causa de una fisiología más deteriorada y paredes

celulares débiles, que permiten el ingreso de patógenos, además se reduce la síntesis de moléculas grandes que son fundamentales, como la lignina, proteínas, celulosa y almidón (Brady et al., 2017).

2.4.5 Capacidad de Intercambio Catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) en la ciencia del suelo, es una de las propiedades esenciales, ya que controla varias de las funciones fundamentales del suelo asociadas con el pH, los nutrientes, la retención de agua y los contaminantes, por lo cual este parámetro es un importante indicador en la gestión de la fertilidad y productividad del suelo (Emamgholizadeh et al., 2022).

Esta propiedad química, al ser en su mayor parte responsable de la fertilidad de los suelos, es a su vez la encargada de la producción de alimentos a nivel mundial (dato desconocido por muchos). Es una bóveda, por así decirlo, en donde los suelos almacenan los nutrientes que requieren las plantas. Nutrientes como el magnesio, potasio, nitrógeno y calcio encuentran ahí un sitio en donde acumularse y solubilizarse en el agua del suelo, con el fin de componer así la llamada “solución del suelo”, que es absorbida por las plantas. La CIC del suelo, técnicamente, hace referencia a la cantidad de sitios de intercambio de cationes que este pueda tener. La capacidad de almacenaje de cationes, así como su disponibilidad para las plantas, será mayor cuando existan más sitios de intercambio (Buelvas et al., 2019).

2.4.6 Materia Orgánica

La definición de materia orgánica es una categoría muy amplia que comprende tanto materiales que han experimentado profundos cambios en el suelo como materiales escasamente alterados (Fassbender, 1975). La fracción orgánica del suelo está conformada por raíces de plantas, microbios vivos, flora (<5%) y restos de plantas y animales muertos (>95%). Por lo tanto, ante todo, la materia orgánica es una aglomeración de materia vegetal muerta, residuos parcialmente descompuestos y sintetizados de vegetales y animales. También forman parte de esta mezcla compleja del suelo, residuos de cultivos, pastos, malas hierbas, hojas de árboles, bacterias, hongos, gusanos y actinomicetos. La fracción orgánica, por unidad de masa, es la porción más activa del suelo en términos químicos (Bohn et al., 2001).

Ciertas definiciones de la materia orgánica se limitan al humus del suelo, dejando de lado a los organismos del suelo y cualquier residuo orgánico no descompuesto (Bohn et al., 2001). Se llama humus a la parte más estable de la materia orgánica del suelo que ha sido

transformada por los microorganismos que se encuentran en él, los mismos que se encargan de descomponer la mayor parte de las sustancias vegetales o animales agregadas al suelo, generalmente de color oscuro, este color es más habitual en regiones templadas que en trópicos (Fassbender, 1975; Bohn et al., 2001)

Son profundos los efectos que tiene la materia orgánica en el suelo, fomenta una apropiada estructura al suelo, proporciona en gran parte la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la capacidad de retención de agua, en cuanto al pH del suelo, es un amortiguador, fomenta una buena relación aire - agua en los suelos, y es un amortiguador de carbono. Además, es una reserva grande y activa de elementos fundamentales, en especial de C, S, N y P (Bohn et al., 2001). Influye de manera predominante en varias de las propiedades químicas, físicas, biológicas y en funciones de los ecosistemas del suelo. Algunos elementos de la materia orgánica son encargados en gran parte de la estabilización y formación de los agregados del suelo (Brady et al., 2017).

Las grandes cantidades de nutrientes que contiene la materia orgánica son esenciales para mejorar el crecimiento de las plantas, además ciertos compuestos orgánicos que están presentes en los suelos tienen efectos estimulantes directos en tal crecimiento. Así mismo provee energía y componentes para la formación del cuerpo de la mayor parte de los organismos. Por tanto, la calidad y cantidad de materia orgánica en el suelo es esencial para determinar la calidad del suelo. En los perfiles de suelo del mundo, el carbono se encuentra de cuatro a seis veces más en la materia orgánica, que el que se halla en toda la vegetación del mundo. Por lo tanto, la materia orgánica ejerce un papel importante en el equilibrio global del carbono, este balance controla el cambio climático en gran parte (Brady et al., 2017).

2.5 Propiedades hidrofísicas

2.5.1 Densidad aparente

Se define la densidad aparente (DA) del suelo como la relación entre la masa del suelo y su volumen total. El volumen total se basa en el volumen de sólidos del suelo (orgánicos e inorgánicos) y el volumen de poros (llenos de agua y aire). Se puede clasificar como densidad aparente del suelo húmedo y densidad aparente del suelo seco (Shukla, 2013). Es una propiedad del suelo empleada generalmente en la agricultura, principalmente asociada con las prácticas de manejo en el suelo y agua. Últimamente se ha incrementado la inquietud en relación con la determinación y precisión en su medición, a causa del aumento

del uso de irrigación, tierras cultivadas sin labranza (siembra directa) y la compactación del suelo (Jiménez et al., 2005).

Aun cuando es un parámetro sencillo de obtener en casi todos los suelos, hay que tener en cuenta que no es un indicador muy específico acerca de las propiedades físicas del suelo, ya que no provee información acerca del tamaño del poro, ni acerca de las relaciones en el espacio poroso, aspectos fundamentales al momento de suponer la circulación del agua en el suelo y los peligros de degradación en la estructura del suelo. Esto implica que ante perturbaciones externas los suelos con valores de densidad aparente parecidos, pueden tener distintos comportamientos. Sin embargo, si es un indicador apropiado de importantes propiedades del suelo como: el grado de aireación, la capacidad de infiltración, que influye en la circulación de agua y aire en el suelo, en las plantas en sus procesos de establecimiento y el manejo del suelo (Rubio, 2010).

Esta propiedad también puede formar parte dentro de un conjunto reducido de parámetros cuya medición es necesaria para valorar la calidad de un suelo en específico, siendo un indicador de la cohesión, de la estructura y la resistencia mecánica al enraizamiento del mismo. Un cambio en la densidad aparente revela variaciones en la estructura del suelo a causa de la relación entre la porosidad total y la densidad aparente.

Presentan valores más bajos de densidad aparente los suelos que están bien estructurados y con un elevado contenido de materia orgánica, que son por lo general suelos de textura fina, a diferencia de los suelos de textura gruesa poco estructurados y con un contenido bajo de materia orgánica (Rubio, 2010).

2.5.1.2 Factores que afectan la densidad aparente de los suelos

De acuerdo a Castillo (2005), explica que los factores que alteran la densidad aparente de los suelos son:

- Estructura: Tiende a incrementar el espacio poroso, la granulación en los suelos y por tanto se reduce la densidad aparente. Al ser malas las condiciones estructurales en los suelos, las condiciones de compactación de los horizontes se facilitan y a su vez la disminución del espacio poroso.
- Textura: Es una de las propiedades que está estrechamente relacionada y que afecta directamente a la densidad aparente.
- Compactación: Al disminuirse la porosidad a causa de la compactación de los suelos, aumenta la densidad aparente.

- **Materia orgánica:** Aumenta la porosidad y disminuye la densidad aparente al elevar la granulación de la estructura de los suelos.

2.5.1.3 La densidad aparente y el desarrollo vegetal

La densidad aparente interviene en el crecimiento de las plantas a causa del efecto que tiene la porosidad y la resistencia en las raíces, las mismas que están interrelacionadas con esta propiedad. La resistencia mecánica tiende a incrementar y la porosidad se reduce cuando aumenta la densidad aparente, estos cambios influyen en las plantas al limitar el crecimiento de las raíces (Rubio, 2010).

2.5.2 Conductividad hidráulica

La facilidad con la cual los poros del suelo posibilitan el flujo de agua a sus perfiles inferiores, es explicada por la propiedad del suelo definida como “la conductividad hidráulica” (Copa, 2014). Es un indicador del grado de compactación del suelo y de la estabilidad de su estructura (Castellanos, 2000). Es un parámetro que está condicionado por la humedad del suelo. Se pueden definir dos clases de conductividades, una cuando el suelo se encuentra saturado y otra cuando no presenta saturación, y se denomina conductividad saturada y no saturada respectivamente (Mesquita et al., 2005).

La gravedad, osmosis y ascenso capilar son las fuerzas que permiten que el agua fluya en el suelo. Se denomina flujo saturado cuando el agua fluye en el suelo por las fuerzas de gravedad, la fuerza de succión de las partículas del suelo es entre 0 y 0.3 bar. Se nombran flujos no saturados a las fuerzas de succión más altas, y a través de la conductividad hidráulica se miden estos flujos, que están condicionados por el porcentaje de sodio intercambiable, la textura y el contenido de materia orgánica en el suelo (FAO, 2019). La conductividad está en su máxima expresión y todos los poros pueden conducir el agua cuando el suelo se satura, pero en cualquier circunstancia, ya sea que el suelo se encuentre saturado o no, la conductividad depende de las siguientes características: número, tamaño, orientación, continuidad y distribución de los poros, tamaño de las partículas, cantidad relativa de fluido presente en la matriz del suelo y tipo de fluido (Copa, 2014).

Entre el volumen de agua en un suelo que contenga un elevado porcentaje de partículas ya sean pequeñas o grandes y la conductividad hidráulica existe una relación cuantitativa del movimiento de agua en los suelos. Los suelos con un alto porcentaje de partículas pequeñas permiten el paso del agua lentamente y las grandes de manera rápida. Para la descripción de los procesos de redistribución de agua en el suelo e infiltración, la

conductividad hidráulica saturada es una propiedad clave, que está directamente relacionada con la permeabilidad del suelo, por tal razón son equivalentes (Castro, 2016).

La estructura y textura del suelo afectan la conductividad hidráulica, esta afectación es mayor cuando los suelos son altamente porosos, fracturados o agregados y es menor en suelos compactados o densos (Chirinos et al., 2004).

2.5.3 Infiltración del agua en el suelo

Por lo general, se define a la infiltración como el ingreso del agua dentro del perfil del suelo en forma vertical (Delgadillo et al., 2016). Los procesos hidrológicos del suelo en los ecosistemas terrestres, son un componente importante del ciclo del agua, siendo clave caracterizar apropiadamente las propiedades hidráulicas. La infiltración del suelo, como parámetro crítico de los procesos hidrológicos del suelo, está relacionado con la escorrentía superficial, la erosión del suelo (Liu et al., 2022), procesos de capilaridad y fuerzas asociadas con la cohesión y adhesión de las partículas del suelo. El flujo de agua en el suelo es un proceso vital que altera las condiciones químicas, físicas y biológicas del suelo, e interviene en el desarrollo, nutrición vegetal y el almacenamiento de agua en el suelo y la degradación del mismo (Varón, 2016), por esta razón, entender la infiltración y los factores que lo afectan es muy importante (Delgadillo et al., 2016).

La velocidad máxima a la cual el agua de lluvia se infiltra en el suelo durante una precipitación, depende del grado de saturación y de las características del suelo. Cualquier precipitación que exceda dicha velocidad máxima permanecerá sobre el suelo y logrará contribuir a la escorrentía. Existe una relación de dependencia entre la vegetación y la infiltración del agua en el suelo, debido a la influencia de la vegetación sobre esta propiedad. La infiltración es modificada por la vegetación de distintas maneras: de forma parcial puede interceptar el agua de lluvia y conjuntamente con el escurrimiento posterior desde el dosel vegetal, modificar la intensidad y el diámetro de gota del agua que cae al suelo. En este proceso se disminuye la intensidad de la lluvia y el diámetro de las gotas aumenta, posibilitando sobre el agua caída, una infiltración de mayor magnitud. Al caer desde una altura menor las gotas tienen una cantidad menor de energía cinética e igualmente producen un cambio menor en la capa superficial del suelo, manteniendo un valor alto de permeabilidad, que el suelo no mantendría si las gotas cayeran con toda su energía inicial. Por lo tanto, la existencia de cobertura vegetal significa una mayor capacidad de infiltración. Las raíces o residuos de estas, originan macroporos, por los que se mueve el agua a una velocidad mayor y aún más significativo, es por donde el aire que se encuentra

atrapado en el suelo puede salir, facilitando la circulación del agua y el drenaje a horizontes inferiores (Zapata et al., 2008).

2.5.4 Capacidad de campo

La capacidad de campo (CC) es la cantidad de agua que el suelo retiene luego de que se satura con agua debido a un evento de lluvia o de riego y a causa de la fuerza gravedad, parte del agua desciende rápidamente y se drena. La velocidad con la que sucede este drenaje está asociada con la conductividad hidráulica. La humedad del suelo se reduce continuamente durante el drenaje así que posteriormente el drenaje es mínimo y en ese punto, el contenido de humedad en el suelo está representado por la "capacidad de campo". La cantidad de agua en el suelo difiere según su estructura y textura. Se mide por el porcentaje de volumen de agua presente con relación al suelo seco. Igualmente, el límite superior o máximo de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo provisto de un buen drenaje interno, es representado por la capacidad de campo, en cambio el límite inferior se le conoce como "punto de marchitez permanente" (Polo et al., 2016; Zotarelli et al., 2013).

2.5.5 Punto de marchitez permanente

Se define al punto de marchitez permanente (PMP) como la cantidad de humedad que tiene el suelo, en el cual la planta ya no tiene la facultad de extraer agua del mismo, por lo que la planta se marchita y muere, si no se aporta agua adicional. No obstante, antes de llegar a este punto, estarán sujetas a un relevante estrés hídrico la mayor parte de las plantas, y posiblemente sufran una importante disminución en su productividad y salud, mucho antes de llegar al punto de marchitez (Zotarelli et al., 2013). El valor del punto de marchitez permanente depende de la conductividad hidráulica y las condiciones climáticas del suelo, además no es un valor constante para un tipo de suelo dado (Polo et al., 2016). La cantidad de agua que retiene el suelo depende, entre otras cosas, de la distribución de los diversos constituyentes sólidos, la distribución y tamaño de los poros, el contenido de materia orgánica, la estabilidad de la estructura del suelo (Oszust et al., 2010). Es importante resaltar, que cada tipo de planta posee su propia capacidad para absorber agua del suelo, la cual está comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (López, 2016).

2.5.6 Agua disponible

Se denomina el "agua disponible para la planta" (ADP) al contenido total de agua aprovechable para la absorción por parte de las plantas. El resultado de la diferencia entre

la “capacidad de campo” y el “punto de marchitez permanente”, es el agua que se encuentra disponible para la planta, y por lo general se expresa como un porcentaje en volumen (volumen de agua / volumen de muestra de suelo) (Zotarelli et al., 2013).

2.5.7 Curva de retención hídrica

La curva de retención hídrica representa la capacidad de un suelo, o algún otro medio poroso para retener agua en función de la extracción que ejerce. Principalmente se emplea para establecer la cantidad de agua que las plantas pueden absorber, o en otras palabras, un índice de humedad disponible en el suelo, así como para estimar ciertos valores de humedad propios de la relación suelo - agua - planta, tales como el punto de marchitez permanente o la capacidad de campo, también para clasificar el suelo, encontrar alteraciones en su estructura, y establecer la relación entre la tensión de la humedad del suelo y otras propiedades físicas (Martínez, 1995).

Igualmente, esta curva característica de humedad del suelo brinda una idea de la distribución de poros, que al mismo tiempo está asociada con la estructura del suelo, el grado de compactación, la conductividad hidráulica y otras propiedades físico químicas importantes (Tejero et al., 2009).

2.6 Impactos de las actividades antrópicas en una microcuenca

2.6.1 Actividades agrícolas

Se encuentran en un equilibrio morfodinámico frágil, las áreas de vegetación natural de las sierras andinas que están por arriba de las 3200m, a causa de la agricultura es perturbado este equilibrio en varias ocasiones (Hofstede, 1997).

Los cultivos en el páramo son los que provocan en el suelo el mayor impacto, el cual sucede desde la preparación del terreno, en donde se elimina toda la vegetación natural y se revuelve el suelo, provocando que este se seque superficialmente y se liberen nutrientes. Los rendimientos en los cultivos son relativamente altos en el primer año, ya que usan las reservas de fósforo y a causa de la ausencia de fitopatógenos en el suelo es bajo el riesgo fitosanitario (Hernando et al., 2009). Pero el suelo pierde características como la materia orgánica luego de la primera cosecha y queda con una baja disponibilidad de nutrientes, a la vez con la utilización de pesticidas, afectan ampliamente en la capacidad de retención de agua y la calidad de agua infiltrada y superficial (Delgado et al., 2002). Por otra parte, no pueden proteger al suelo los cultivos, a diferencia como lo hace la vegetación nativa del

páramo, de la erosión hídrica y eólica, a causa de una exposición del suelo al aire y un incremento en la evaporación en el suelo superficial (Hernando et al., 2009).

Cuando esto sucede, el efecto mutuo que existe entre el agua y la materia orgánica se interrumpe: debido a una disminución en la humedad, hay un incremento de la descomposición, que resulta en un menor contenido de materia orgánica en el suelo, y a la vez resulta en una capacidad de retención de agua menor. Este resultado es muy importante, porque los suelos que se encuentran en la mayoría de los páramos, que son suelos volcánicos poco desarrollados, se secan irreversiblemente y su morfología original no se restablece cuando se moja de nuevo. Este ciclo de sequía y disminución de materia orgánica por las repetitivas prácticas agrícolas, con largas etapas sin descanso, pueden resultar en suelos arenosos, secos y sin partes orgánicas (Hofstede, 1997).

2.6.2 Actividades Ganaderas

Las actividades ganaderas pueden alterar las condiciones del páramo, estos cambios se reflejan en la capacidad de retención y almacenamiento de agua en el suelo a causa del repetitivo pisoteo del ganado que compacta el suelo, el cual es suave y suelto por el alto contenido de materia orgánica, factor que favorece la compactación, también se disminuye el espacio poroso para acumular agua, afectando negativamente la densidad aparente, la estructura, la porosidad, la permeabilidad y la consistencia (Daza et al., 2014), como resultado el ciclo hidrológico se ve afectado, por lo que durante las lluvias hay una mayor probabilidad de erosión y escorrentía superficial (Delgado et al., 2002).

Se da un reordenamiento de las unidades estructurales a causa de la pérdida de agua, a la vez se producen en los espacios vacíos modificaciones y el suelo pierde su capacidad de infiltración, complicando el flujo de agua y la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Igualmente, están relacionadas las deyecciones del ganado con un incremento en la capa arable de la concentración de carbono y un incremento en el espesor de la capa orgánica; su mineralización causa inconvenientes como el exceso de nitrógeno, que impacta las propiedades físico - químicas de los suelos y su capacidad para conservar los cultivos, a esto se suma la posible contaminación de cursos de agua y de acuíferos (Hernando et al., 2009).

2.7 Marco Legal

El marco legal de esta investigación se fundamenta en las normas y leyes emitidas por instituciones públicas de la República del Ecuador en cuanto a la temática ambiental, orientadas esencialmente al recurso suelo. Los documentos empleados para elaborar el

marco legal pertenecen a la Constitución de la República, COA (Código Orgánico del Ambiente), INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), TULSMA (Texto Unificado De Legislación Secundaria De Medio Ambiente). Además, se hace referencia a uno de los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), objetivos globales, planteados por la ONU.

2.7.1 Constitución de la República del Ecuador 2008

Se toman algunas disposiciones constitucionales como el Art. 14, Art. 73, Art. 395, Art. 39, y Art. 397 vinculadas al tema. Estos hacen referencia a derechos de la naturaleza, los cuales se basan en los principios indígenas del “Sumak Kawsay”, los mismos que conceden a la pachamama derechos constitucionales para preservar, conservar y restaurar su medio ambiente. Mediante medidas de prevención y restricción, formuladas y aplicadas por el Estado, el cual está a cargo de la administración y manejo de las áreas naturales para evitar la alteración y destrucción de los ecosistemas, así como de sus ciclos naturales. Por tanto, se asegura y se garantiza el mantenimiento de las funciones ecológicas del ecosistema.

2.7.2 Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales

La presente ley tiene como objeto regular el uso, acceso, posesión y distribución de la tierra rural, siendo uno de los propósitos proporcionar un ambiente sustentable y equilibrado. Por ende, se hace referencia al Art. 7, Art. 13 y Art. 50, los cuales establecen que el estado controla el avance de la frontera agrícola o el aprovechamiento agrario que puede impactar ecosistemas frágiles como el páramo, o específicamente áreas naturales protegidas que albergan una alta biodiversidad o que generen servicios ambientales.

2.7.3 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. TÍTULO VII Ecosistemas Frágiles. Capítulo II Páramos.

Se considera el Art. 261 de este reglamento, el mismo que define mecanismos para la gestión de páramos. Se basa en principios que dictan que las actividades que se lleven a cabo por la comunidad que habitan los mismos, deben estar orientadas al desarrollo propio y con criterios de sostenibilidad tanto ambiental como social, que garanticen la conservación de la biodiversidad. Así mismo, este reglamento reconoce que los páramos al poseer fuentes hídricas cumplen funciones esenciales para el bienestar y desarrollo de la población. Por lo cual, la Autoridad Ambiental Nacional tiene como prioridad fomentar la restauración ecológica de aquellas áreas que se encuentren alteradas por actividades humanas o naturales.

2.7.4 NTE INEN 686 y 687. Mecánica de Suelos: Toma de Muestras Alteradas e Inalteradas

Estas normas definen los procedimientos de forma detallada para la obtención de muestras alteradas e inalteradas de suelo. Facilita criterios generales y específicos que deben tomarse en cuenta para la toma de muestras, así como el tipo de instrumental que se debe disponer para llevar a cabo dicho muestreo.

2.7.5 ANEXO 2 del Libro Vi de Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo

Se contempla esta norma que tiene como objetivo que la salud de las personas sea protegida, así como la calidad ambiental del recurso suelo. Esto con el propósito de que las funciones naturales en los ecosistemas sean salvaguardadas de actividades antropogénicas y de los diversos usos que se le den al recurso que puedan alterar su calidad resultante. Por medio de pautas de aplicación general, que en pocas palabras definen que los sistemas de agricultura utilizados no deben degradar, contaminar o desequilibrar el ecosistema del área geográfica en que se desarrollen. Esto abarca el uso racional y técnico de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas en usos de suelo agrícola, pecuario, forestal, urbano, minero, recreativo, de conservación, industrial y comercial. En esta norma también se detalla el procedimiento para ejecutar la toma de muestras compuestas para cateterización de los suelos y su respectivo análisis.

2.7.6 Objetivo 15 de Desarrollo Sostenible (ODS). Vida de Ecosistemas Terrestres

Mediante distintas metas planteadas y la toma de medidas urgentes, este objetivo tiene como propósito cuidar, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, ecosistemas de interiores de agua dulce, ecosistemas montañosos y los servicios que brindan, combatir la desertificación, detener la degradación de las tierras y la pérdida de biodiversidad. Igualmente, tiene como fin evitar la introducción de especies exóticas invasoras y minimizar sus efectos en los ecosistemas mencionados.

Materiales y métodos

3.1 Introducción

Para evaluar la influencia del cambio de cobertura vegetal en el suelo, se analizaron parámetros químicos; pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, intercambio catiónico, e hidrofísicos; densidad aparente, conductividad hidráulica, curva de retención de agua del suelo. El estudio se realizó en las microcuencas hidrográficas Yutujapina y Lluchucarrumi ubicadas en la parroquia Cumbe (ver Figura 1).

La microcuenca Yutujapina, es un área de recarga hídrica del páramo que abastece de agua para consumo humano a la población de Cumbe proveniente del sistema “Yutujapina”. Este sistema tiene un caudal aproximado de 6 l/s y abastece a las Comunidades de: La Posada, San Francisco, San José, Manzano Loma, Tres de Noviembre, La Unión, Los Sauces, San Antonio, La Confianza, Mayo Alto, Los Laureles, San Pedro, El Salado, El Cisne, Centro Parroquial, a los barrios: Sucre, Calle Sucre, Bella vista y los Olivos (Criollo et al., 2015). La influencia antrópica es evidente en la zona, están presentes diversas prácticas de perturbación en la cobertura vegetal.

En cuanto la microcuenca Lluchucarrumi, se utilizó como testigo para la investigación. Es un área que desde hace más de ocho años se encuentra en proceso de recuperación pasiva, sin ningún tipo de intervención antrópica. Las coberturas vegetales se están recuperando y la mayor parte del área de la microcuenca conserva su vegetación nativa. Un área óptima para representar como testigo.

Los análisis químicos se realizaron en el laboratorio de análisis de suelos de la Facultad de Ciencias Químicas en la Universidad de Cuenca. Los parámetros hidrofísicos fueron determinados en el laboratorio de hidrofísica de suelos del PROMAS (Programa Para el Manejo del Agua y del Suelo) - Universidad de Cuenca. Los métodos y procedimientos para los análisis hidrofísicos, tanto en laboratorio como in-situ, se realizaron según el procedimiento de selección y validación de métodos de ensayo utilizado por el PROMAS.

3.2 Área de estudio

El área de estudio se ubica en la parroquia San Luis de Cumbe, del cantón Cuenca. Limita al norte con la parroquia Tarqui, al este con la parroquia Quingeo y al oeste con la parroquia Victoria del Portete. Su área aproximada es de 6830.80 ha (PDOT, 2020).

Al sur de la parroquia San Luis de Cumbe se localizan las microcuencas hidrográficas Yutujapina y Lluchucarrumi, en las coordenadas geográficas $3^{\circ}8'43.81''S$; $79^{\circ}2'36.71''O$ y $3^{\circ}09'21.63''S$; $79^{\circ}02'39.13''O$ respectivamente (Figura 1).

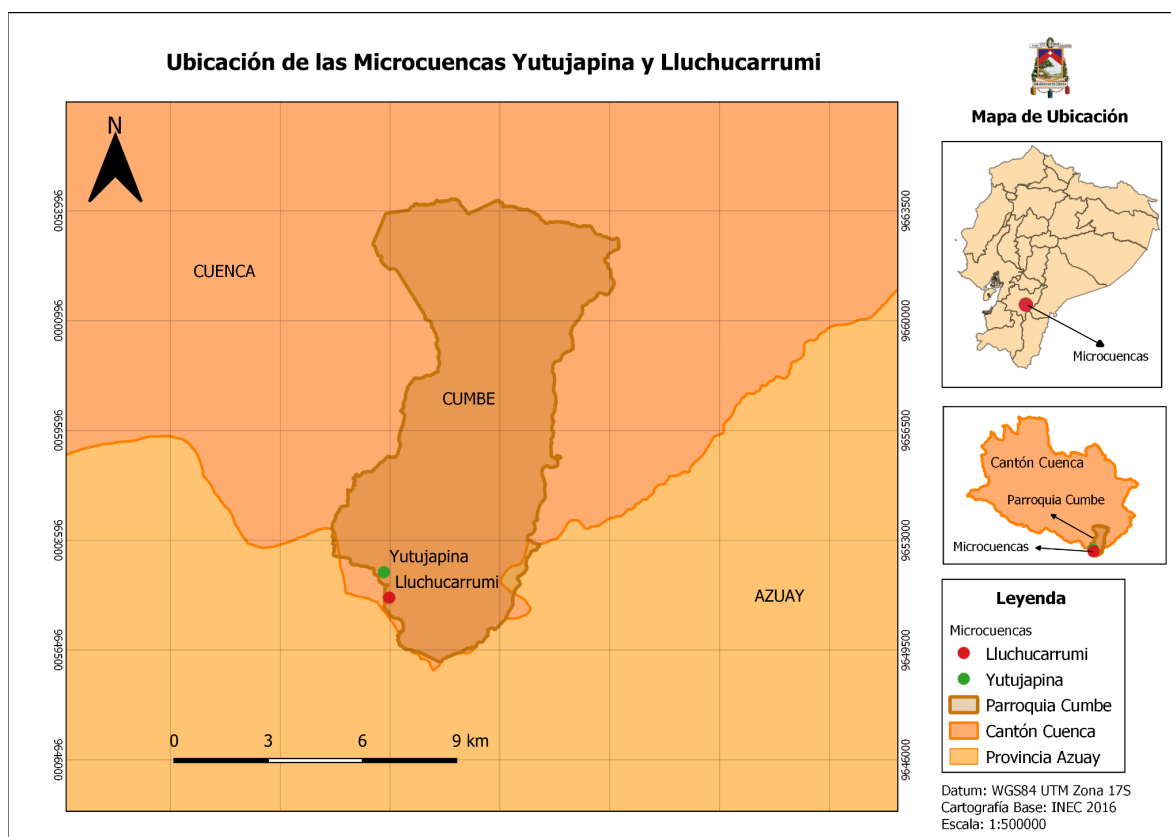


Figura 1. Mapa de ubicación de las microcuencas Yutujapina y Lluchucarrumi

Fuente: INEC, 2016.

3.3 Caracterización

3.3.1 Delimitación de las microcuencas y sus coberturas vegetales

La identificación de los tipos de cobertura vegetal y la respectiva delimitación de las microcuencas hidrográficas para la investigación, se realizó con un GPS modelo Trimble Juno 3B. Información que se corroboró con imágenes satelitales y uso de Sistema de Información Geográfica (software ArcGIS y QGIS).

3.3.2 Muestreo de suelo

Se seleccionaron los tipos de cobertura vegetal representativos en cada microcuenca, coberturas que, por su degradación o conservación, se utilizaron para el correspondiente

análisis comparativo. Para la obtención de los datos químicos e hidrofísicos, la toma de muestra y el análisis in situ se realizó en 4 coberturas vegetales enlistadas y codificadas en la tabla 1, en cuanto que, al análisis químico se suma la cobertura; pasto en recuperación dentro de la microcuenca Lluchucarrumi. Se tomaron muestras alteradas e inalteradas, (la figura 2 muestra el procedimiento para cada tipo de muestra) en la fracción de profundidad máxima dada por el horizonte "A" de cada cobertura (tabla 1).

Tabla 1. Tipos de cobertura vegetal

Microcuenca Yutujapina	Código	Profundidad (cm)	Análisis	Microcuenca Lluchucarrumi	Código	Profundidad (cm)	Análisis
1. Bosque nativo	Y-BN	60	Q/H	1. Bosque nativo	L-BN	80	Q/H
2. Pasto reforestado	Y-PasRef	35	Q/H	2. Pasto degradado	L-P	54	Q/H
3. Arado	Int-Ara	20	Q/H	3. Bosque de pino	L-BP	30	Q/H
4. Pajonal degradado	Y-PajDeg	50	Q/H	4. Pajonal conservado	L-PC	80	Q/H
				5. Pasto en recuperación	L-PR	25	Q

Q/H análisis químico e hidrofísicos, Q solo análisis químico.

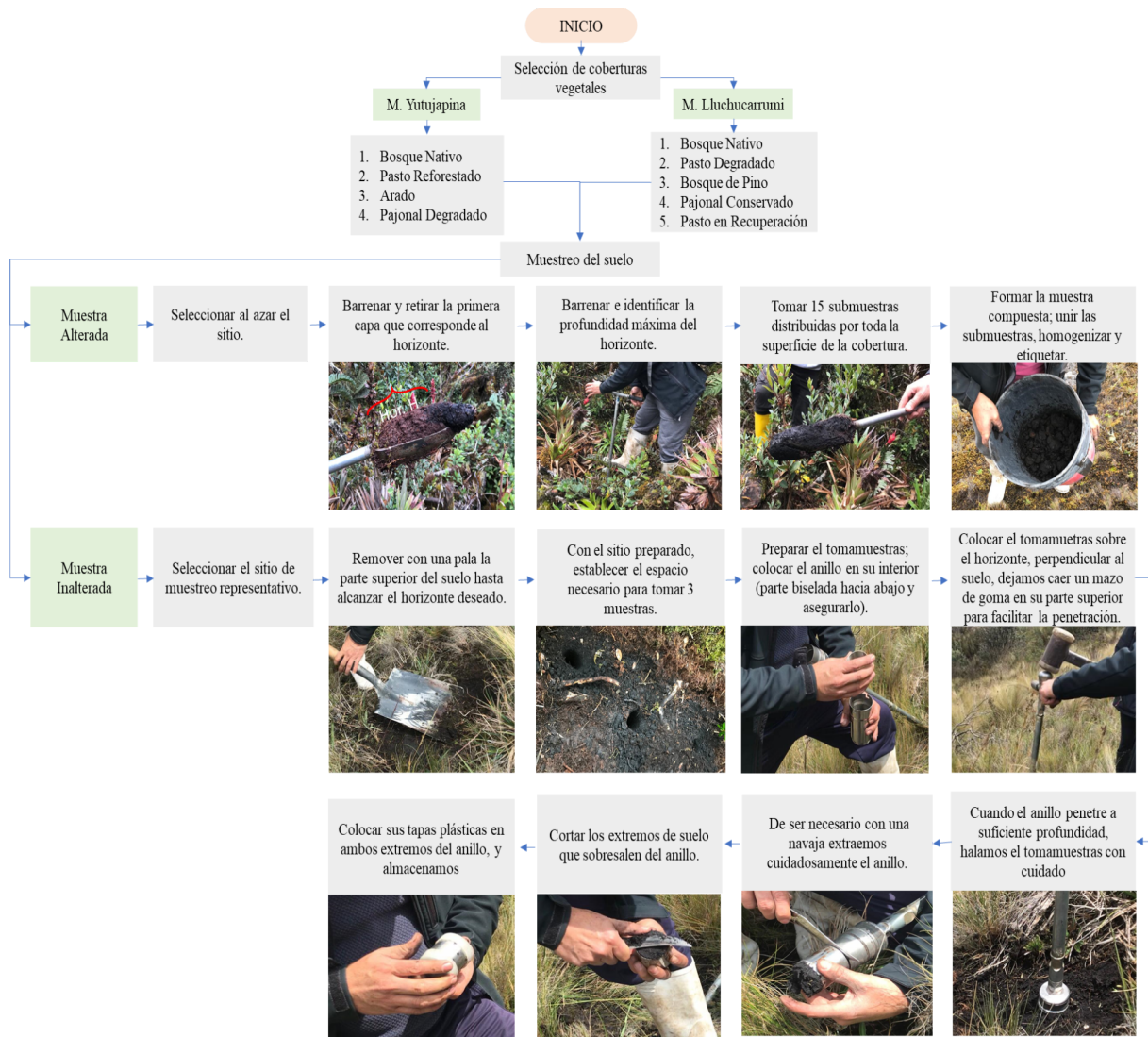


Figura 2. Diagrama de muestreo de suelo

En las muestras compuestas, la cantidad recolectada debe ser igual a 1 kg de suelo seco, este valor representa 1 hectárea de terreno (Schweizer, 2017).

Cada punto de muestreo fue georeferenciado con el GPS. Estas muestras fueron utilizadas para los análisis químicos; pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, intercambio catiónico, e hidrofísicos; densidad aparente, curva de retención de agua del suelo.

3.4 Análisis hidrofísicos

3.4.1 Determinación de la conductividad hidráulica saturada (K_s)

La conductividad hidráulica es una propiedad que relaciona el contenido y movimiento del agua en la matriz del suelo. Cuando el potencial matricial del suelo es igual a cero, la conductividad hidráulica es saturada (K_s) (Barbecho. et al., 2012). La ley de Darcy se aplica

para determinar este valor, que una vez definido se clasifica según la rapidez del movimiento (Guncay, 2015).

Parámetros como la viscosidad, densidad y el tamaño de poros, son algunos de los factores que influyen en el valor de K_s .

En el estudio, para determinar el parámetro K_s , se empleó el método de pozo invertido (Eijkelkamp), metodología in-situ con tres repeticiones (Ramírez, M., 2011). Se realizaron tres agujeros en cada sitio de estudio (Tabla 1.) a una profundidad que no sobrepase el horizonte de interés; Horizonte A y cuyo diámetro es constante (4 cm). El procedimiento de describe a continuación:

Descripción del equipo

1. Flotador
2. Flexómetro
3. Soporte
4. Barreno (4 cm diámetro)
5. Poma con agua
6. Cronómetro
7. Cartilla

Procedimiento

Se limpia la primera capa hasta alcanzar el horizonte deseado, con el barreno se identifica la profundidad límite del horizonte A. Luego, con la profundidad de referencia se perforan tres agujeros (diámetro de 4 cm) a una separación de 30 cm. Los hoyos deben estar libres de raíces y cualquier material que obstaculice el descenso del flotador. Para empezar la prueba se anota la lectura de fondo y superficie, seguido vertemos agua hasta el borde superior de los agujeros (la matriz del suelo debe estar previamente saturada) asegurándonos que estén completamente llenos. Dejamos caer el flotador y a partir de ese momento medimos la velocidad de descenso del agua en intervalos de tiempo; en el estudio se tomó la lectura cada minuto y luego cada dos minutos, los valores se midieron hasta que la tasa de infiltración fue constante (ver figura 3).

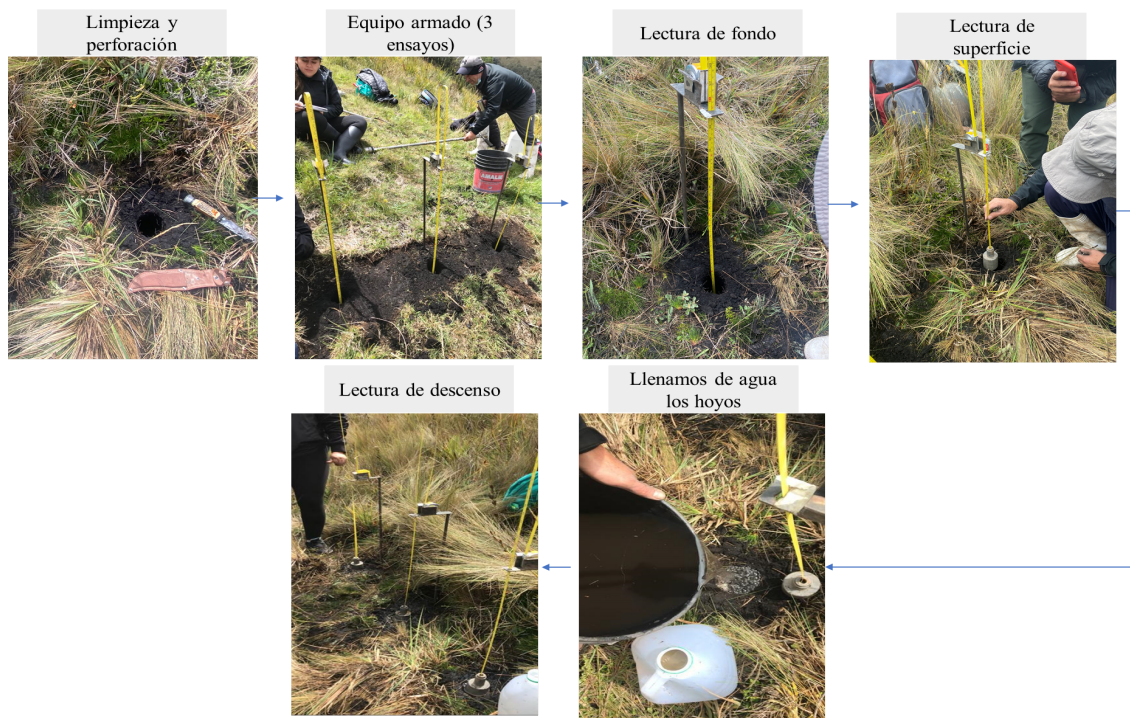


Figura 3. Prueba de pozo invertido

Cálculos

Para determinar los valores de K_s se utiliza la Ecuación 1:

$$K_s = 1.15 * r * s \quad [Ec. 1]$$

Donde:

r = radio del agujero

s = pendiente de la recta.

Una vez obtenido los valores de cada una de las tres pruebas, estos se promediaron para obtener un único valor de K_s por tipo de cobertura.

3.4.2 Determinación de la curva de retención de agua del suelo

3.4.2.1 Aparato de membrana a presión (Eijkelkamp)

El aparato de membrana se basa en una cámara de acero que se sella herméticamente y se sujeta a presiones internas para así simular la tensión matricial, es decir, las condiciones de succión que se dan en el suelo. Dentro de la cámara se encuentra una placa o plato semipermeable, sobre la cual se colocan las muestras, la placa posibilita que el agua pase,

pero el aire no. Esta placa tiene una conexión con un colector, por medio del cual el agua que se drena de las muestras es extraída. El colector de aire se sitúa en la parte de arriba de la cámara mediante el cual se suministra aire en el interior a la presión deseada (Vélez, 2021) (ver figura 4). De esta manera se puede determinar los puntos de retención de agua en el suelo dentro de un rango de presiones altas (Orellana, 2010). En este estudio se utilizaron presiones de 3 y 15 bares.

Descripción del equipo. -

1. Membrana de presión (celofán).
2. Tela filtro
3. Anillos plásticos
4. Compresor
5. Vasos, plástico, ligas
6. Horno
7. Balanza
8. Espátula



Figura 4. Aparato de membrana de presión

Preparación de las muestras: De las muestras alteradas obtenidas en el campo (figura 2), se toman aproximadamente 100 g y se colocan en un vaso plástico, en el cual se vierte agua con el fin de saturar el suelo como muestra la figura 5. El tiempo de saturación es de acuerdo al tipo del suelo, por lo general dura de 1 a 6 días según lo recomendado, para el estudio se dejó saturar por 6 días, tiempo máximo requerido para asegurar la saturación total de la muestra.



Figura 5. Preparación de la muestra

Preparación del aparato de membrana: Se humedece la tela filtro y se satura el celofán (membrana) con agua por un tiempo de 24 horas, es recomendado que en cada nuevo procedimiento se use una nueva membrana, la tela es reusable. Para colocar la tela filtro se dobla la misma, ya que se necesitan dos capas, una encima de la otra para colocarlas en el plato, la membrana de celofán va encima de la tela filtro asegurándose con la mano de que la tela y el celofán estén bien extendidos y sin aire, para posteriormente posicionar un anillo de acero que hace contacto con el plato (ver figura 6).



Figura 6. Montaje del aparato de membrana a presión

Llenado del aparato de membrana de presión: como muestra la figura 6, de acuerdo al tipo de suelo de las diferentes coberturas vegetales, cada uno de los anillos de plásticos se identificaron, para luego colocarlos en orden encima de la membrana húmeda. Con una espátula los anillos se llenaron con suelo previamente saturado. Con el fin de obtener datos más precisos en el estudio se utilizaron 3 anillos por muestra de suelo (ver figura 7).



Figura 7. Muestras de suelo en el aparato de membrana de presión

Aparato de membrana de presión en uso: Se coloca el plato de acero en el aparato de membrana y se gira el tornillo de gusano en dirección a las manecillas del reloj para sellar la cubierta. La palanca que permite el paso de la presión al aparato de membrana se abre lentamente hasta llegar a la presión requerida, verificando el valor en el manómetro. En la investigación se realizó a dos presiones que fueron $h=3$ bares y $h=15$ bares. El tiempo que permanecieron las muestras en el aparato de membrana fue de acuerdo al tipo de suelo, para este estudio las muestras permanecieron por un lapso de 6 días.

Pesado de las muestras: Los anillos que contienen las muestras de suelo se retiraron del plato de acero, las muestras de suelo se colocaron en cápsulas, las cuales se pesaron con y sin la muestra. Las cápsulas con el suelo se colocaron en un horno a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un tiempo de 48 horas. Después de este tiempo se sacan las muestras para pesarlas (ver figura 8). Cabe recalcar que la temperatura y el tiempo de duración para el secado de las muestras, sugerido por el procedimiento de selección y validación de métodos de ensayo del PROMAS, es de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h. Sin embargo, estudios recomiendan que, para suelos orgánicos con alto contenido de materia orgánica, es preferible dejar el secado de muestras bajo las condiciones aplicadas en este estudio, con el fin de que se conserve las características reales de la materia orgánica (Yang et al., 2014).



Figura 8. Secado y pesado de muestras

Cálculos

La humedad gravimétrica se calcula con la Ecuación 2:

$$W = \frac{m_{sh+r} + m_{ss+r}}{m_{ss+r} - m_r} \quad [Ec. 2]$$

Donde,

W = Humedad gravimétrica

m_{sh+r} = Peso de suelo húmedo más anillo o recipiente (g)

m_{ss+r} = Peso de suelo seco más anillo o recipiente

m_r = Peso del anillo o recipiente

3.4.2.2 Método de etapas múltiples (Multistep)

La curva de retención de agua, se describe por medio de ecuaciones de forma cerrada conocidas como el modelo MVG (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980). Las relaciones entre el contenido volumétrico de agua, la conductividad hidráulica (k) y la carga de presión (h), se describen mediante dichas ecuaciones matemáticas, las mismas que comprenden seis parámetros (parámetros de MVG). Al establecer estos parámetros, es factible describir las propiedades hidráulicas de un suelo mediante la construcción de la curva de retención de humedad y conductividad hidráulica (Orellana, 2010).

Parámetros Directos; θ_s (contenido de agua saturada), θ_r (contenido de agua residual), θ_{ks} (conductividad hidráulica saturada).

Parámetros Empíricos α (inverso del valor de entrada de aire 1/cm), n (parámetro empírico), m (parámetro empírico), γ (parámetro condicionado sin condiciones), para determinar la forma de la curva de retención y conductividad.

Para el estudio se aplicó el método de flujo de salida de múltiples pasos también conocido como multistep (ver figura 9), se utiliza de manera amplia para determinar de forma rápida y simultánea ambas funciones hidráulicas, para obtener datos de conductividad y retención que son fundamentales para una predicción precisa del flujo de agua en los suelos (Fujimaki & Inoue, 2004; Schelle et al., 2010).



Figura 9. *Equipo Multistep*

Como muestra la figura 10, se trata de situar una muestra de suelo inalterada e inicialmente saturada encima de un plato de cerámica porosa en una celda de presión, el cual se satura en dirección de abajo hacia arriba y por medio del aumento gradual de una presión neumática de aire sobre la muestra, un flujo no saturado se induce por lo que el plato de cerámica permanece saturado. El flujo de salida acumulativo se registra a intervalos de tiempo intermitentes (Orellana, 2010).

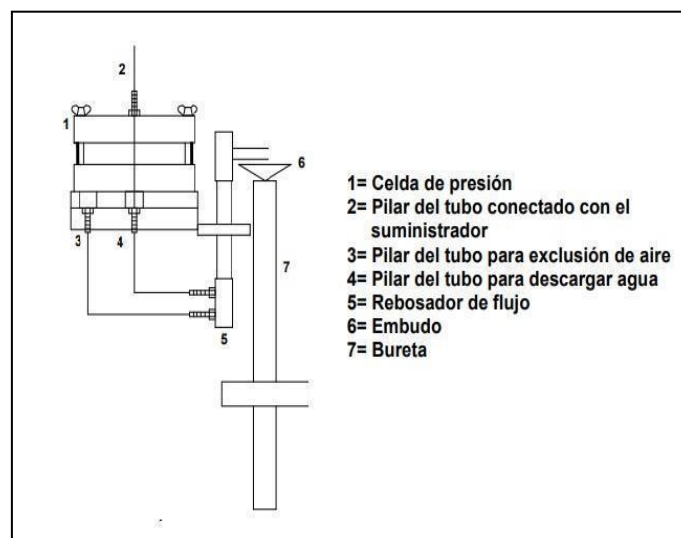


Figura 10. *Descripción del equipo Multistep*

Fuente: Orellana, 2010

Descripción del Equipo

1. Un compresor de aire

2. Un regulador de presión
3. Cada celda de presión consta de cuatro anillos de caucho, papel filtro, placas de cerámica porosas y mariposas.
4. Soportes para las celdas de presión.
5. Buretas de 1000 cm³

Equipos adicionales:

6. Horno
7. Balanza

Materiales necesarios para el muestreo del suelo:

1. Pala
2. Cuchillo
3. Cuaderno
4. Tomamuestras
5. Anillos de kopecky
6. Caja de muestras para los anillos

Preparación y presaturación de las muestras de suelo: cada una de las muestras de suelo inalteradas que fueron tomadas en el campo se alistan como paso previo, se preparan los anillos de kopecky para que exista un buen contacto entre el suelo y el plato de cerámica. Se cubre la parte inferior del anillo con tela, y se lleva a saturación como muestra la figura 11. Para evitar la evaporación se cubre la bandeja con una funda plástica.



Figura 11. *Presaturación de las muestras de suelo*

Saturación e instalación de las muestras en las celdas de presión: Se colocan los platos de cerámica en agua por un día para que se saturen. Después se procede a colocar en el

soporte las celdas de presión, la base de la celda se llena con agua y se coloca un plato de cerámica, encima un papel filtro y sobre esto los anillos de caucho, posteriormente se colocan los anillos de kopecky. De igual manera se procede en la parte superior de la celda, finalmente aseguramos el equipo (ver figura 12). Es importante evitar en todo momento del montaje de la celda la formación de burbujas de aire, de lo contrario se tiene que desmontar la celda e instalar la muestra nuevamente.

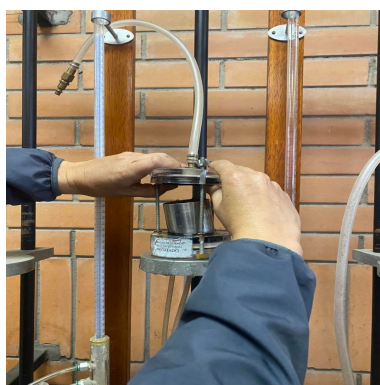


Figura 12. *Instalación de las muestras en las celdas de presión*

Determinación del contenido de agua residual y de la densidad aparente: se calcularon los valores de los puntos de retención en base al contenido de agua residual y la densidad aparente. Las muestras de suelo se pesaron y se colocaron en la estufa a una temperatura de 80 °C por 48 horas. Pasado este tiempo las muestras nuevamente se pesaron, luego el material de suelo se extrae, el anillo se lava y se pesan igualmente (ver figura 13).



Figura 13. *Pesado de las muestras*

Cálculos

Densidad aparente. - La densidad aparente se calcula con la Ecuación 3 que se describe a continuación:

$$\rho = \frac{m_{s+a} - m_a}{v} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde,

ρ = densidad aparente (gr/cm³)

m_{s+a} = masa del suelo seco más anillo (gr)

m_a = masa del anillo de muestreo (gr)

v = volumen del anillo de muestreo (cm³)

Contenido de agua residual - Se calcula con la Ecuación 4 que de manera simplificada se expresa de la siguiente manera:

$$\theta_r = w * \rho \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde,

w = humedad volumétrica

ρ = densidad aparente (gr/cm³)

$$\theta_r = \frac{(m_e - m_{s+a})}{(m_{s+a} - m_a)} * \rho \quad [\text{Ec. 5}]$$

Donde,

θ_r = contenido volumétrico de agua de la muestra después del experimento de flujo de salida (cm³ /cm³)

m_e = masa de la muestra de suelo (húmedo) después del experimento de flujo de salida más anillo (gr)

m_{s+a} = masa del suelo seco más anillo (gr)

m_a = masa del anillo de muestreo (gr)

Puntos de retención. - Los contenidos de agua se calculan de la siguiente manera con la Ecuación 6:

$$\theta_x = \theta_r + \frac{(wl_x - wl_f)}{V} * \rho \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde,

θ_x = contenido volumétrico de agua para los puntos de retención ($r_1, r_2\dots$) o de la situación saturada (cm^3/cm^3)

θ_r : Contenido de agua residual (cm^3/cm^3).

w_{lx} = nivel de agua al inicio del experimento en la bureta para los puntos de retención

w_{lf} = el nivel final del agua después de las mediciones de flujo de salida (ml)

Una vez obtenido la base de datos a partir del aparato de membrana a presión y el multistep, se procedió a la generación de la curva pF elaborada en el programa computacional SHYPPFIT (Soil hydraulic Properties Fitting), cuyos parámetros MVG para la obtención de la curva pF están en base a $\theta_s, \theta_r, \alpha, n, m$.

3.5 Análisis químicos

Para determinar los valores de los parámetros químicos, se envió una porción de la muestra compuesta (alterada) previamente recolectada y etiquetada, al laboratorio de análisis de suelos. Los parámetros con sus respectivos métodos de análisis se enlistan en la tabla 2.

Tabla 2. *Parámetros y métodos para el análisis químico*

Parámetro	Método
Nitrógeno	Kjeldahl
Fósforo	Olsen
Potasio	Olsen
pH	Potenciométrico
Capacidad de Intercambio Catiónico	Saturación con acetato de Amonio
Materia orgánica	Walkley

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelo

3.6 Análisis estadístico

El análisis estadístico inferencial se realizó en el programa R versión 4.1.2, en conjunto con Excel 2021. Para la selección de la prueba estadística se evidenciaron 3 aspectos; diseño de la investigación, número de mediciones y escala de mediciones de variables. En base a estos parámetros, se determinó los cambios en los parámetros químicos e hidrofísicos, cuya escala de medición son variables cuantitativas continuas independientes. Por lo tanto, el

tipo de distribución de los datos puede ser paramétrico (distribución normal) o no paramétrica (no sigue una distribución normal).

Para determinar la normalidad de los datos, se empleó el análisis de normalidad Shapiro Wilk, este se aplica a conjuntos de muestras pequeñas ($n < 30$) y tiene la finalidad de conocer si los datos siguen o no una distribución normal de acuerdo a la aceptación o el rechazo de la hipótesis nula (H_0). Al demostrar la validez de la hipótesis, se podrá conocer cómo se comportan los datos. Si los datos siguen una distribución normal, se aplica la prueba estadística de t-Student, caso contrario el test no paramétrico de Wilcoxon.

Resultados y discusión

4.1 Delimitación de las microcuencas hidrográficas y sus diferentes tipos de cobertura vegetal

El resultado del levantamiento de información geográfico de los diferentes usos de suelo en las microcuencas Yutujapina y Lluchucarrumi, se muestran en mapas temáticos representados en las figuras 14 y 15 respectivamente.

Como se observa en el mapa de la microcuenca Yutujapina (figura 14), este contiene los siguientes tipos de uso de suelo: bosque nativo (Y-BN), pajonal conservado (Y-PajCon) y degradado (Y-PajDeg), pasto reforestado (Y-PasRef) y el uso de suelo intervenido, dentro de este último, se identificó zonas de arado (Int_Ara), pasto (Int_Pas) y potreros (Int_Pot). Así mismo, en la microcuenca Lluchucarrumi se identificaron los siguientes tipos de usos de suelo: bosque nativo (L-BN), pasto degradado (L-PasDeg) y pasto en recuperación (L-PasRec), bosque de pino (L-BP) y pajonal conservado (L-PajCon) (figura 15).

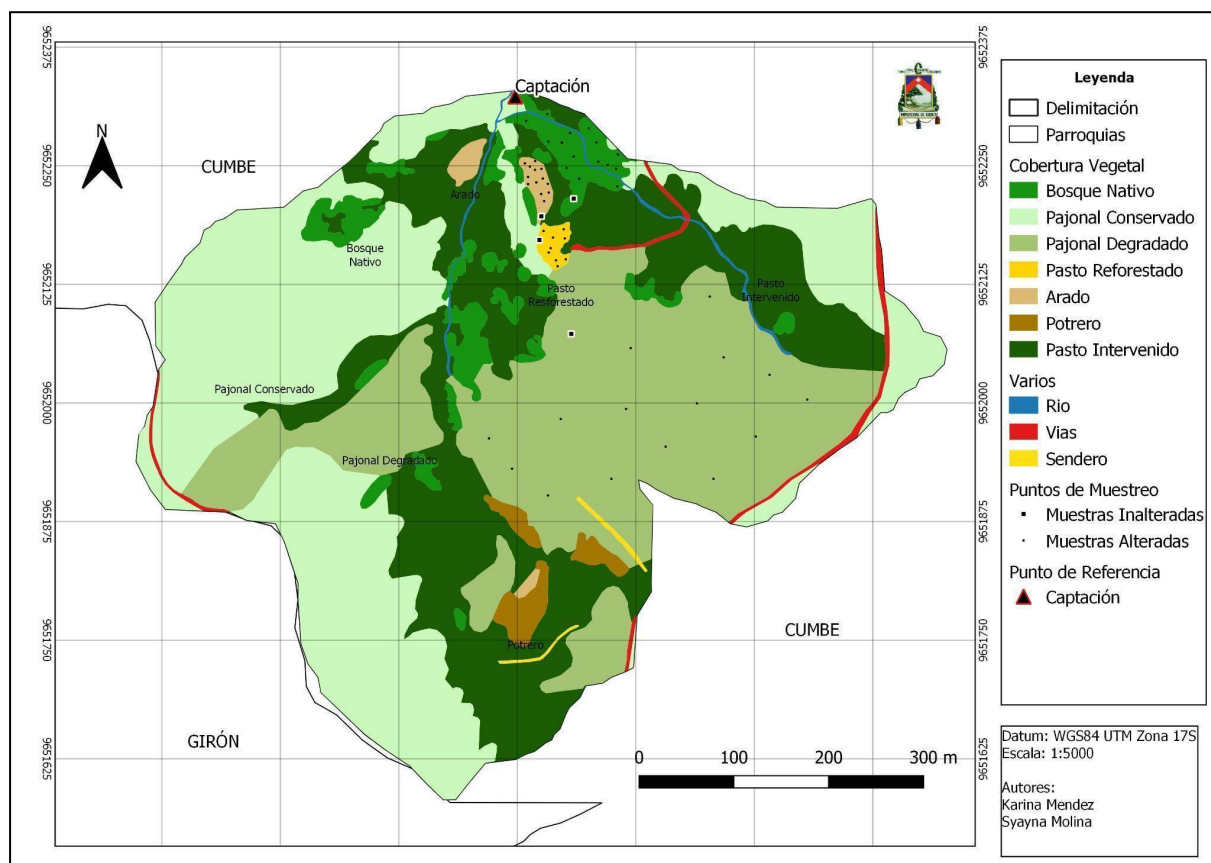


Figura 14. Mapa de las Coberturas en la Microcuenca Yutujapina y puntos de muestreo

Fuente: INEC, 2016.

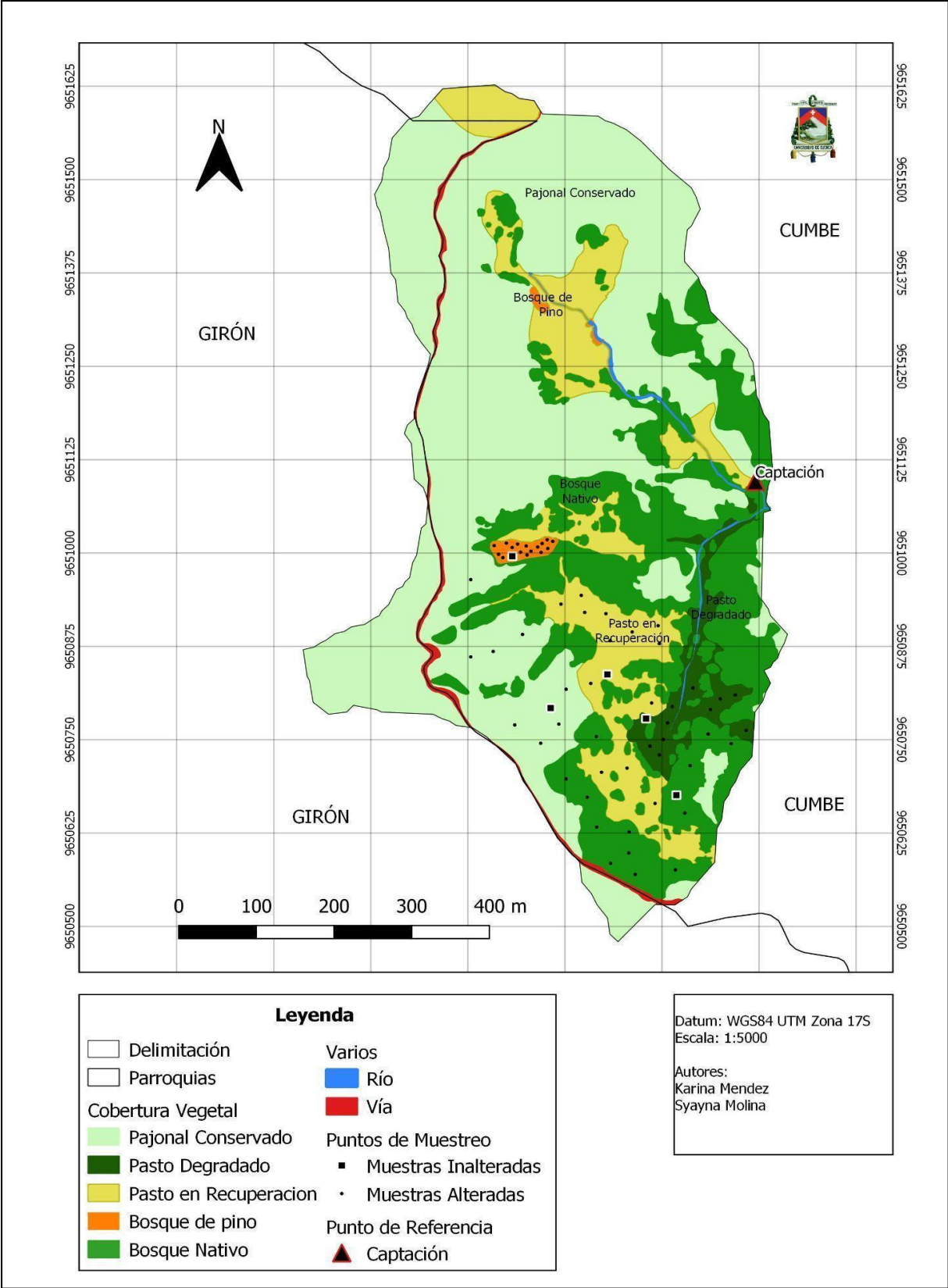


Figura 15. Mapa de las Coberturas en la Microcuena Lluçucarrumi y puntos de muestreo

Fuente: INEC, 2016.

Después del levantamiento de información in-situ y, por consiguiente, la obtención de archivos tipo shape, se calculó el área total por microcuenca y por cobertura vegetal, como resultado el área en hectáreas que se muestra en las tablas 3 y 4.

En la tabla 3 se presentan las áreas obtenidas en Yutujapina; esta microcuenca tiene un área total de 35.7 hectáreas. Los valores obtenidos del área de cada uso de suelo son los siguientes: el pajonal, que representa la mayor parte de superficie, con un total de 23.8 hectáreas, de las cuales 12.7 se conservan (Y- PajCon) y 11.1 están degradadas (Y- PajDeg). Luego, tenemos el uso de suelo intervenido; esta cobertura tiene un total de 9.8 hectáreas. Por último, los usos de suelo con menor área son bosque nativo con 2 hectáreas y el pasto reforestado con 0.1 hectáreas.

Ahora bien, la figura 16 expone los valores porcentuales por uso de suelo de Yutujapina, con el fin de apreciar mejor los resultados expresados anteriormente. El suelo de pajonal en total representa el 66.5% de la microcuenca, de esto, el 35.5% se conserva y el 31% está degradado. Los usos de suelo intervenido: Arado (0.8%), pasto (25.3) y potrero (1.4) figuran el 27.5% del total de la microcuenca. Finalmente, el bosque nativo y pasto reforestado tienen un porcentaje de 5.7% y 0.4% respectivamente.

Tabla 3. Coberturas de la Microcuenca Yutujapina en hectáreas

Cobertura		Código	Área en hectáreas	
Bosque Nativo		Y-BN	2.0	
Pajonal	Pajonal Conservado	Y- PajCon	12.7	23.8
	Pajonal Degradado	Y- PajDeg	11.1	
Pasto Reforestado		Y-PasRef	0.1	
Intervenido	Arado	Int_Ara	0.3	9.8
	Pasto	Int_Pas	9.0	
	Potrero	Int_Pot	0.5	
Total			35.7	

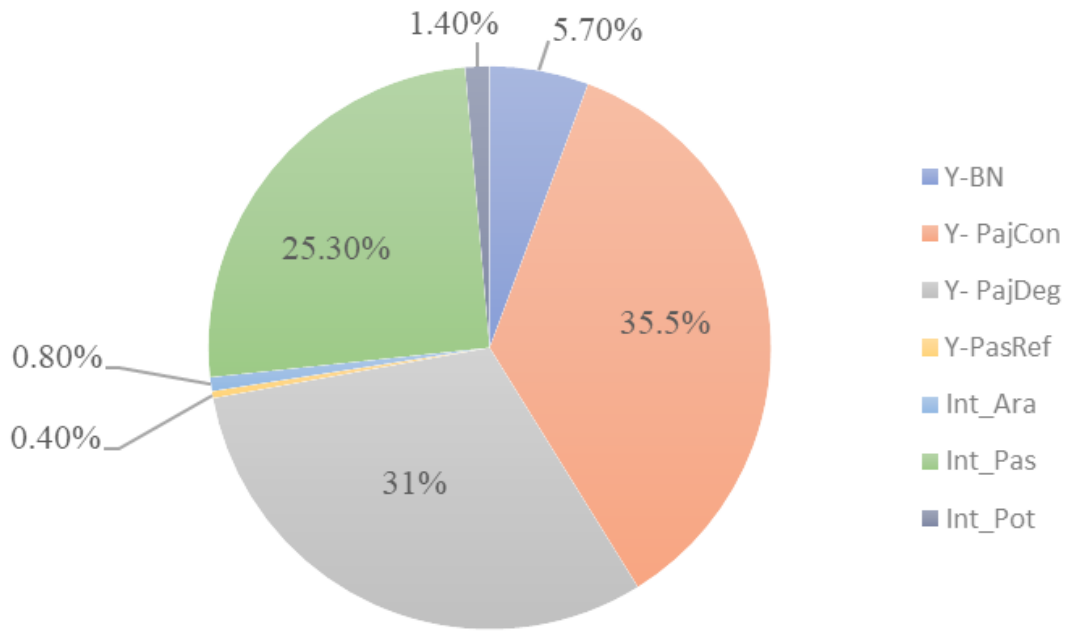


Figura 16. *Porcentajes de Uso de Suelo Microcuenca Yutuajapina*

Por otra parte, el área total de la microcuenca Lluchucarrumi es de 41.3 hectáreas. La Tabla 4 indica los valores del área por cada uso de suelo. Aquí el pajonal conservado es la superficie con mayor área, con un total de 22.6 hectáreas, seguido por bosque nativo con una superficie de 11.3 hectáreas. Luego tenemos el pasto, con un total de 7.2 hectáreas; dentro de esta cobertura, 5.9 hectáreas se encuentran en recuperación pasiva y 1.3 están degradadas. Finalmente, el bosque de pino es el suelo con menor superficie, con 0.2 hectáreas.

En cuanto a los valores porcentuales por uso de suelo de Lluchucarrumi expuestos en la figura 17, se observa que el pajonal conservado representa el 54.7% de la microcuenca y el bosque nativo un 27.3%. Por su parte, el pasto compone un total de 17.4%; aquí el 14.2% corresponde al pasto en recuperación (L- PasRec) y el 3.2% al pasto degradado (L-PasDeg). Por último, el bosque de pino (L-BP), especie introducida, constituye un 0.7% de la microcuenca.

Tabla 4. Coberturas de la Microcuenca Lluchucarrumi en hectáreas

Cobertura		Código	Área en hectáreas	
Bosque Nativo		L-BN	11.3	
Pajonal Conservado		L- PajCon	22.6	
Pasto	En Recuperación	L- PasRec	5.9	7.2
	Degradado	L-PasDeg	1.3	
Bosque de Pino		L-BP	0.2	
Total			41.3	

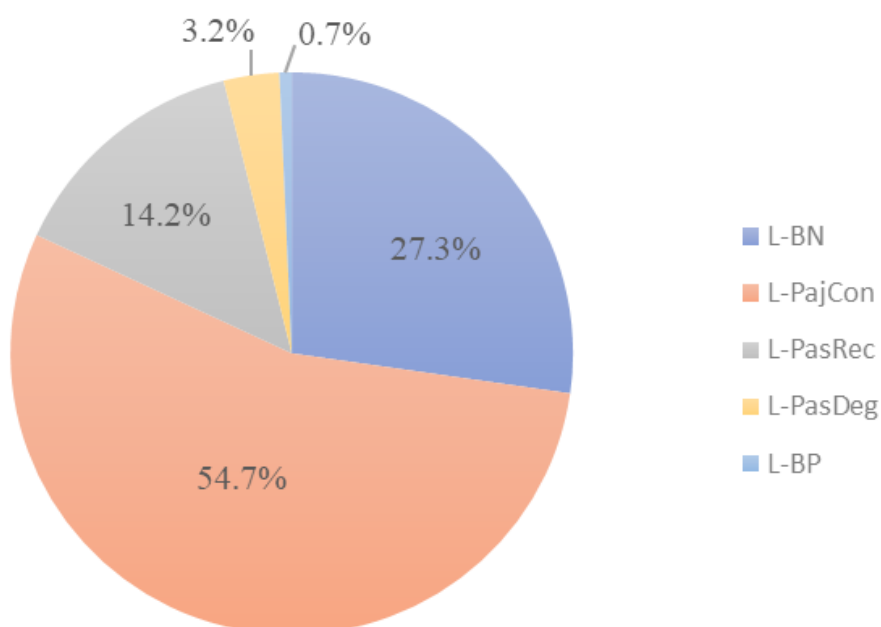


Figura 17. Porcentajes de Uso de Suelo Microcuenca Lluchucarrumi

Continuando con lo expuesto, se puede señalar que las áreas de las microcuencas son similares, tienen una diferencia mínima de 5.6 ha (la microcuenca Lluchucarrumi tiene mayor superficie). También vemos que las microcuencas estudiadas comparten semejantes tipos de coberturas vegetales, tales como el pajonal, bosque nativo y pasto, no así el bosque de pino, esta cobertura está presente solo en Lluchucarrumi. Por último, de acuerdo a los resultados obtenidos en las figuras 16 y 17, se evidencia la degradación en la

microcuenca Yutujapina por cambio de uso de suelo agropecuario. Tomando en cuenta las coberturas con intervención (pajonal degradado, arado, pasto, potreros), se determina que el 58.5% del total de la microcuenca es un área antropizada; aquí el pajonal es el tipo de cobertura más degradada. No obstante, la microcuenca Lluchucarrumi tiene apenas un 3.2% de degradación y el pajonal es el área que presenta mayor conservación.

Es importante tomar en cuenta que más de la mitad de Yutujapina está degradada, esto podría reflejar un posible problema, pues estudios aseguran que los servicios ecosistémicos son óptimos o no, de acuerdo al grado de conservación de la vegetación natural del páramo (García et al., 2019). El grado de conservación y deterioro en las microcuencas estudiadas debía esperarse, pues Yutujapina evidencia intervención, mientras que Lluchucarrumi está en proceso de recuperación pasiva, resultado que se puede evidenciar con el levantamiento de información cartográfica.

El levantamiento de información geográfica también muestra una pérdida de coberturas naturales de páramo. Gran parte de la vegetación natural de la microcuenca Yutujapina (20.9 hectáreas) ha cambiado por procesos agrícolas (arado) y pecuarios (pastos, potreros). Varias investigaciones coinciden que el deterioro en zonas de páramo se produce por la expansión de las actividades antropogénicas, como se observa en Yutujapina (Morales et al., 2016). Más específico, en el estudio de García et al. (2019), menciona que estos ecosistemas pierden superficie por la intervención de los habitantes del páramo y que es poco preciso suponer que las consecuencias son de bajo impacto. Además, investigaciones afirman que la producción agrícola supone la eliminación de vegetación nativa y que las propiedades favorables del suelo para cultivo perduran por un lapso de 3 a 4 años. Luego de este periodo, la reubicación de estas áreas para cultivo es la alternativa y como resultado, una expansión cada vez mayor (Patiño et al., 2021). Aquellas áreas abandonadas posteriormente suelen ser usadas para actividades ganaderas.

4.2 Análisis de las propiedades químicas e hidrofísicas del suelo

Se recurrió al uso de una línea base (plasmada en los gráficos de barras) proveniente de tres casos de estudios (Quichimbo et al., 2012; Plaza, 2018; Ramírez, 2011), con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en la presente investigación y presentarlos de manera idónea. Es importante mencionar que estos casos comparten objetivos y metodologías similares a este estudio, donde también se evalúan propiedades físicas, químicas e hidrofísicas en coberturas de suelo mencionadas en este escrito. Para representar los resultados se utilizaron diagramas de barras, a fin de indicar las variables estudiadas

respecto a los valores de la línea base. El gráfico tiene el objetivo de evidenciar aumento o reducción, expresado en porcentaje respecto a cada variable analizada.

Los valores de referencia utilizados para cada variable: pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico total, densidad aparente y conductividad hidráulica saturada, se presentan en el anexo A y los datos obtenidos en esta investigación en el anexo B.

4.2.1 Propiedades químicas del suelo

4.2.1.1 pH

La figura 18 evidencia disimilitudes entre los resultados de pH obtenidos, tanto entre coberturas, como con su línea base. El pH de los suelos bosque nativo de Lluchucarrumi (4.21), pajonal conservado (5.03), arado (4.77) y bosque de pino (4.16), son las coberturas que muestran mayores diferencias comparadas con los demás usos de suelo. El valor más alto de pH corresponde a la cobertura pajonal conservado de Lluchucarrumi, mientras que la cobertura bosque de pino tiene el pH más bajo. Por otro lado, en el bosque nativo de Yutujapina (4.83) las diferentes coberturas de pasto (4.45, 4.53 y 4.72) y pajonal degradado (4.63) presentan resultados de pH similares. La cobertura de pajonal conservado de Lluchucarrumi es la única que se clasifica con un pH ácido, los demás usos de suelo entran en la clasificación de pH muy ácidos, de acuerdo a la clasificación facilitada por los laboratorios de Suelo y Agua de la Estación Experimental del Austro (EEA) del INIAP. Los resultados de pH obtenidos en la presente investigación se encuentran dentro del rango expuesto en Llambí et al. (2012) y Ortiz et al. (2005), los cuales mencionan que es común hallar valores de pH entre 3.9 y 5.8 al sur del Ecuador.

La figura 18 también muestra que el pH calculado de todos los usos de suelo está cercano a su respectivo valor de referencia. Por una parte, las coberturas de pasto en recuperación, pajonal conservado y bosque de pino, sobrepasan su línea base, mientras que las demás coberturas tienen valores inferiores a la misma. La cobertura de bosque nativo de ambas microcuencas es la que más se aleja de su línea base (5.62) con una diferencia del 14% y 25% por debajo de la misma. Le sigue el pajonal degradado con una diferencia del 6% de su valor referencial de 4.9. La diferencia en el suelo pasto reforestado y pasto degradado respecto a su línea base no supera el 4%.

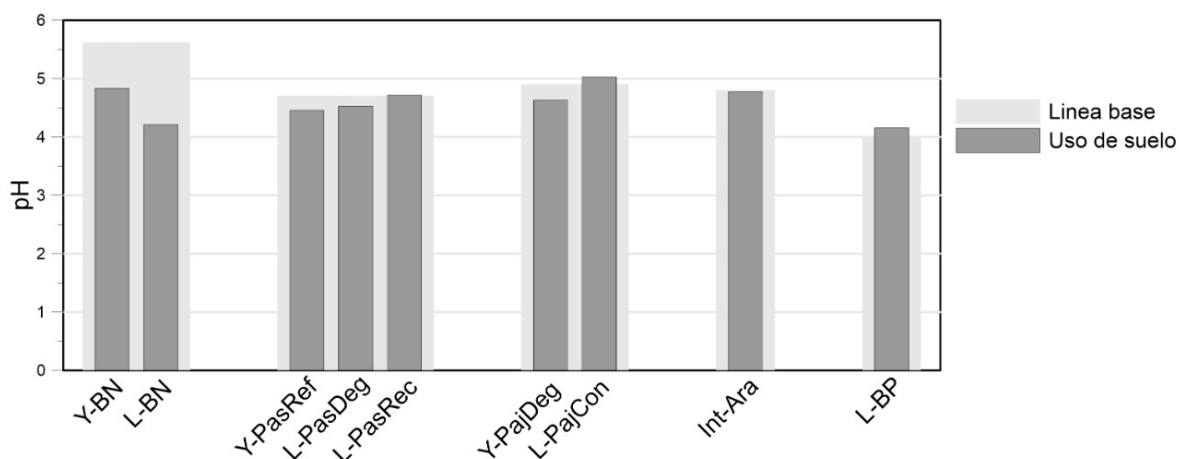


Figura 18. Valores de pH para cada uso de suelo

De acuerdo a revisión bibliográfica, la variación del pH entre coberturas y respecto a su línea base, puede ser provocada por factores como la pérdida de cationes básicos (K^+ , Mg^+ , Ca^+), suceso que contribuye a la acidificación de los suelos (Cárdenas, 2015). Esta relación entre el pH y los cationes se puede observar de manera clara en el estudio de Plaza (2018) y Ramírez (2011), donde se demuestra que los cationes de K y Al evidencian una alta correlación con el pH. A su vez, esta concentración de cationes puede variar debido a la extracción continua de nutrientes, ya sea por los cultivos o por los mismos procesos de fijación por parte de los complejos órgano-minerales de los suelos andosoles o por pérdidas provocadas por la acción del drenaje y la permeabilidad (Avellaneda et al., 2018). Otro factor que se involucra en la variación del pH en suelos de páramo es la presencia en grandes proporciones de materia orgánica. Los grupos carboxílicos y fenólicos de la materia orgánica se comportan como ácidos débiles que contribuyen en la disminución del pH en el suelo (Martínez et al., 2008).

En los resultados vemos que el valor del pH en la cobertura bosque nativo es inferior en Lluchucarrumi (en proceso de recuperación pasiva) comparado con Yutujapina. Esto puede darse debido a que la extracción y fijación continua de nutrientes es mayor en Lluchucarrumi. Esta interpretación tiene sentido cuando vemos la información obtenida en el estudio del levantamiento de información geográfica (ver tabla 3, tabla 4), donde el área del bosque nativo en Lluchucarrumi es considerablemente mayor (11,3 hectáreas) a Yutujapina (2 hectáreas). Es decir, la demanda de micronutrientes (cationes) en Lluchucarrumi es mayor y como veíamos anteriormente, la concentración de estos elementos influye de manera directa en el valor del pH. También se observa que el pajonal conservado presenta el pH más alto. Estudios (Quichimbo et al., 2012, Mecerí et al., 2014, Cárdenas, 2015) mencionan que los suelos no intervenidos pueden presentar valores de pH elevados, por

ejemplo, en suelos montano alto al sur del Ecuador encontraron valores de pH iguales a 5.30 y 5.80 en suelos de páramo sin intervención.

Por otra parte, el pH obtenido en el uso de suelo arado también es alto, incluso es superior al bosque nativo de Lluchucarrumi. Cuando se cambia una zona natural de páramo por agricultura, las características propias de estos suelos se ven afectadas. La cobertura arado es una zona que evidencia cambio de uso de suelo, por lo que el valor calculado del pH estaría mostrando alteraciones en la matriz del suelo a causa de la intervención antrópica. En suelos arados, la materia orgánica es una de las principales carencias que provoca el paso del tiempo, esta deficiencia hace que el agricultor recurra a un aporte extra de este componente, por lo que la utilización de excremento de vacas y caballos se hace evidente. Según Martínez et al. (2008) y Cárdenas (2015), esta adición de materia orgánica aumenta el pH como consecuencia del N contenido en las excretas. Estudios determinaron que existe una tendencia decreciente del pH con el paso del tiempo en suelos sometidos a fertilizantes (Suin, 2014). Por otra parte, los valores más ácidos de pH en este estudio se presentan en la cobertura bosque de pino. Este resultado va de acuerdo a investigaciones, que aseguran que las coníferas promueven la acidificación de los suelos, provocado por la disminución del porcentaje saturado de las bases (Quichimbo et al., 2012).

Como vemos en el estudio, el valor del pH puede estar influenciado por características específicas (materia orgánica, cationes, intervención, etc.) de cada zona de estudio, éstas influyen de manera indirecta o directa en los valores de pH. Los resultados de pH obtenidos muestran una posible alteración de este parámetro por cambios de uso de suelo.

4.2.1.2 Materia orgánica (MO)

En la figura 19 se presentan los valores obtenidos de materia orgánica en porcentaje (%). Los suelos de pajonal conservado y pasto recuperado tienen valores de MO similares (22.92%, 22.69%) además, son las coberturas que presentan mayor porcentaje. Por el contrario, la menor cantidad de MO se mostró en el bosque de pino y el pasto degradado (15.34%, 10.8%). Los resultados de MO en los usos de suelo pasto reforestado, arado, pajonal degradado y bosque nativo (ambas microcuencas) fueron: 19.05%, 18.14%, 17.43%, 17.42%, 17.21%. Todos los usos de suelo analizados se clasifican con un contenido de materia orgánica alto. Esto, según rangos de referencia bajo (<3), medio (3 a 5) y alto (>5), proporcionados por la Estación Experimental del Austro del INIAP.

En la figura 19 también se puede apreciar que los valores de MO difieren del valor de referencia y que, a excepción del arado, todos son inferiores. Los valores que más se alejan

de su línea base son el bosque de pino con 66%, pasto degradado con 63% y bosque nativo con 55% (Lluchucarrumi) y 54% (Yutujapina).

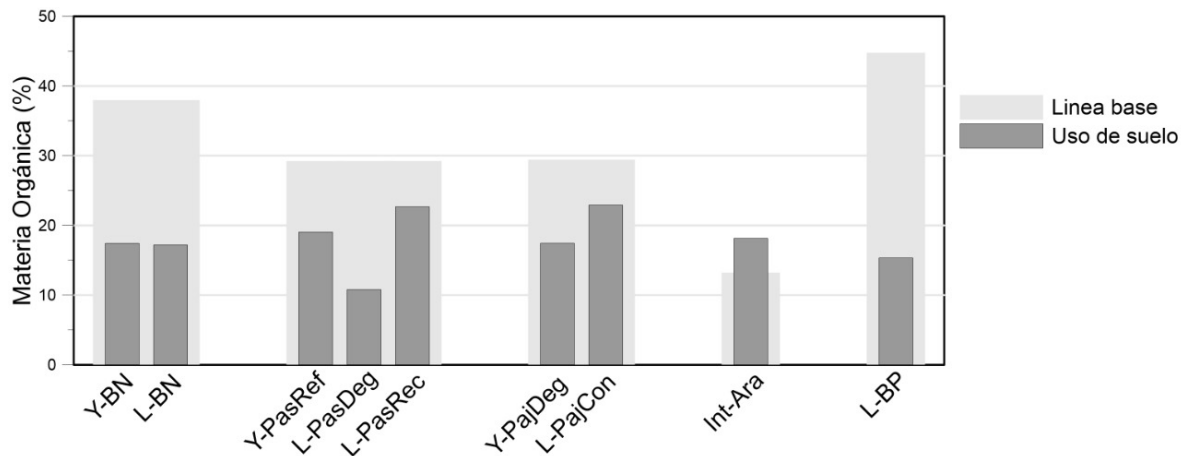


Figura 19. Valores de Materia Orgánica de cada uso de suelo

Como se observa entre usos de suelo y la línea base, el porcentaje de MO varía. Esta alteración se le puede atribuir a procesos antrópicos como la ganadería, labranza, regímenes de fertilización y rastrojos que se dejan en el suelo luego de las cosechas. Estas acciones influyen en dicho contenido, aunque de manera momentánea (Estupiñán et al., 2009; Camacho, 2014; De Bièvre et al., 2014). Estudios sugieren que luego de estos eventos se produce una acelerada caída en el contenido de este parámetro (Sainz et al., 2018). El uso de suelo arado cuenta con un contenido de materia orgánica similar a la cobertura bosque nativo, esta semejanza podría estar explicada por el enunciado anteriormente citado. Sarmiento et al. (2022) indica que los sistemas de laboreo generan impactos en los porcentajes de materia orgánica.

Cuando se voltea el suelo, el principal impacto que produce es la degradación irreversible de la estructura del mismo (Pérez et al., 2022), se interrumpe el efecto mutuo del agua y la materia orgánica, provocando una reducción en la humedad del suelo, lo que acelera la descomposición de la MO y, por consiguiente, su disminución. Esto explicaría el bajo contenido de materia orgánica del pasto degradado de Lluchucarrumi. La variación de los resultados de la cobertura de pasto recuperado y pajonal conservado, respecto a las demás coberturas estudiadas, puede deberse a la relación de la MO con ciertas variables. Según Mora et al. (2012), este parámetro se relaciona y varía con el pH, siendo ácido en donde la MO es alta. Se puede apreciar que este criterio se cumple, sin embargo, si se analiza por uso de suelo, se puede inferir que los valores inferiores de materia orgánica corresponden a los resultados de pH más bajos (ver anexo B). Estos resultados en cambio, van conforme a

Liebig et al. (2002), quienes citan que la pérdida de materia orgánica y la acidificación del suelo en el páramo se asocian a los impactos de la ganadería y la agricultura.

En cuanto al uso de suelo bosque de pino, es la cobertura que presenta el menor contenido de MO. En la investigación realizada por Mancheno (2011) se señala que las especies de pino presentan una cantidad de materia orgánica menor en comparación con la vegetación endémica del páramo. Este tipo de vegetación consume grandes cantidades de agua, reduce el rendimiento hídrico y, como resultado, seca eventualmente el suelo, provocando una rápida descomposición de la MO que no se compensa con la adición de nuevo sustrato orgánico.

4.2.1.3 Nitrógeno (N)

La figura 20 muestra los resultados de los análisis de concentración de N expresados en porcentaje. Los valores varían entre usos de suelo y su línea base. Las coberturas con mayor concentración de N fueron pasto en recuperación (1.5%), pajonal conservado (1.14%) y arado (1.1%). El suelo de pasto degradado y bosque de pino expone los niveles de N más bajos con 0.6% y 0.76%. Las coberturas de pajonal degradado, bosque nativo (ambas microcuencas), y pasto reforestado muestran valores similares de N (0.88%, 0.87%, 0.86%, 0.8%). De acuerdo a los valores expuestos, el porcentaje de N en todos los usos de suelo estudiados, son categorizados como extremadamente ricos puesto que los valores son superiores a 0.221%, esto de acuerdo a la clasificación de los laboratorios de Análisis de Suelos de la Universidad de Cuenca.

Comparando los resultados del estudio con su respectiva línea base, tenemos que el bosque nativo, tanto de Yutujapina como Lluchucarrumi y el bosque de pino, son las coberturas que más se alejan de sus valores referenciales de 1.89% y 1.62%. Estas coberturas se encuentran un 54% y 53% por debajo de su respectiva línea base. Por el contrario, la cobertura arado sobrepasa un 50% el valor referencial de 0.55%. Las coberturas pasto reforestado, degradado y pajonal degradado se aleja de su línea base, aunque no de manera considerable.

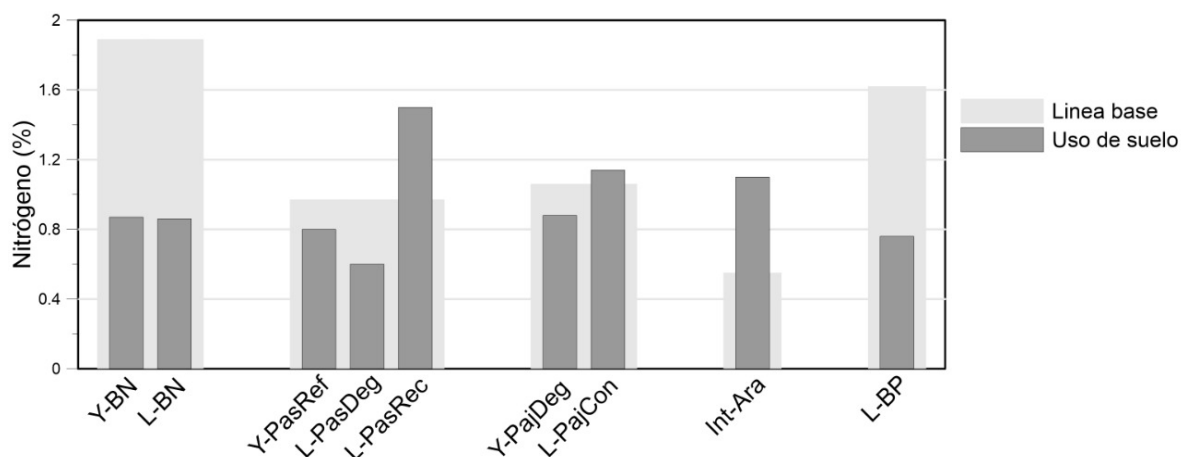


Figura 20. Valores de Nitrógeno por uso de suelo

Estupiñán et al. (2009) menciona que los resultados de N más altos generalmente se suelen registrar en zonas con intervenciones cuyos valores de N oscilan entre 0.87% y 1.09%. En el presente estudio, los porcentajes de N de las coberturas intervenidas (pajonal degradado y arado) están cercanos al rango de los valores mencionados. Sin embargo, el uso de suelo pasto en recuperación y pajonal conservado (áreas sin intervención) muestran valores de N superiores al resto de coberturas analizadas. Este resultado se sustenta en que las áreas de páramo sin vegetación nativa y con uso agrícola, pueden presentar concentraciones de N menores que en áreas con cobertura natural, puesto que la exportación del N a través de la escorrentía superficial es más intensa (Merecí et., al 2014).

La figura 20 también evidencia que los valores de ciertas coberturas difieren en mayor proporción respecto a su línea base. Estas diferencias se pueden atribuir a la variación del contenido de MO, ya que el 99% de N se encuentra en la capa orgánica (Merecí et al., 2014). En el estudio de Ramírez (2011) coincide que los porcentajes de MO (ver Anexo A) son superiores al presente estudio. Por ejemplo, la cobertura bosque de pino presenta un porcentaje de MO de 44.75% y N de 1.62%, mientras que, en esta investigación, el porcentaje de MO en la misma cobertura fue de 15.35% y el N 0.76%, resultados muy similares a Cárdenas (2014). Por tanto, sería conveniente suponer que la cantidad de MO de cada uso de suelo influye en los resultados de N, puesto que los valores obtenidos demuestran que el porcentaje de N es mayor en las coberturas cuyos porcentajes de MO también son mayores.

Sin embargo, la relación del N con la MO no se cumple en el uso de suelo arado; aquí, el contenido de materia orgánica es menor, sin embargo, el porcentaje de nitrógeno es uno de los más altos. Según investigaciones, esto puede darse por el aporte de insumos externos (orgánicos e inorgánicos) en suelos agrícolas. Cotrina et al. (2020), determinaron que las

concentraciones de N aumentaron con la aplicación de abonos de tipo orgánico (gallinaza); estos contienen una elevada concentración de macro y micronutrientes, en especial de N. El problema del uso de abonos por parte de los propietarios radica en que son aplicados sin previo análisis técnico, lo que significa un problema para la salud de los suelos. De acuerdo a investigaciones (López et al., 2012; González et al., 1996), se muestra que los altos contenidos de N no necesariamente proporcionan grandes cantidades de N asimilable para las plantas. Por el contrario, el aporte de N puede ocasionar una repercusión sobre la dinámica de la MO debido a que, generalmente, los abonos orgánicos muestran un aporte extra de microorganismos y, por ende, alteraciones en los procesos de mineralización y fijación de este nutriente al suelo (López et al., 2012).

El cambio de la estructura microbiana en suelos de páramo compromete la disponibilidad de nitrógeno. La variación de N influye en la composición de las comunidades microbianas y a su vez, en la regulación del ciclo de nutrientes (Avellaneda et al., 2018). Investigaciones han evidenciado que hay mayor proporción de microorganismos oligotróficos en suelos no intervenidos, estos tienen tasas de crecimiento lentas y prevalecen en condiciones de baja disponibilidad de nutrientes. Es decir que, por sus características y condiciones, la concentración de N será mayor. Mientras que, en suelos intervenidos agrícolamente, los microorganismos copiotróficos están en proporciones mayores. Estos tienen altos requerimientos nutricionales y altas tasas de crecimiento, por lo que los niveles de nitrógeno son consumidos en mayor cantidad (Álvarez et al., 2017).

Referente al suelo bosque de pino, el porcentaje de N en esta cobertura es uno de los resultados más bajos. La disminución del N en las coníferas puede resultar por la acidificación de estos suelos. Según Arteaga et al. (2016) el pH de los suelos bajo pino es muy ácido, en esta investigación, el suelo bosque de pino obtuvo el nivel de pH más bajo (ver figura 18). Por lo tanto, sería acertado atribuir que el pH muy ácido causado por el cambio de cobertura natural provocó que los niveles de N (comparado con las demás coberturas analizadas) disminuyeran. También se ha visto que las concentraciones de N disminuyen de acuerdo a los años de las coníferas; los porcentajes de N fueron drásticamente inferiores en rodales de pino de 15 a 20 y de 20 a 25 años (Farley, 2004). Posiblemente, la edad de las coníferas en el estudio sea superior a 15 años, por lo que también los niveles de N se ven reducidos.

4.2.1.4 Fósforo (P)

En la figura 21 se presentan los valores obtenidos de fósforo para cada uso de suelo en partes por millón (ppm). El pajonal degradado, junto al arado y el bosque nativo de la

microcuenca alterada, poseen valores cercanos entre sí y superiores al resto (8.58, 8.18 y 8.07 ppm respectivamente). El menor contenido de fósforo se presenta en la cobertura de pasto en recuperación con 4.14 ppm. Los valores de pasto degradado y reforestado son 7.49 y 7.02 ppm, seguido por el bosque nativo de la microcuenca Lluchucarrumi con 6.87 ppm. Por último, el pajonal conservado y bosque de pino obtuvieron resultados de 5.88 y 5.63 ppm. De acuerdo a los criterios de clasificación utilizados por la INIAP, los diferentes usos de suelo se clasifican con un contenido de fósforo bajo (<10 ppm).

Con respecto a la línea base, se puede observar en la figura 21 que el bosque nativo de ambas microcuencas presenta diferencias considerables con el valor referencial, ya que son menores en un 54% y 61%. El pasto reforestado y degradado son mayores un 36% y 45%, pero el pasto en recuperación y el pajonal conservado son menores al valor de la línea base en un 20% y 29%. Finalmente, el uso de suelo arado sobrepasa notablemente (43%) al valor referencial.

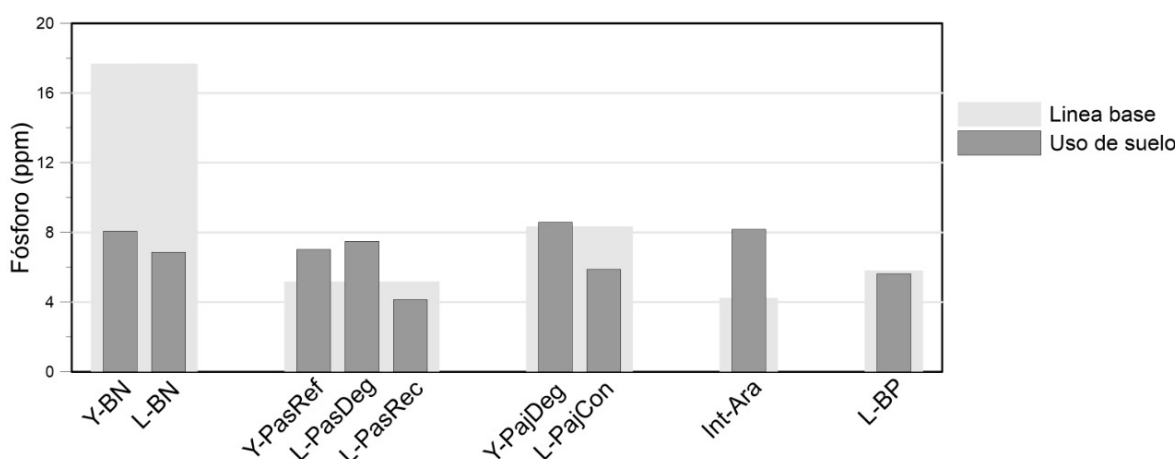


Figura 21. Valores de Fósforo por uso de suelo

Los suelos tienen una alta capacidad de fijación de fósforo cuando son formados a partir de cenizas volcánicas. Esta elevada retención se explica por características propias de los suelos de páramos, como el contenido de alófanos, la acidez del suelo y la presencia de materia orgánica (material fijador de este elemento) (González, 2016; FAO, 2002).

A pesar de que Farley et al. (2004) señalan la limitada influencia que tiene el cambio de vegetación en el contenido de fósforo y que los valores en este estudio varían ligeramente entre cada uso de suelo (como se puede observar en la figura 21, anexo B), se puede deducir que el contenido de fósforo presente en las zonas intervenidas (pasto degradado, pajonal degradado y arado) es mayor a diferencia de las áreas no intervenidas (pajonal conservado, pasto en recuperación). Las deficiencias de este elemento en suelos agrícolas

hacen que se lleve a cabo la aplicación de fertilizantes, tanto orgánicos como inorgánicos, con el objetivo de aportar nutrientes primarios, como en este caso, el fósforo, resultando en valores más elevados de este parámetro. Los valores bajos de fósforo en suelos de cobertura natural pueden ser provocados por los procesos nutricionales propios del suelo que tienen lugar en condiciones naturales y a los procesos de retención del ecosistema en los que participan los compuestos de aluminio y hierro, formando agregados insolubles en el suelo. Estas diferencias coinciden con los resultados que muestran Estupiñán et al. (2009) y Jaurixje et al. (2013) en sus respectivas investigaciones.

También influye en la acumulación de este nutriente la cantidad de material fijador o inmovilizador (materia orgánica), por lo que se espera, según González (2016), que la cantidad de fósforo disminuya a medida que aumenta la MO; esta relación sólo se puede observar en las coberturas estudiadas de pasto y pajonal. Este escenario también se presentó en una investigación llevada a cabo por el IGAC (1988) en páramos de Bogotá.

En los resultados obtenidos en este estudio también se puede observar que la concentración de fósforo es menor cuando los niveles de pH son altos (menos ácido), por el contrario, donde es mayor el contenido de P, el pH es más bajo. Por tanto, estos resultados de fósforo en relación al pH, no van conforme a lo que menciona Soto (1961), que existe una mayor disponibilidad de este nutriente cuando aumenta el pH o, como señalan Besteiro et al. (2021), que dentro o cercano al rango de pH de 6.0 a 7.5 el fósforo se encuentra en formas más solubles o disponibles. Pero este criterio podría explicar la diferencia notable entre los contenidos de fósforo del bosque nativo de ambas microcuencas, existiendo una mayor disponibilidad de este elemento en donde el pH aumenta.

Respecto al bosque de pino, que posee uno de los menores contenidos de fósforo, esta masa forestal de crecimiento rápido y consumo hídrico alto, ejerce significativos cambios en el contenido de fósforo en el suelo (Graciano et al., 2006; Besteiro & Descalzo, 2021). Así mismo, Garay et al. (2006) mencionan que la introducción de esta especie exótica resulta en una disminución del nutriente en cuestión. Por tanto, el cambio de uso de suelo puede ser el responsable de la disminución de la concentración de P.

En cuanto al valor de referencia de P para bosque nativo tomado de Plaza (2018), que muestra una variación considerable respecto a los valores obtenidos en este estudio, se puede inferir que viene dada por una influencia de la MO y el pH. Estos valores se encuentran bastante alejados de los obtenidos en este estudio, razón por la cual la concentración de P puede estar variando.

4.2.1.5 Potasio (K)

En la figura 22 podemos observar los resultados obtenidos de K expresados en meq/100 g. Los resultados muestran variaciones entre coberturas y con su respectiva línea base. Los valores más altos de K pertenecen a las coberturas de bosque nativo de Yutujapina (0.67 meq/100g) y pajonal degradado (0.62 meq/100g). Las coberturas arado, pasto degradado y pajonal conservado tienen valores de K similares (0.51 meq/100g, 0.46 meq/100g, 0.46 meq/100 g). La concentración de K en el suelo pasto en recuperación fue la más baja con 0.26 meq/100g. Las coberturas de pasto reforestado, bosque de pino y bosque nativo de lluchucarrumi están cercanas a ese valor.

De acuerdo a los valores referenciales reportados por la EEA del INIAP, las coberturas bosque nativo de Yutujapina, pasto degradado, pajonal degradado, pajonal conservado y arado se clasifican con un alto contenido de potasio. Mientras que las coberturas de bosque nativo de Lluchucarrumi, pasto reforestado, pasto en recuperación y bosque de pino tienen concentraciones de potasio clasificadas como medio. Las concentraciones medias y altas de K, obtenidas en este estudio, son consistentes con los reportados en la investigación de Lahuatte et al. (2015).

La figura 22 también muestra que todos los valores de K en el estudio, a excepción de la cobertura bosque nativo, sobrepasan el valor de referencia. Los usos de suelo que más se alejan de su línea base, es el bosque nativo de Lluchucarrumi con un 77% y pajonal degradado con 68%. En cuanto al uso de suelo pasto, la línea base utilizada fue de 0.2 meq/100g, dentro de esta cobertura, se observa que el pasto degradado presenta mayor cantidad de K en relación con el pasto reforestado y pasto en recuperación, sobrepasando la línea base en un 57%, 35% y 23% respectivamente. En el suelo arado, el valor de K obtenido es superior a la línea base (0.32 meq/100) con un 37% de diferencia. Finalmente, en la cobertura bosque de pino, el K calculado es un 23% superior al valor de referencia (0.27 meq/100 g).

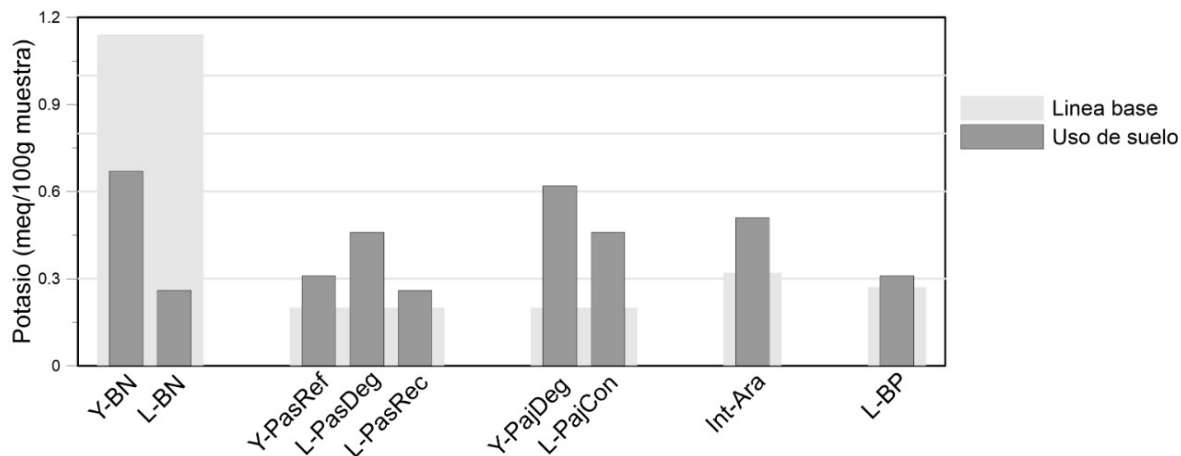


Figura 22. Valores de Potasio por uso de suelo

Los resultados de K calculados en las coberturas de bosque nativo (0.67 y 0.26) son lejanos entre sí a pesar de que se trata del mismo tipo de cobertura. Sin embargo, estos resultados coinciden con los reportados por otras investigaciones, donde los valores de K fluctúan entre 0.25 meq/100g y 0.7 meq/100g (Cárdenas, 2015; Chacón et al., 2009). La desigualdad en los resultados encontrados podría atribuirse al consumo de nutrientes por parte de la vegetación para su desarrollo; recordemos que la superficie de la cobertura bosque nativo de Lluchucarrumi es considerablemente mayor a Yutujapina. No obstante, hay que tener presente que la disminución abrupta de la concentración de nutrientes en las coberturas, también puede estar asociada a una pérdida por lixiviación, volatilización y precipitación (Lahuatte et al., 2015).

La posible causa de la diferenciación de K entre las coberturas y su línea base puede ser provocada por la agricultura. Se reconoce que el acondicionamiento de suelos de páramo para la agricultura, como el encalado y el uso de fertilizantes químicos (cloruro de potasio) y orgánicos como la gallinaza, tiene efectos directos sobre los niveles de concentración de K (Maruri, 2000). Este suceso ocurre por el desplazamiento de radicales como el K que, al intercambiarse por iones de hidrógeno o aluminio, provocan acidez. Elevados grados de acidez originan niveles bajos de potasio en el suelo (Arteaga et al., 2016). Es decir, otro factor que contribuye a la variación del potasio es el pH. En los resultados de esta investigación, las coberturas con menor concentración de K fueron: bosque nativo (Lluchucarrumi), pasto en recuperación, pasto reforestado y bosque de pino; todos estos coinciden con niveles de pH bajos (ácidos) (anexo B). Por el contrario, los niveles de K en la cobertura arado fueron altos; una de las posibles causas de este resultado puede ser el aporte directo de algún tipo de fertilizante en el suelo. Estudios sugieren que los niveles de

K en suelos sujetos a fertilizantes tienden a duplicarse después del aporte continuo (Hernando et al., 2009).

Vemos que la concentración de potasio en el suelo puede variar como consecuencia de la aplicación de fertilizantes, así como por su correlación con otras variables, como es el caso del pH. Por tanto, al existir ciertos parámetros que influyen de manera directa o indirecta en los valores de ciertas variables, sería conveniente suponer que, a pesar de que sean las mismas coberturas y similares zonas de estudio, los resultados cambian de un lugar a otro. Esto se debe principalmente a que la intervención antrópica no es similar en todas las zonas, pues varían respecto al tiempo, espacio, tipo, modo de cultivo y cantidad de fertilizante (Hernando et al., 2009).

4.2.1.6 Capacidad de intercambio catiónico total (CIC)

En la figura 23 se muestran los valores obtenidos de CIC total en meq/100g de muestra para cada uso de suelo. El bosque nativo de Lluchucarrumi presenta el mayor resultado de CIC (71.40 meq/100g). Las coberturas de bosque nativo de Yutujapina (58.60 meq/100g) y pasto en recuperación (54.6 meq/100g), son los que presentan más disimilitudes respecto al resto de coberturas. Los resultados para arado, pajonal degradado, pasto reforestado, bosque de pino, pajonal conservado, fueron los siguientes: 68.6 meq/100g, 67.80 meq/100g, 65 meq/100g, 63.40 meq/100g, 61 meq/100g, 60.8 meq/100g. De acuerdo a estos resultados y a la clasificación utilizada por el Laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad de Cuenca, todos los usos de suelos se clasifican con un nivel alto de CIC (>45 meq/100), indicando una elevada capacidad para retener e intercambiar cationes, así como alta cantidad y disponibilidad de nutrientes, siendo por tanto muy ricos o fértiles (Garrido, 1993).

Al relacionar cada uso de suelo y su respectiva línea base, que se pueden contemplar en la figura 23, se puede observar que casi todos los usos de suelo son mayores a la línea base, excepto el pasto en recuperación y el bosque de pino. La cobertura que más se aleja de su valor referencial es el bosque nativo de ambas microcuencas, es menor en un 71% y 76%. Los suelos de pasto reforestado y pasto degradado y pasto en recuperación, son superiores al referencial en un 14%, 6 %, y 5%. En cuanto al pajonal, tanto el degradado como el conservado, son visiblemente mayores (42% y 36%) a su línea base. El uso de suelo arado es superior al referencial y difiere con éste en un 53%. En cambio, el bosque de pino es inferior en un 25% a la línea base.

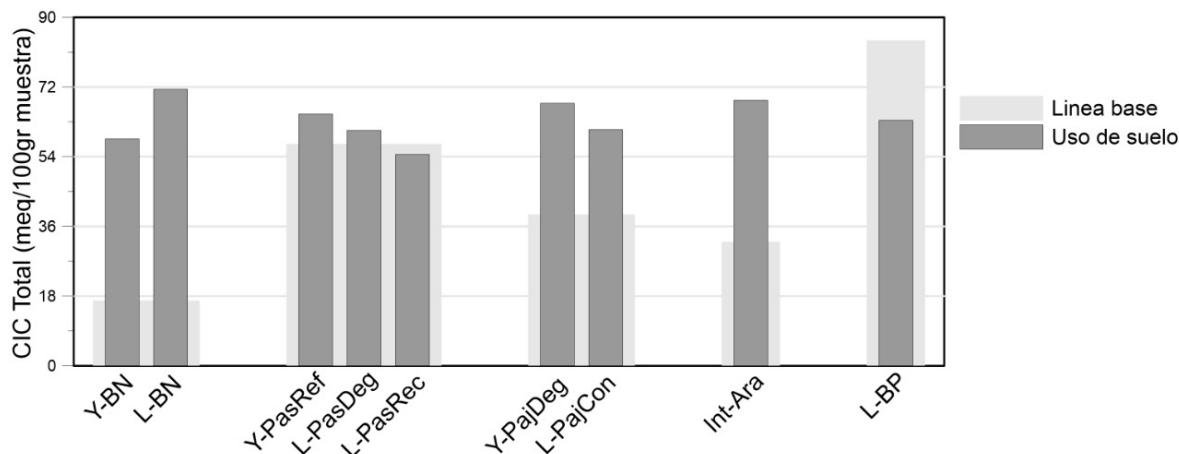


Figura 23. Valores de CIC total por uso de suelo

Según los resultados previamente expuestos, la CIC es alta, tal como señala Guerrero (1974), que indica que los andosoles poseen esta elevada capacidad de intercambio debido a dos características que tienen influencia sobre esta propiedad, el contenido de humus y el alofán, este último es una arcilla que predomina en los suelos derivados de cenizas volcánicas. Al ser suelos alofánicos, pueden ser dependientes o permanentes del pH del suelo (Podwojewski & Poulenard, 2000; Van, 1997; Cruz et al., 2020). En específico, Cerón et al. (2009) señalan que probablemente los contenidos más altos de la CIC estén asociados con un pH más ácido. En cambio, el contenido de materia orgánica usualmente proporciona más sitios de intercambio, por lo que, a medida que aumenta en el suelo, así mismo aumentará la CIC (Cárdenas, 2015; Alvarado, 2008; Abrego, 2012; Venlasaga & Flores, 2021).

Si bien al observar la figura 23, los valores de CIC visualmente no varían de forma considerable entre los diferentes usos de suelo, al analizar estos de manera independiente y detallada, se puede inferir cómo las coberturas que tienen los mayores valores de CIC (pasto reforestado, pasto degradado, pajonal degradado, bosque de pino y arado) tienen contenidos de materia orgánica más bajos y un pH más ácido (4.45, 4.53, 4.63, 4.16 respectivamente). En cambio, los valores menores de CIC, pero con mayor materia orgánica, les pertenecen a las coberturas que las actividades del hombre no las ha influenciado en gran medida, como el pasto en recuperación y el pajonal conservado, los cuales tienen un pH menos ácido (4.72, 5.03 en el orden dado). Por tanto, se presenta una asociación directa entre la CIC y un pH más ácido, cumpliéndose uno de los criterios anteriormente descritos, y una relación inversa entre la CIC y la materia orgánica que no se justifica, ya que generalmente las mismas actividades antropogénicas que destruyen la materia orgánica, disminuyen así mismo la CIC y viceversa (relación proporcional). No

obstante, Quichimbo et al., (2012) reporta en su estudio valores promedio más elevados de CIC en las coberturas antropizadas, haciendo principalmente alusión sus resultados a la influencia de las actividades del hombre y no al pH o la materia orgánica. A pesar de ello, también encontraron resultados no esperados, en una de las coberturas antropizadas se notó una disminución en la CIC, aunque existió un incremento del pH. Un punto a resaltar es que químicamente algunos suelos de páramo o los andosoles poseen propiedades de intercambio altamente variables (Podwojewski et al., 2000). De igual forma, es importante señalar que, de manera general, los resultados de CIC en todos los usos de suelo en esta investigación sí se pueden asociar con la MO de forma directa y con un pH más ácido, ya que se clasifican como altos, tanto la CIC como la MO, y todas coberturas se encuentran categorizados como “muy ácidos”.

Respecto al uso de suelo bosque nativo, el valor que es notablemente superior no le corresponde a la cobertura que presenta alteraciones de Yutujapina, como se mencionó previamente, si no al bosque nativo de la microcuenca que se encuentra en proceso de recuperación pasiva (Lluchucarrumi). Pero, de igual forma existe una relación inversa entre la CIC y la MO, y al resultado mayor de CIC le corresponde un pH más ácido.

Al comparar el valor de CIC de la línea base de bosque nativo tomado de Plaza (2018) y pajonal, de Quichimbo et al. (2012), los cuales difieren notablemente con respecto a los obtenidos en esta investigación, las diferencias se atribuyen al pH y al contenido de materia orgánica. Evidentemente, según revisión bibliográfica, así como al comparar los valores de las variables mencionadas, vemos que influyen en la CIC que presentan valores considerablemente inferiores a los obtenidos. Con relación al uso de suelo pasto de Ramírez (2011), respecto a los obtenidos, la CIC varía inversamente con la MO, más no con el pH. En cambio, en el uso de suelo arado y el bosque de pino (Ramírez, 2011), la CIC muestra una relación proporcional con la MO.

4.2.2 Propiedades hidrofísicas del suelo

4.2.2.1 Densidad aparente (DA)

En la figura 24 se muestran los valores obtenidos de DA en g/cm^3 para cada uso de suelo. En el bosque de pino se obtuvo un valor más alejado, respecto al resto de coberturas y además superior a estas (0.67 g/cm^3). Le sigue el arado con 0.61 g/cm^3 , y el pasto degradado (0.54 g/cm^3). En cambio, los siguientes usos, pasto reforestado, pajonal degradado y bosque nativo de Yutujapina, tienen valores iguales: 0.42 , 0.42 y 0.41 g/cm^3

respectivamente. Por último, el pajonal conservado tiene el resultado más inferior (0.37 g/cm^3).

La clasificación de los suelos en cuanto a la DA se registra en base a literatura que caracteriza a suelos de páramo, los cuales se distinguen por tener una DA baja. Ésta es una de las principales propiedades por las cuales se puede diferenciar a estos suelos de otros grupos (Cajilema et al., 2020). Los valores de DA en suelos de páramo generalmente se encuentran entre 0.4 g/cm^3 y 0.8 g/cm^3 (Antúñez et al. 2016). En esta investigación los resultados fueron de 0.37 g/cm^3 a 0.67 g/cm^3 , por tanto, van de acuerdo a lo citado. También se usa como referencia a los suelos minerales, los cuales por lo general tienen densidades entre 1.1 g/cm^3 y 1.8 g/cm^3 , difiriendo en gran medida con los suelos de páramo (PROMAS, 2009).

La figura 24 indica las diferencias entre los usos de suelo y su correspondiente línea base. Empezando por el bosque nativo de Yutujapina, donde el valor obtenido sobrepasa un 32% la línea base. Dentro de la cobertura de pasto, los resultados también fueron superiores en un 8% y 38%, para pasto reforestado y degradado respectivamente. Por el contrario, el pajonal degradado y pajonal conservado obtuvieron valores menores en un 2% y 14% al valor referencial. Así también, el uso de suelo arado es inferior en un 22%. Por último, el bosque de pino es mayor en un 49% al valor usado como referencia.

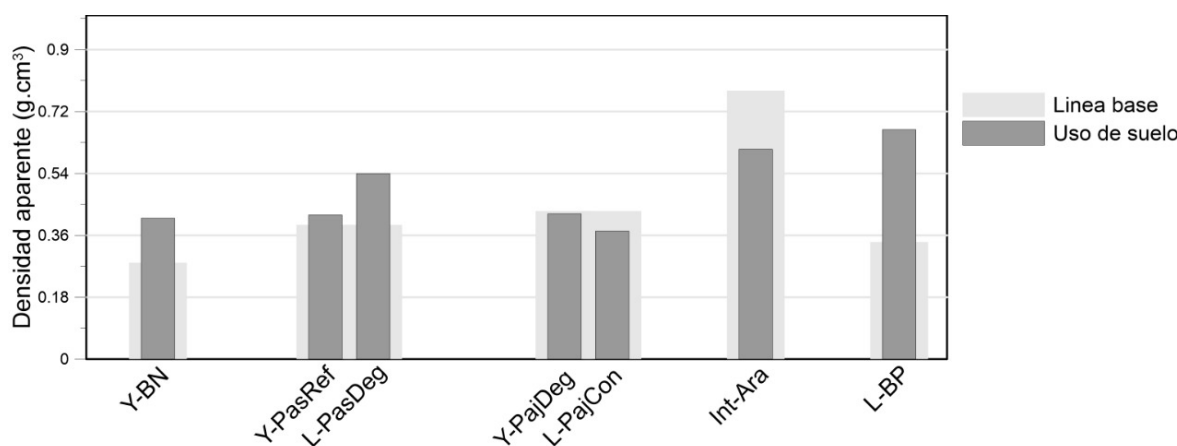


Figura 24. Valores de DA total por uso de suelo

Según revisión bibliográfica, se determina que la densidad aparente está influenciada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, que a su vez puede estar esencialmente determinado por el contenido de MO del suelo. Esta última incrementa la porosidad del suelo optimizando la aireación, ingreso y retención de agua. Es decir, la DA varía con el

contenido de materia orgánica (Rojas & Sáenz, 2012). En tanto que la MO y el espacio poroso aumentan, la DA se reduce, es decir, existe una relación inversa (Jiménez et al., 2005; Guamán, 2018). Esta relación inversa entre las variables se puede contemplar al comparar todos los resultados reportados en esta investigación; la DA disminuye cuando el contenido de MO aumenta y viceversa.

Los usos de suelo pasto degradado, pajonal degradado, arado y bosque de pino, presentan los valores más altos de DA comparado entre todos los usos de suelo estudiados. El cambio de uso de suelo puede estar ligado a este suceso, esta transformación de suelo ocasiona que se rompan los agregados característicos de zonas de páramo. Recordemos que las coberturas mencionadas muestran algún tipo de intervención, no son áreas prístinas. Esto se respalda con lo que manifiestan Cáceres (2017) y Rubio (2010), que los usos de suelo con intervención presentan resultados de DA mayores, ya que poseen un mayor grado de compactación, una aireación deficiente, menor porosidad y baja retención de humedad, como resultado de las alteraciones en la estructura del suelo.

Los valores más elevados de DA se observan en los suelos bosque de pino y arado. Es importante resaltar este resultado obtenido puesto que, en primer lugar, el cambio de cobertura natural por coníferas conlleva a que los suelos sean más propensos a tener valores mayores de secamiento. Esto provoca a su vez una reducción en la porosidad y el consiguiente incremento de los valores de DA. Esta alteración ocasiona la desecación de los suelos y por consiguiente, también una disminución en el agua disponible (Daza et al., 2014; Plaza, 2018). Por otro lado, en suelos bajo intervención agrícola, como el caso del suelo arado, hay que tomar en cuenta que no se puede sobrellevar la labranza sin que se destruya la estructura del suelo, se compacte o se torne más friable, además de la inevitable pérdida de la capacidad para retener agua ante perturbaciones (Daza et al., 2014; Pinzón, 1993). Caso contrario sucede con los valores menores de DA, como los que presenta el pasto reforestado o el pajonal conservado, que reflejan la idoneidad del suelo para un mejor desarrollo radical de la vegetación, a causa de que son suelos más porosos, bien aireados y con un adecuado drenaje.

Las características que hacen singulares a los suelos paramunos son la causa de su gran vulnerabilidad. En este caso, vemos que el cambio de cobertura puede perturbar la baja densidad aparente y la elevada porosidad que caracteriza a estos suelos. Los ecosistemas de páramo se pueden alterar fácilmente por diversas actividades que someten a estos suelos a constantes presiones o cargas fuertes, por lo que es importante tomar en

consideración los valores obtenidos en este estudio, puesto que se evidencia que la DA se ve influenciada por el cambio de uso de suelo.

4.2.2.2 Conductividad hidráulica saturada (Ks)

La figura 25 indica los resultados obtenidos de la conductividad hidráulica saturada (Ks) en cm.h^{-1} . El arado, bosque de pino y pasto degradado, presentan resultados superiores (1.52 cm.h^{-1} , 1.41 cm.h^{-1} , 0.95 cm.h^{-1}). Respecto a las coberturas de bosque nativo de Lluchucarrumi (0.35 cm.h^{-1}), pasto reforestado (0.29 cm.h^{-1}), pajonal conservado (0.28 cm.h^{-1}) y pajonal degradado (0.23 cm.h^{-1}) muestran valores cercanos entre sí. Los resultados obtenidos en este estudio están clasificados de acuerdo a la tabla 5, donde las coberturas bosque nativo, pasto reforestado, pajonal degradado y pajonal conservado, están dentro de la categoría de Ks lenta, mientras que, pasto degradado, arado y bosque de pino ingresan en la clasificación de moderadamente lenta.

En la literatura, se reportan valores de Ks entre 0.49 cm.h^{-1} y 0.93 cm.h^{-1} , esto es, de lenta a moderadamente lenta, como es el caso del presente estudio. Sin embargo, otros estudios muestran que se pueden hallar valores en suelos de páramo de 5 cm.h^{-1} a 6 cm.h^{-1} y de 1 cm.h^{-1} a 2 cm.h^{-1} (Cisneros et al., 2010, Poulenard et al., 2001, Buytaert et al., 2005).

Tabla 5. Clasificación de la conductividad hidráulica, según la velocidad de movimiento

Clasificación	Conductividad Hidráulica (cm/h)
Muy Lenta	<0.1
Lenta	0.1-0.5
Moderadamente Lenta	0.5-2
Moderada	2-6
Moderadamente Rápida	6-12
Rápida	12-18
Muy Rápida	>18

Fuente: Béjar, 2007

Los valores proyectados en la figura 25 también indican que las coberturas que más se alejan con resultados por debajo de su línea base, son el pajonal y bosque de pino. El pajonal degradado se aleja con un 85% y el pajonal conservado con un 82%, mientras que el suelo bosque de pino difiere con 62%. En la cobertura de arado, la línea base es muy

similar al calculado, difiriendo un 2%. En el pasto, los resultados presentados indican que es un 48% inferior el pasto reforestado a la línea base y el pasto degradado sobrepasa con un 41%.

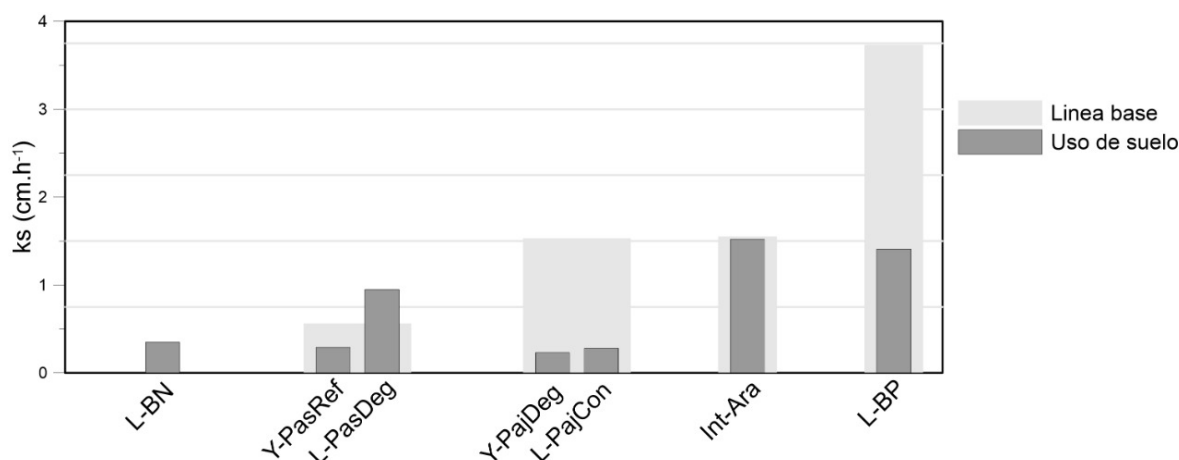


Figura 25. Valores de K_s por uso de suelo

Las alteraciones observables en esta investigación, pueden estar ligadas a las actividades generadas por el cambio de uso de suelo. Esta diferenciación se hace evidente cuando examinamos los valores obtenidos entre coberturas intervenidas (pasto degradado, arado, bosque de pino) de aquellas que no presentan intervención. Patiño et al. (2021) observaron que evidentemente, la remoción de la cobertura vegetal natural afecta de manera significativa las propiedades hidrofísicas (estructura, porosidad, conductividad hidráulica, entre otros) del suelo. Es importante tomar en cuenta estas modificaciones, sobre todo en áreas de recarga hídrica, puesto que la degradación y compactación de la estructura del suelo disminuye la capacidad de retención del agua, lo que significa un problema para el almacenamiento de este recurso (Patiño et al., 2021).

La variación de la conductividad hidráulica saturada se relaciona principalmente con la agricultura, ganadería y reforestación. En la agricultura, cuando se elimina la vegetación natural, se rompe la estructura del suelo, provocando el aumento de la macroporosidad, facilitando así la infiltración del agua y, por consiguiente, un aumento de la K_s . Además, las parcelas sometidas a cultivos, pueden presentar una reducción irreversible de hasta un 40% en la retención del agua (Buytaert et al., 2006). Caso contrario sucede en la ganadería y reforestación, la porosidad y capacidad de infiltración disminuyen, motivo por el cual los valores de K_s son menores (Patiño et al., 2021). Los valores bajos de K_s del suelo pasto reforestado y pajonal degradado pueden estar relacionados con la presencia de ganadería y reforestación de la zona. Así mismo, el cambio de uso de suelo por arado puede demostrar

cambios estructurales en el suelo; esta conjetura va de la mano con que el suelo arado muestra resultados elevados de K_s en comparación con el resto de coberturas estudiadas.

Por otra parte, los resultados obtenidos de las coberturas bosque nativo, pasto degradado y pajonal conservado de la microcuenca Lluchucarrumi (en proceso de recuperación pasiva), muestran valores de K_s bajos comparados con los demás usos de suelo. Este hecho se podría explicar debido a que los suelos de páramo que fueron intervenidos, pueden experimentar una desecación irreversible como resultado del cambio de su cobertura vegetal natural. Las modificaciones de la superficie de estos ecosistemas podrían resultar en la formación de agregados hidrofóbicos y costras, causando la reducción de la K_s (Podwojewski, 1999). Así mismo, Poulenard et al. (2001) estudiaron los efectos del pastoreo en el páramo y encontraron una importante formación de costras que generaron una reducción en la conductividad hidráulica saturada y un aumento en la escorrentía. Aunque también, los valores bajos de K_s obtenidos en áreas sin intervención, se pueden relacionar con la variabilidad de materiales presentes en cada zona de muestreo. Por ejemplo, existen suelos que en su matriz contienen arcillas, por lo tanto, el movimiento del agua bajo esta característica de suelo, será más lenta, mientras que, en otros casos, de acuerdo a la textura y estructura, la velocidad de infiltración aumenta (Cisneros et al., 2010).

4.2.2.3 Curva de pF

En la tabla 6 se presentan los valores generalmente usados para construir la curva de retención de humedad (CRHS).

Tabla 6. Valores característicos de la curva pF

Puntos de Humedad	pF
Capacidad de campo (CC)	2.52
Punto de marchitez (PMP)	4.18

Fuente: Lahuate, et al., 2015

La Figura 26 demuestra que el ajuste del MVG es muy bueno debido a la concordancia entre el CRHS medido y el CRHS ajustado. El uso de suelo expuesto es el pajonal conservado de la microcuenca Lluchucarrumi. De igual manera, el buen ajuste sucede con el resto de coberturas analizadas, las cuales se exponen en el Anexo C. En la curva pF se pueden diferenciar dos regiones, una designada como la “parte húmeda”, que parte desde el punto de saturación hasta la CC y la denominada “parte seca”, que alcanza el PMP desde la CC (Ramírez, 2011).

Los valores específicos de CC de PMP y la disponibilidad de agua correspondientes a cada uso de suelo se muestran en el Anexo D.

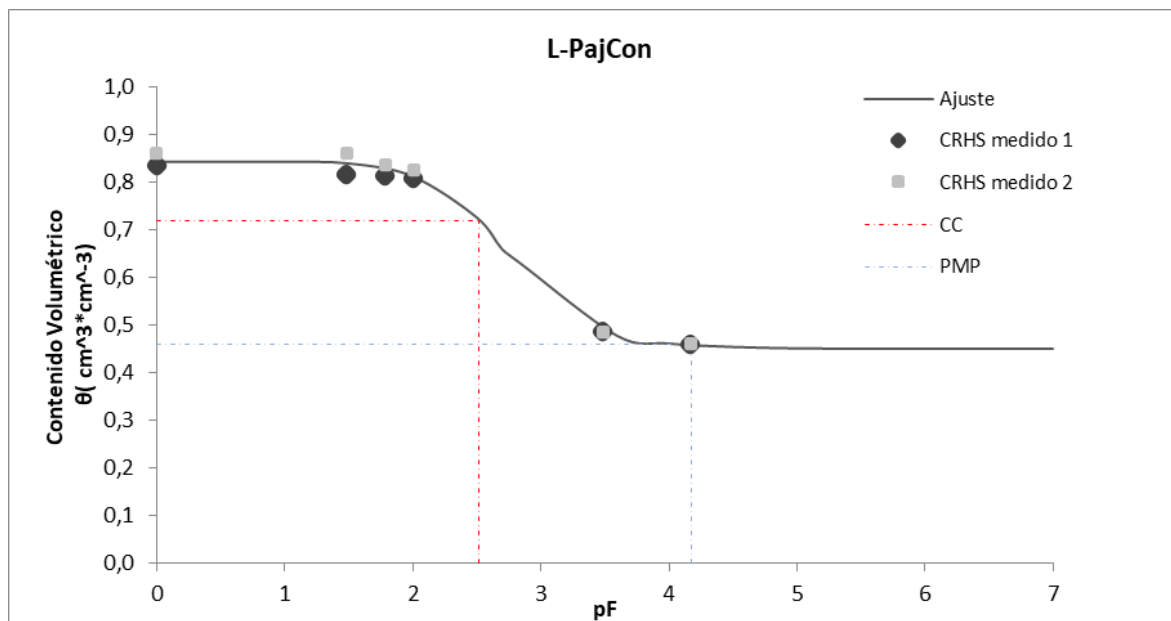


Figura 26. Curva pF y ajuste para Pajonal Conservado de la microcuenca Lluchucarrumi

4.2.2.3.1 Curva pF, uso de suelo Pajonal

La figura 27, indica los valores obtenidos de la CRHS del uso de suelo Pajonal. El punto de saturación de las muestras expuestas se encuentra alrededor del 85%. Según Céleri et al. (2004), los suelos de páramo tienen una elevada capacidad de retención de agua, cuyo contenido volumétrico varía entre 80% y 90%. La curva pF del pajonal degradado evidencia una zona casi plana desde la saturación hasta pF-2.52. Esto evidenciaría que la muestra de suelo retiene más agua, mientras que el pajonal conservado presenta una reducción del 14% hasta la CC. El pajonal conservado expone una reducción del contenido de humedad en el PMP en comparación con la cobertura del pajonal degradado de Yutujapina. Según Ramírez (2011), los sitios alterados presentan mayor contenido de humedad en esta zona. Borja et al. (2008) documentaron valores de CC y PMP similares a los reportados en este estudio. Aun así, hay que tomar en cuenta que el uso de suelo bajo pajonal de la microcuenca Lluchucarrumi en recuperación pasiva, demuestra con los resultados obtenidos una posible degradación en su capacidad de retención de humedad. Los autores Daza et al. (2014) citaron un efecto negativo en la capacidad de retención de humedad en un lote de estudio que llevaba un período de 5 años en descanso, y que, a pesar del tiempo transcurrido, el suelo no había logrado restablecer sus propiedades de retención de humedad.

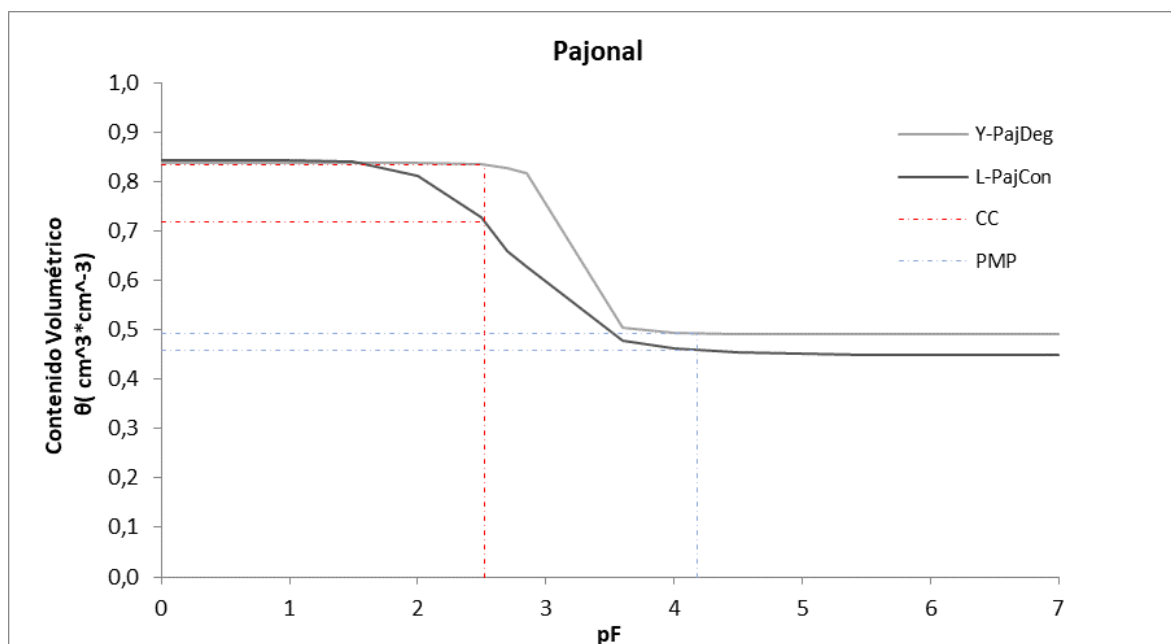


Figura 27. Curva pF, Uso de suelo Pajonal

4.2.2.3.2 Curva pF, uso de suelo Pasto

La figura 28 muestra los valores obtenidos de pF para el uso de suelo Pasto, las muestras corresponden a la microcuena Yutujapina y Lluchucarumi. El punto de saturación es de un 80% para pasto reforestado (Yutujapina) y pasto degradado (Lluchucarrumi), los mismos que casi no sueltan agua hasta pF-2 y pF-2.9 respectivamente. En cuanto a la parte húmeda, en el pasto reforestado, existe un cambio de humedad del 7.85% y se da una pérdida de humedad del 29.83% desde el punto de capacidad de campo (pF=2.52) hasta el punto de marchitez permanente (pF=4.18). En cambio, en el pasto degradado se da un mínimo cambio en la parte húmeda (1.14%), pero en la parte seca es del 30.94%. Por lo tanto, el pasto degradado presenta mayor disponibilidad de agua con respecto al pasto reforestado, aunque no de manera importante (Anexo D). Curúa et al. (2008), en sus resultados de curvas retención, en los que analiza sitios inalterados e intervenidos, estos no presentan mayor diferencia entre sí, sin embargo, como se menciona, el uso de suelo degradado posee mayor humedad, lo cual va de acuerdo a los resultados de Ramírez, 2011 que menciona que las zonas alteradas presentan esta característica. El cambio de uso de suelo y las prácticas de manejo agrícolas, alteran características esenciales, mismas que afectan la capacidad de almacenamiento de agua (Salcedo et al., 2007).

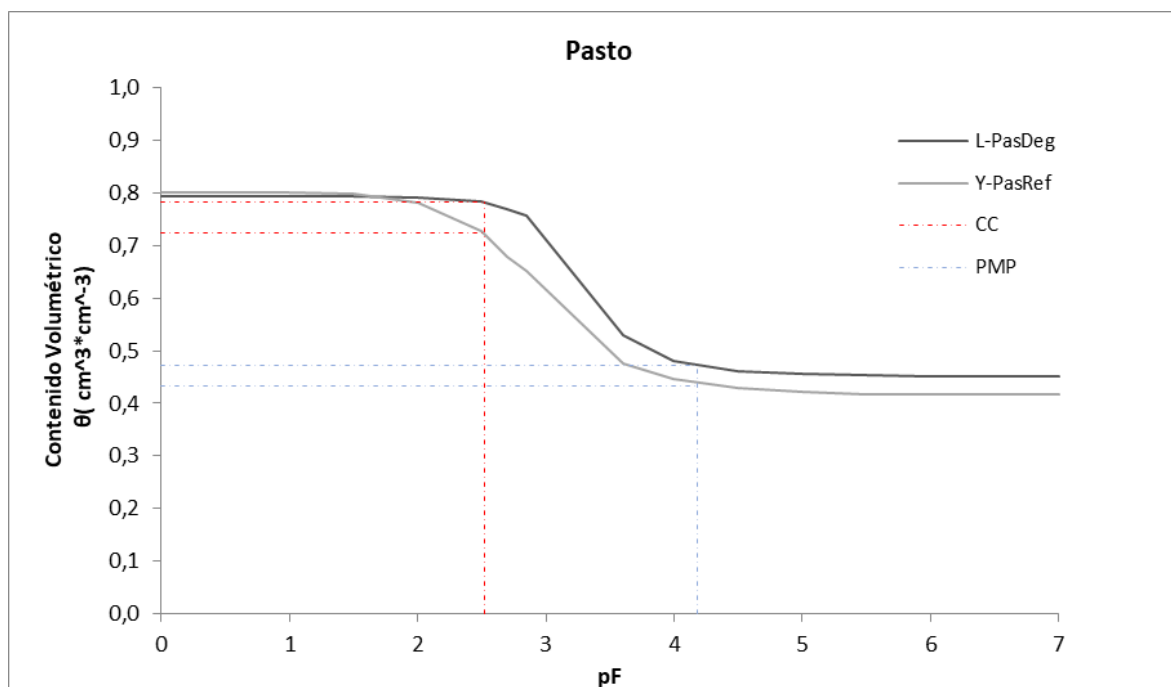


Figura 28. Curva pF, Uso de Suelo Pasto

4.2.2.3.3 Curva pF, uso de suelo Bosque de Pino

En la figura 29 se observa la curva de retención de humedad del suelo bosque de pino. El punto de saturación tiene un valor aproximado de 67%, 54% corresponde a pF 2.52 y se muestra un porcentaje de 49% en el punto pF 4.18. El contenido de humedad que se presenta en la cobertura de pino es inferior a la cobertura de pajonal y pasto, este valor refleja que los suelos bajo este tipo de cobertura pierden la capacidad de retención del agua. Este impacto se refleja de manera más clara al comparar el agua disponible en estas coberturas, donde el bosque de pino contiene 4.70% de agua disponible, mientras que pajonal degradado y pajonal conservado presentan un valor de 34.27% y 26.70% respectivamente. Este resultado coincide con el estudio de Plaza (2018), donde los suelos con plantaciones forestales, como el pino, tienen muy baja capacidad de retención de agua, por lo que el contenido de humedad del suelo disminuye de manera significativa. Así mismo, Célleri et al. (2004) reflejan en sus resultados una considerable disminución en el contenido volumétrico de agua para cualquier valor de pF en suelo bajo pino. Además, mencionan que la retención de agua bajo cobertura vegetal natural es ampliamente superior a estos suelos. La disminución de la capacidad de retención de agua en suelos de pino, puede ser el resultado de la presencia de raíces leñosas, producto del cambio de uso de suelo en comparación con la red de raíces finas de la cobertura nativa, esta modificación puede llegar a alterar la estructura del suelo y crear macroporos. Además, la disponibilidad de agua para interceptar en el suelo, también puede verse comprometida debido a que los

árboles limitan este recurso como producto de las pérdidas por interceptación del dosel (Plaza, 2018).

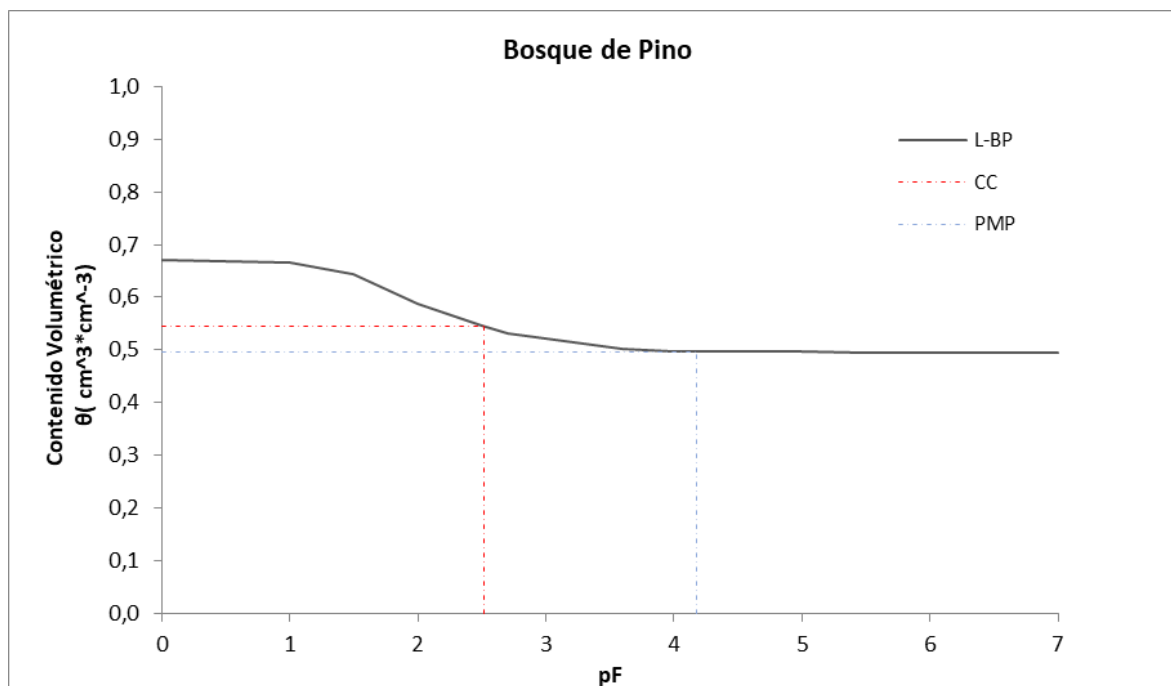


Figura 29. Curva pF, Uso de Suelo Bosque de Pino

4.2.2.3.4 Curva pF, uso de suelo Intervenido Arado

La figura 30 indica los valores obtenidos de la CRHS del uso de suelo Arado, perteneciente a la microcuenca Yutujapina. El punto de saturación es de aproximadamente el 73%, por lo que se da una reducción en la humedad desde este punto a la CC en un 15.92%. El porcentaje de agua disponible que presenta esta cobertura es de 34.80%, valor similar al del pajonal degradado de la misma microcuenca, con 34.27%. Además, se puede observar que la disponibilidad de agua en este uso de suelo es mayor con respecto a los demás usos (ver anexo D). El laboreo puede causar este tipo de variaciones estructurales en el suelo, ya que la distribución de poros se ve afectada debido al movimiento de la matriz del suelo, esto origina efectos importantes en la capacidad de retención de agua (García et al., 2009). Martín et al. (2016) mencionan en sus resultados que los niveles superiores de humedad fueron obtenidos en zonas donde existió intervención por labores de arado. Estas modificaciones provocan que se facilite la infiltración del agua. Así mismo, según Buytaert et al. (2006), la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos, dentro de una microcuenca alterada, es más alta respecto a una inalterada. Por tanto, el resultado encontrado obedece a este criterio, ya que este uso de suelo analizado pertenece a la microcuenca alterada (Yutujapina).

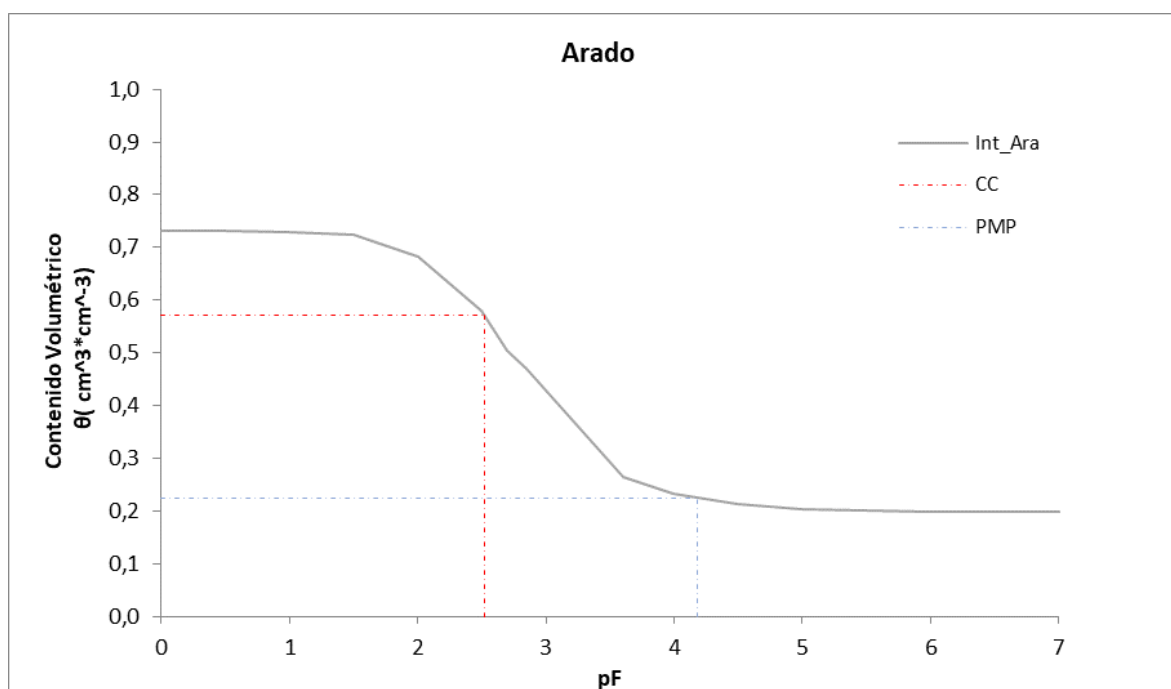


Figura 30. Curva pF, Uso de suelo Intervenido Arado

4.2.2.3.5 Curva pF, uso de suelo Bosque Nativo

La figura 31 muestra los valores obtenidos de pF para el uso de suelo bosque nativo, correspondiente a la microcuenca Yutujapina. El punto de saturación es del 62.9%, desde este punto a la CC existe un mínimo cambio de humedad de 0.3%. La región seca presenta un 23.1% de variación en la humedad. En un estudio realizado en bosques nativos y bosque de pino en páramos localizados en la provincia de Tungurahua, se registró humedades máximas de 77% y 79%. Al comparar los resultados del bosque nativo con los de bosque de pino, el nativo presenta mayor porcentaje de humedad (Tixi, 2009). Como se puede observar, los resultados de este estudio no son cercanos a los citados. Aichholzer et al. (2010) determinan considerables diferencias entre el bosque nativo, bosque de pino y pajonal, estableciendo que los suelos bajo el bosque nativo poseen una capacidad de retención de agua muy superior respecto al bosque de pino y pajonal. Este criterio se cumple con el bosque de pino (4.70%), pero no con el pajonal, ya que este es mayor al nativo (26.10%). Es importante considerar que el bosque nativo pertenece a la microcuenca alterada, mientras el pajonal con el que se lo compara se encuentra conservado.

Quichimbo et al. (2012) señalan en su investigación, cómo el bosque nativo, al encontrarse en la más baja altitud en su área de estudio, repercute en todas las propiedades hidrofísicas de manera directa. Específicamente este tipo de cobertura estaría más situada en la región designada como "subpáramo húmedo", la misma que se distingue por ser del tipo más

arbustivo. En consecuencia, esto origina importantes disimilitudes con el resto de coberturas analizadas, de modo que el bosque nativo está en función de su formación bioclimática.

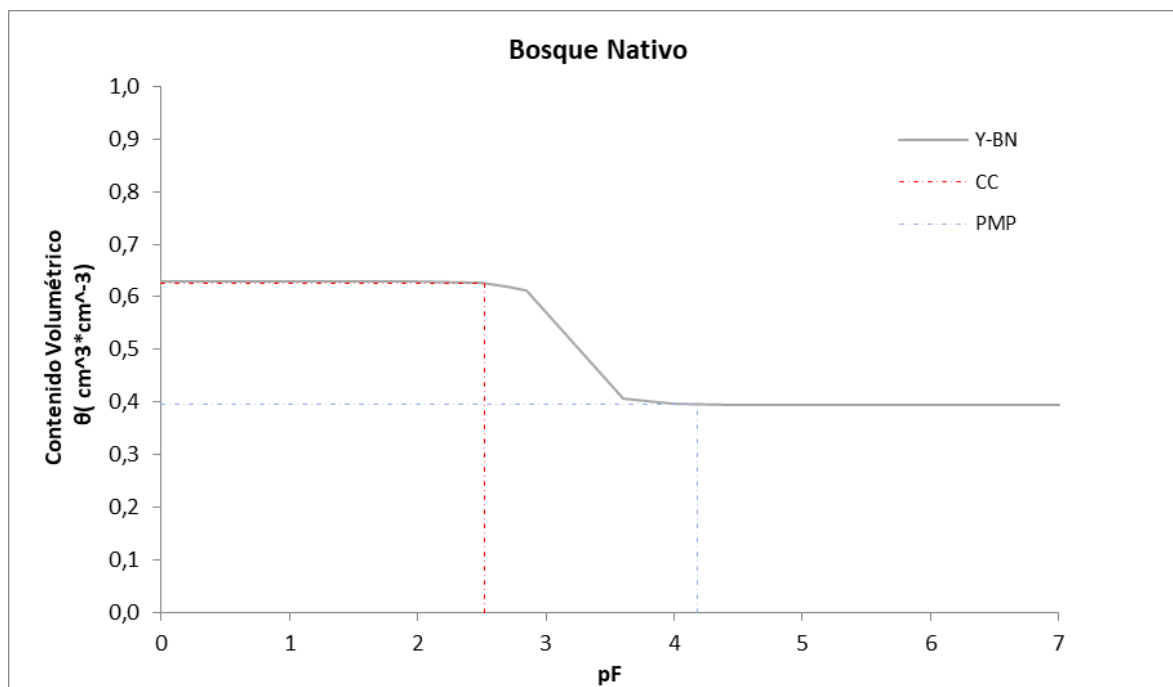


Figura 31. Curva pF, Uso de Suelo Bosque Nativo

4.3 Análisis de correlación de las variables químicas e hidrofísicas

Se realizó el análisis de correlación en los diferentes tipos de coberturas, para ello se utilizó el programa R-Studio. Se llevó a cabo el test de Shapiro-Wilks con la finalidad de determinar si las variables son o no paramétricas, la distribución de los valores fue obtenida al aplicar t-Student (distribución normal) y Wilcoxon (distribución no normal). El resultado obtenido determina que dos parámetros de los analizados (Ks,PMP) no están dentro de una distribución normal (ver anexo G), por lo tanto, para el resto de variables se aplica la correlación de Pearson, mientras que para los que no sigue la normalidad, se aplica el coeficiente de correlación de Spearman.

Al analizar los resultados de correlación (ver tabla 7), vemos que la materia orgánica y el N alcanzaron una correlación positiva y significativa de $r = 0.84$ y un $p = 0.05$, esto determina que las variaciones de contenido de N están definidas por la dinámica de la materia orgánica en el suelo. Resultados similares fueron reportados en el estudio de Arteaga. et al. (2016) con una correlación de $r = 0.99$. Según Mecerí et al. (2014), el 99% de N del suelo

está asociado a sustancias orgánicas, por lo que la materia orgánica se convierte en la fuente primaria de este elemento.

Los resultados obtenidos en esta investigación también sugieren una relación positiva entre el pH y el contenido de MO, N y K. Aunque estos parámetros no presentan un nivel de significancia, es importante puntuar su correlación debido a que esta relación se plasma en los resultados anteriormente descritos en el análisis de las variables químicas. Así mismo, Plaza (2018) afirma en su investigación que el pH se correlaciona con el N y K y asegura que, mientras mayor concentración de estos elementos, mayor pH y viceversa. La asociación del pH con la MO fue estudiada por Martínez et al. (2008), donde mencionan que el contenido de materia orgánica provoca aumento o disminución del pH en el suelo, como respuesta al reciclaje de nutrientes generados por los procesos de mineralización (Arteaga et al., 2016). Por otra parte, en el presente estudio, la CIC expone una correlación negativa con el fósforo, Cerón et al. (2009) documentaron que el P se correlaciona en forma negativa con la CIC con un $r=-0.79$ y $p=0.01$.

En cuanto a los parámetros hidrofísicos, la conductividad hidráulica saturada (K_s) tiene una correlación positiva fuerte con la densidad aparente ($r= 0.96$), con un alto nivel de significancia $p=0.01$, esto quiere decir que al aumentar la K_s la densidad aparente también aumenta. Resultados similares fueron obtenidos en el estudio de Quichimbo et al. (2012), donde se observa que los valores mayores de K_s calculados coinciden con las muestras cuyo valor de DA también es mayor, por tanto, su relación también es directa.

La conductividad hidráulica saturada se correlaciona con la CC y esta última tiene una correlación negativa fuerte con la DA. De acuerdo a estudios, estas variables tienen una estrecha relación, sobre todo en eventos donde la compactación, el reordenamiento de agregados y la disminución del espacio de los poros se hacen evidentes, así como lo explica Daza et al. (2009). La relación de estas variables también se muestra en el estudio de Quichimbo et al. (2012); los valores de CC son bajos cuando la conductividad hidráulica saturada es alta, mientras que la capacidad de campo disminuye cuando la densidad aparente aumenta.

Tabla 7. Matriz del análisis de correlación de las variables químicas e hidrofísicas

	Ks	PMP	CC	DA	pH	MO	N	P	K	CIC
Ks	1									
PMP	-0.4900	1								
CC	-0.8000	0.4700	1							
DA	0.9600**	-0.2400	-0.6200	1						
pH	-0.1700	-0.3700	0.1900	-0.6300	1					
MO	-0.4300	-0.1900	-0.0760	-0.5500	0.5200	1				
N	-0.0680	-0.5300	-0.2300	-0.2500	0.5200	0.8400**	1			
P	-0.0350	-0.4300	0.3200	-0.1800	0.0840	-0.4800	-0.5600	1		
K	-0.0086	-0.2100	0.2300	-0.4000	0.5700	-0.1700	-0.1900	0.7400	1	
CIC	-0.0850	-0.3900	0.0310	0.2900	-0.4400	-0.2400	-0.4000	0.5500	-0.0160	1

* = $p \leq 0.05$; ** = $p \leq 0.01$

4.4. Análisis de componentes principales (ACP)

Para las variables químicas e hidrofísicas se realiza el ACP para transformar un grupo de variables originales en un nuevo conjunto de variables (componentes principales), con el objetivo de disminuir la dimensionalidad (Restrepo et al., 2012). De las 10 variables químicas e hidrofísicas (ver anexo J), se consideraron 7.

El valor promedio de contribución se indica con la línea roja discontinua y las variables cuya contribución supere este límite pueden considerarse significativas para determinado componente (Gil, 2018). Es así, que para el componente 1 (PC1) se contemplan las siguientes variables: DA, pH, Ks, MO, K, CC (Figura 32), las cuales explican el 37.5% de la varianza, mientras que el segundo componente (PC2) explica el 29.1%, siendo las variables con mayor porcentaje de contribución: PMP, CIC, CC, Ks, N (Figura 33), de modo que en conjunto, estos dos primeros componentes reúnen el 66.6% de la variabilidad total de los datos. El tercer y cuarto componente contribuyen con el 21.1%, 7.7% respectivamente (Figura 34), y los cuatro componentes a la vez explican el 96.16% (ver anexo I). Se tomó como referencia a Quichimbo et al., 2012, el cual en su investigación determina tres componentes principales, que agrupadas explican el 65% de la variabilidad total, por consiguiente, en este estudio se definieron solo dos componentes, con los cuales se obtuvo un valor casi igual al mencionado en la literatura.

En cuanto al PC1, las propiedades químicas aportan a la variabilidad total del componente con un 40.5% (pH, MO, K) y las hidrofísicas con un 44.7% (DA, Ks, CC) sumando en conjunto un 85.2%. En cambio, en el PC2 las variables químicas (CIC, N) e hidrofísicas (PMP, CC, Ks) suman entre ambas un 82.6%, contribuyendo en menor proporción las

químicas (29%) respecto a las hidrofísicas (53.6%) (ver anexo J). Un punto a resaltar es que en el PC1 la variable que proporciona más variabilidad es la DA (19.6) y en el PC2 la el PMP (28.5). En el estudio de Díaz et al. (2004), entre las cuatro variables que expresan la variabilidad de los suelos de dicha investigación, se encuentran las dos variables mencionadas (DA y PMP), concluyendo que por el cambio de uso de suelo, la mayor influencia se dio en estas variables físicas. Así pues, el ACP muestra que tanto las propiedades químicas como hidrofísicas tienen variabilidad, pero tanto en el componente 1 y 2, las propiedades hidrofísicas dan mayor variación, lo que va conforme también a los resultados reportados por Gavilanes y Landi, (2011) así como los de Quichimbo et al. (2012), que indican que son estas propiedades las fuentes de mayor variabilidad como consecuencia del cambio de cobertura, de igual manera, hacen referencia que sus resultados van conforme a los obtenidos por Hofstede (1995), Poulénard et al. (2001), Buytaert et al. (2004, 2005) y Poulénard et al. (2003).

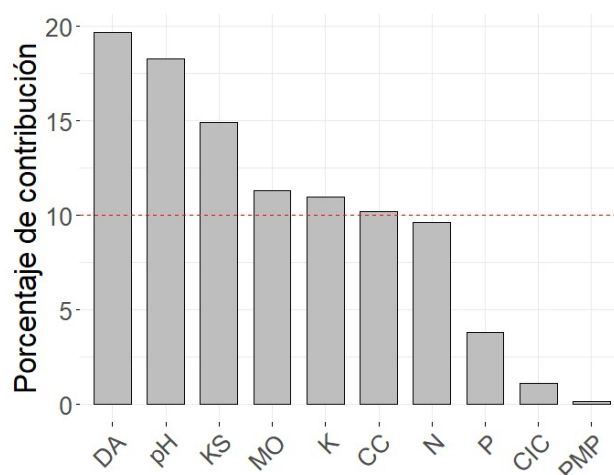


Figura 32. *Porcentaje de contribución al PC1*

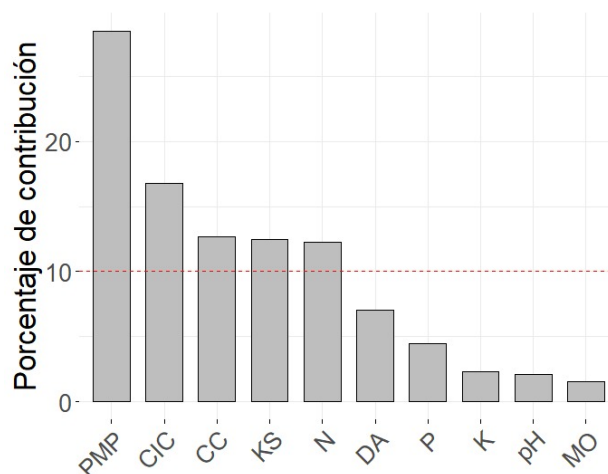


Figura 33. Porcentaje de contribución al PC2

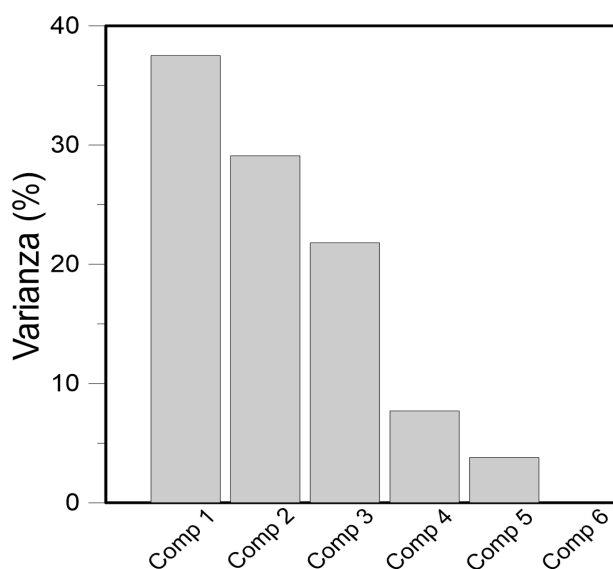


Figura 34. Varianza de los componentes principales de las variables químicas e hidrofísicas

En la Figura 35 se observa como el pH está positivamente correlacionado con la MO ($r = 0.52$), así como con el potasio ($r=0.57$), de igual manera el N y P ($r = 0.56$). Si existen ángulos pequeños entre vectores o si el ángulo es cercano a cero, esto representa un alta correlación entre las variables implicadas, y si el ángulo es próximo a 180 grados, la correlación es negativa y alta (Gil, 2018; Villardón, 2016), en consecuencia la DA está correlacionada negativamente con el pH ($r=-0.63$), la MO ($r=-0.55$), y la CC ($r=-0.62$), así como positivamente con la conductividad hidráulica. Buytaert, et al., 2006 encontró también esta correlación negativa entre la densidad aparente y la materia orgánica ($r = -0.55$)

(Ramírez, 2011). Igualmente, Poca et al. (2018), asoció negativa y estrechamente a la DA con el contenido de materia orgánica ($r=-0.61$) y con la capacidad de campo ($r=-0.75$).

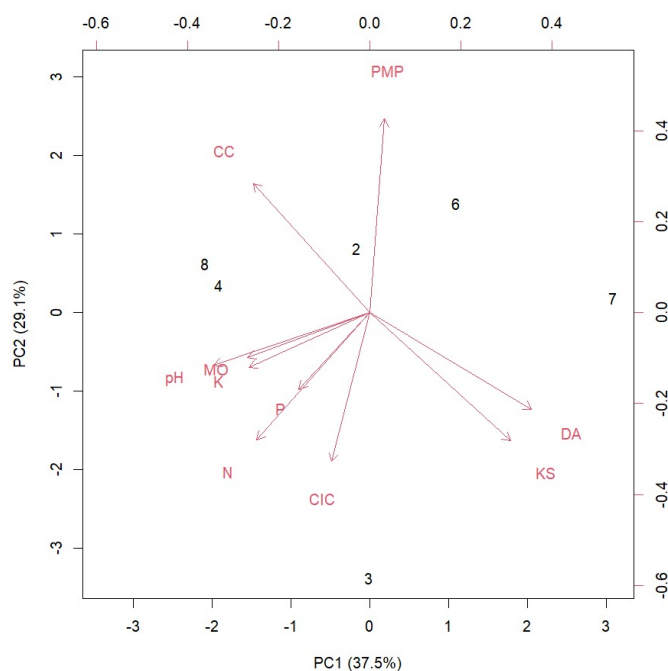


Figura 35. ACP para las variables químicas e hidrofísicas

De acuerdo a todos los resultados analizados podemos observar que, en las coberturas donde existe un cambio de uso de suelo, los parámetros químicos e hidrofísicos son diferentes de las coberturas sin intervención. Estos resultados comparados con estudios de suelos bajo coberturas prístinas similares a las estudiadas, también son atípicos (Ramírez, 2011; Cáceres, 2017; Rubio 2010). Las variables analizadas evidencian una clara alteración de las propiedades químicas e hidrofísicas del suelo de Yutujapina. La contaminación ambiental es evidente en esta microcuenca, la presencia de sustancias en concentraciones diferentes a lo común evidencia una polución, en este caso del recurso suelo (Rodríguez et al., 2019). Los valores alterados de Ks, la variación de nutrientes (N, P, K) y la disimilitud de materia orgánica, en zonas de arado y degradadas demuestra que la destrucción de los ecosistemas naturales bajo procesos agrícolas y ganaderos, sin dimensiones de producción sostenible, están afectando gravemente a los principales servicios ecosistémicos provistos por el suelo de páramo (Hernández, 2011). Esta contaminación del "Sistema Yutujapina" significa no solamente riesgos para el ambiente, sino también para la parte social y económica, es decir, implica un riesgo para la sostenibilidad de las comunidades abastecidas por esta área de recarga hídrica.

Caso contrario sucede con la microcuenca Lluchucarrumi, cuyos parámetros químicos e hidrofísicos demuestran que la sostenibilidad es posible bajo planes de manejo y conservación, como es el proceso de recuperación pasiva. La resiliencia de este ecosistema de páramo garantiza el bienestar humano y un ambiente saludable. Sin embargo, el uso de suelo pino, puede ser un factor amenazante para la estabilidad de esta microcuenca, el estudio demuestra que el agua disponible en esta cobertura es muy baja, además de las variaciones en los parámetros químicos, esto puede significar una amenaza para las funciones de un área de recarga hídrica.

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En esta investigación se realizó, un análisis comparativo de las propiedades químicas e hidrofísicas del suelo con diferente cobertura vegetal, en las microcuencas hidrográficas Yutujapina y Lluchucarrumi. Las conclusiones extraídas de este estudio son las siguientes:

De acuerdo al primer objetivo planteado, se determinó que la microcuenca Yutujapina tiene un área total de 35.7 hectáreas y Lluchucarrumi 41.3 hectáreas. Los tipos de usos de suelo identificados fueron: bosque nativo (en Yutujapina y Lluchucarrumi), pajonal (conservado y degradado), pasto (reforestado, degradado y en recuperación), bosque de pino y uso de suelo intervenido. Dentro de este último, se reconocieron zonas de arado, pasto y potreros. La microcuenca Yutujapina sufrió procesos de antropización; como efecto de esta intervención el 58.5% de la superficie ha cambiado el uso de suelo natural por suelo agropecuario. Caso contrario sucedió con Lluchucarrumi, que, dentro de su proceso de recuperación pasiva, evidenció un área antropizada que representa el 3.2% del total de la microcuenca.

En base al segundo objetivo, podemos concluir que la línea base extraída de los estudios de Quichimbo et al., 2012; Plaza, 2018 y Ramírez, 2011, resultó útil para la correcta exposición de los resultados, permitió exponer un aumento o disminución de los mismos. Los resultados de las propiedades químicas determinaron que el pH en pajonal conservado de Lluchucarrumi es suelo ácido. Bosque nativo, pajonal degradado, pasto, bosque de pino y arado se clasifican como suelos muy ácidos, además, los cambios de uso de suelo, sobre todo arado y bosque de pino, provocan perturbaciones sobre este parámetro. En cuanto a la MO, su porcentaje es alto en todas las coberturas. Los valores más bajos coinciden con los usos de suelo antropizados (pasto degradado, pajonal degradado, bosque de pino), no así, el uso de suelo arado, quien obtuvo un porcentaje superior a las coberturas no antropizadas, resultado que se le puede atribuir principalmente la agricultura según la bibliografía citada en el estudio. Todos los suelos estudiados son catalogados como extremadamente ricos en N. De acuerdo a los resultados obtenidos y revisión bibliográfica, se puede observar una relación del N con la MO y que el valor de N del suelo arado, puede estar relacionado con el aporte de insumos externos por procesos agrícolas.

En los resultados de fósforo, todos los suelos analizados se clasifican con un nivel bajo. Las muestras que presentan mayor concentración de P fueron las que pasaron por algún tipo de intervención (pajonal degradado, arado y pasto degradado). Según revisión bibliográfica, este resultado se puede atribuir a la intervención antrópica. Por otra parte, los niveles de K,

fueron altos en bosque nativo de Yutujapina, pasto degradado, pajonal degradado, pajonal conservado y arado. Mientras que bosque nativo de Lluchucarrumi, pasto reforestado, pasto en recuperación y bosque de pino tienen concentraciones de K clasificadas como medio. Los valores más elevados pertenecen generalmente a las coberturas intervenidas (pasto degradado, pajonal degradado, arado). En cuanto a la CIC, todos los suelos estudiados se clasifican dentro de un nivel alto. Se precisó, en base a consulta bibliográfica y valores obtenidos, que la CIC elevada responde a un menor contenido de MO y pH.

Los resultados de los análisis hidrofísicos mostraron que la DA, se encuentra dentro del rango (0.4 a 0.8 g/cm³). Los valores altos de DA coinciden con los usos de suelos que contienen menor contenido de MO. La DA es elevada en las coberturas bajo intervención antrópica (pasto degradado, pajonal degradado, arado y bosque de pino). La Ks en las coberturas bosque nativo, pasto reforestado, pajonal degradado y pajonal conservado, tienen un Ks lento, mientras que pasto degradado, arado y bosque de pino ingresan en la clasificación de moderadamente lenta.

En los resultados de la curva pF se concluye que el ajuste de MVG es muy bueno, presenta una concordancia entre todas las CRHS medidas con las ajustadas. En el uso de suelo pajonal, los valores de saturación obtenidos fueron de 85%. En cuanto a la curva pF del suelo pasto, el punto de saturación es menor al pajonal con un 5%. Dentro de esta cobertura, tanto el pasto reforestado como el degradado, no sueltan agua hasta la CC. El pasto degradado presenta mayor disponibilidad de agua respecto al pasto reforestado, aunque no de manera importante. Por otra parte, la curva pF de bosque de pino, tiene un punto de saturación de 67% y el agua disponible está muy por debajo de los valores de los suelos pajonal y pasto. Esto indica que este tipo de uso de suelo provoca la pérdida de capacidad de retención del agua. En el suelo arado, el punto de saturación es de 73%, esta cobertura presenta una pérdida de agua del 15.92% hasta CC. El agua disponible en esta cobertura resultó ser mayor respecto a las demás coberturas estudiadas, resultado que puede estar influenciado por las variaciones estructurales del suelo debido a la labranza. Finalmente, el suelo de bosque nativo resultó en un punto de saturación igual a 62.9%, desde este punto hasta CC, este suelo casi no suelta agua. El agua disponible en esta cobertura resultó ser de 23.11%.

De acuerdo al tercer objetivo, se determinó que el cambio de cobertura natural afecta las propiedades químicas e hidrofísicas del suelo. Las perturbaciones en las microcuencas estudiadas, principalmente se debe a intervenciones agropecuarias e introducción de especies exóticas (bosque de pino). En los resultados se hace evidente que las coberturas

antropizadas, sobre todo arado y bosque de pino, exponen valores que demuestran afectación en las propiedades analizadas del suelo. Es decir, las actividades humanas en suelos de páramo, provocaron degradación ambiental causada por la remoción, compactación y ruptura del suelo. Los parámetros de P, K, N y MO se ven afectados mayormente en suelos bajo procesos agrícolas, es así que la cobertura arado, siempre tiene mayor concentración de estos nutrientes. Las variables pH, DA, Ks y agua disponible son gravemente afectadas principalmente en suelos de bosque de pino, este tipo de cobertura puede significar una amenaza para la estabilidad hídrica de la microcuenca en recuperación pasiva. Se demostró también que la saturación es mayor en coberturas de pajonal y pasto, es decir, la conservación de estos ecosistemas es de suma importancia, ya que son coberturas con gran extensión y significan un recurso potencial para el abastecimiento de cantidad y calidad de agua. También se determinó que la correlación entre la MO con el N, y la Ks con la DA ($r= 0.84$ y $p= 0.05$; $r= 0.96$ y $p=0.01$ respectivamente), así como entre los resultados obtenidos (CIC elevada responde a un menor contenido de MO y pH) muestra que el cambio de cobertura vegetal natural, causa una secuencia de reacciones encadenadas que cambian las propiedades químicas y físicas de los suelos de páramo. Basta que se altere una variable para que se desencadene alteraciones en los diferentes parámetros.

En el Análisis de Componentes Principales (ACP) de los parámetros químicos e hidrofísicos, fueron consideradas 7 de las 10 variables en cuestión. El primer componente se conformó con las variables: DA, pH, Ks, MO, K, CC y el segundo componente con el PMP, CIC, CC, Ks y N. El PC1 explica el 37.5% de la varianza, mientras que el segundo el 29.1%, por lo que, en conjunto, reúnen el 66.6% de la variabilidad total de los datos. Además, en ambos componentes las propiedades hidrofísicas (DA y PMP) dan mayor variación.

Se concluye que las propiedades químicas e hidrofísicas de los suelos estudiados muestran alteraciones por el cambio de uso de suelo. Con este estudio y sus resultados confirmamos la hipótesis, indicando que la caracterización química e hidrofísica del suelo muestra mayor deterioro en las coberturas vegetales de la microcuenca intervenida Yutujapina, en comparación con la microcuenca Lluchucarrumi que se encuentra dentro de un proceso de recuperación pasiva. Esto denota que la sostenibilidad a largo plazo del área de recarga hídrica "Sistema Yutujapina" está amenazada por la intervención antrópica, es decir, el aprovechamiento de los recursos está siendo violentado de manera insostenible. El estudio demostró que la microcuenca Yutujapina se encuentra bajo un problema ambiental, puesto que las alteraciones de las propiedades químicas e hidrofísicas de los suelos estudiados

derivan en impactos negativos en los servicios ecosistémicos que el sistema brinda; caso muy puntual, la cantidad y calidad del agua para los barrios y comunidades de Cumbe. El deterioro del área de recarga hídrica significa que se está descuidando la conservación de este recurso natural que garantiza la calidad de vida para las generaciones actuales y futuras. Al reconocer, interpretar y diagnosticar los impactos negativos provocados por la alteración de las propiedades químicas e hidrofísicas del suelo de páramo, se hace evidente e indispensable trabajar en la elaboración de programas de manejo e implementación de acciones que garanticen la conservación de Yutujapina, así como en el fortalecimiento de facultades institucionales y locales para generar un aprovechamiento sustentable de este recurso.

5.2 Recomendaciones

Para los análisis químicos e hidrofísicos de cada sitio de estudio, se recomienda realizar ensayos con varias repeticiones, con la finalidad de tener una mayor cantidad de datos para el análisis estadístico y así poder caracterizar de manera más efectiva cada una de las muestras, evitando la incertidumbre en los resultados.

Tomar en cuenta que la adquisición de muestras inalteradas debe ser llevadas a cabo bajo conocimiento previo, técnica adecuada y supervisión de personal capacitado, ya que resulta en la correcta toma de muestras, como se realizó en esta investigación. Esto asegura que se mantengan las características propias del suelo, por consiguiente, la fiabilidad de los resultados derivados de estas muestras.

Los resultados de la influencia del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas e hidrofísicas encontradas, pueden ser utilizados como argumento para que las autoridades competentes mantengan y planteen procesos de conservación y recuperación de las microcuencas estudiadas. Es necesario proponer medidas que aseguren la sostenibilidad de los recursos hídricos mediante elaboraciones de planes de manejo y conservación de áreas de recarga hídrica, así como desarrollar una gestión integral de los recursos hídricos. Estos procesos permitirán desarrollar y gestionar de forma coordinada el agua, la tierra y los recursos relacionados, garantizando que se equilibren las necesidades sociales, económicas y la protección de los ecosistemas.

Referencias

- Alvarez-Yela, A. C., Alvarez-Silva, M. C., Restrepo, S., Husserl, J., Zambrano, M. M., Danies, G., Gómez, J. M., & González Barrios, A. F. (2017). *Influence of agricultural activities in the structure and metabolic functionality of paramo soil samples in Colombia studied using a metagenomics analysis in a dynamic state*. *Ecological Modelling*, 351, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.010>
- Alvarado, S. (2008). *Dinámica de la Materia Orgánica en Suelos Agrícolas*. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.
- Abrego, F. (2012). *Calidad Ambiental de Suelos: Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico*. Universidad Nacional. Noreste de Buenos Aires. (UNNOBA). https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/proinsa/informes/_archivos.pdf
- Arteaga J., J. C., Navia E., J. F., & Castillo, J. A. (2016). *Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia*. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 62-75. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.53>
- Avellaneda-Torres, L. M., León Sicard, T. E., & Torres Rojas, E. (2018). *Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of Neotropical high Andean Páramo ecosystem soils*. *Science of The Total Environment*, 631-632, 1600-1610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.137>
- B. De Bièvre, V. Iñiguez, W. Buytaert (2014). *“Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad. Conocer para Conservar”*
- Bach, K., Schawe, M., Beck, S., Gerold, G., Gradstein, S. R., & Morales R., M. (2003). *Vegetación, suelos y clima en los diferentes pisos altitudinales de un bosque montano de Yungas, Bolivia: Primeros resultados*. *Ecología en Bolivia*, 38(1), 3-14.
- Barbecho Chuisaca, J. G., & Calle Ortiz, J. E. (2012). *Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del Río Tarqui* [Bachelor's thesis, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/771>
- Barrientos, F. R. (2006). *Cuencas Hidrográficas, Descentralización y Desarrollo Regional Participativo*. . . ISSN, 15.

- Bedoya Álvarez, M. L., Portillo Moreno, J. F., & Sáenz Cortés, H. R. (2016). *Análisis del cambio de la cobertura entre 1999 y 2015 del páramo de Chiles - Cumbal a través de la utilización de herramientas SIG*. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/2509>
- Béjar, M.V., 2007. *Drenaje*, Primera. ed. Editorial Tecnológica de CR, Costa Rica
- Besteiro, S. I., & Descalzo, A. I. B. (2021). *Contenidos de nitrógeno y fósforo del suelo ante un cambio de cobertura y condición topográfica. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 47(2), 285-292.
- Benimeli, M. F., Plasencia, A., Corbella, R. D., Andina Guevara, D., Sanzano, A., Sosa, F. A., & Fernández de Ullivarri, J. (2019). *El nitrógeno del suelo*. Universidad Nacional de Tucumán, 1–11. <https://www.edafologia.org/app/download/7953478176/El+nitrogeno+del+suelo+2019.pdf?t=1563476239>
- Bohn, H. L., Myer, R. A., & O'Connor, G. A. (2001). *Soil Chemistry*. Wiley. John Wiley & Sons.
- Borja, P., Iñiguez, V., Crespo, P., Cisneros, P., & Cisneros, F. (2008). *Características Físico - Químicas de Histosoles y Andosoles de los Páramos De Quimsacocha, Ecuador*.
- Brady, N. C., & Weil, R. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2013). *Elements of the Nature and Properties of Soils: Pearson New International Edition*. Pearson Education.
- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., & Magner, J. A. (2013). *Hydrology and the management of watersheds* (4th ed). Wiley-Blackwell.
- Bueno Buelvas, R., & Fernández Lizarazo, J. C. (2019). *La capacidad de intercambio catiónico del suelo: una bóveda de nutrición clave en la producción de alimentos*. *Ámbito investigativo*, 4(1), 7-12.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). *Human impact on the hydrology of the Andean páramos*. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>

- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G. and Deckers, J., 2005. *The effect of land use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in south Ecuador*. Hydrological Processes, In press.
- Cáceres Alvaran, H. F. (2017). *Evaluación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en plantaciones de pinus radiata, en tres sitios de la Región Sierra Ecuatoriana* [BachelorThesis]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7445>
- Cáceres, K. (2001). *Metodologías para estimar degradación y vulnerabilidad a desastres naturales: aplicación a la microcuenca Los Naranjos, Lago de Yojoa, Honduras*. Tesis de Magister *Scientiae*. CATIE, Costa Rica.
- Cajilema Mullo, E. M., & Piguabe Hinojosa, C. J. (2020). Estimación de materia orgánica en el suelo y biomasa del páramo de Quimiag. [BachelorThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13796>
- Camacho, M. (2014). *Los páramos ecuatorianos: Caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible*. Revista Anales, 1, 77-92. <https://doi.org/10.29166/anales.v1i372.1241>
- Cárdenas Fonseca, M. S. (2015). *Evaluación de la calidad de los suelos de páramo intervenidos y no intervenidos en la comuna Monjas Bajo, parroquia Juan Montalvo, cantón Cayambe*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/9368>
- Cárdenas Moreno, I. L. (2014). *Impacto de las prácticas agropecuarias y forestales sobre las propiedades físico-químicas de los suelos andinos del sur del Ecuador* [Bachelor's thesis, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5477>
- Carúa Cola, J., Proaño, M., Suarez, D. & Podwojevski, P. (2008). *Determinación de retención de agua en los suelos de los páramos: Estudio de caso en la subcuenca del Río San Pedro, Cantón Mejía, Pichincha, Ecuador*. Forestación, 2,27-45.
- Castellanos, J.Z. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas* 2ª Edición. 186 p
- Castillo Cerna, C. M. (2005). *Selección y calibración de indicadores locales y técnicos para evaluar la degradación de los suelos laderas, en la microcuenca Cuscamá El*

- Tuma-La Dalia, Matagalpa, 2005* [Engineer, Universidad Nacional Agraria, UNA].
<https://repositorio.una.edu.ni/1094/>
- Castro Herrera, F. (2016). *Conductividad hidráulica del suelo y su relación con la labranza, biofertilización y tipo de cultivo*.
<http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/8150>
- Célleri, R. A., Bièvre, B. D., & Iñiguez, V. (2004). *Efectos de la Cobertura Vegetal en la Regulación Hidrológica De Microcuencas de Páramo*.
- Cerón, P., & García, H. (2009). *Propiedades del suelo en bosque y pajonal; reserva natural pueblo viejo, Nariño, Colombia*. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 12(1), Art. 1. <https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n1.2009.647>
- Chacón, G., Gagnon, D., & Paré, D. (2009). *Comparison of soil properties of native forests, Pinus patula plantations and adjacent pastures in the Andean highlands of southern Ecuador: Land use history or recent vegetation effects?* Soil Use and Management, 25(4), 427-433. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00233.x>
- Chirinos, I. J., & Mattiazzo, M. E. (2004). *Variación de la conductividad hidráulica en suelos saturados en función de la concentración de sodio presente en residuo agroindustrial*. Revista de la Facultad de Agronomía, 21(1), 1-11.
- Cisneros, P., Cajamarca, J., & Pacheco, E. (2010). *Estudios para establecer la línea base de suelos inalterados en el páramo de Quimsacocha*. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, 17-19.
- Conti, M. E. (2000). *Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo*. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. INPOFOS, 8, 25-37
- Copa Bobarin, R., & Miranda Casas, R. (2014). *Propiedades Hidrofísicas del suelo para implementar sistemas de riego en medio semiárido (Centro Rivera-Altiplano Central Boliviano)*. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, 1(1), 73-80.
- Cotrina-Cabello, V. R., Alejos-Patiño, I. W., Cotrina-Cabello, G. G., Córdova-Mendoza, P., Córdova-Barrios, I. C., Cotrina-Cabello, V. R., Alejos-Patiño, I. W., Cotrina-Cabello, G. G., Córdova-Mendoza, P., & Córdova-Barrios, I. C. (2020). *Efecto de abonos*

orgánicos en suelo agrícola de Purrapampa Panao, Perú. Centro Agrícola, 47(2), 31-40.

CORTÁZAR, R., AVELLANEDA, L., TORRES, E. (2012). *Microorganismos asociados al ciclo del nitrógeno en suelos bajo tres sistemas de uso: cultivo de papa, ganadería y páramo, en el Parque Los Nevados, Colombia*. Acta Agrícola 61(4):371-379

Constitución de la República del Ecuador. 2008. Registro Oficial N° 449, de 20 de octubre del 2008.

Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., Gordillo-Curiel, A., Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). *Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México*. Terra Latinoamericana, 38(3), 475-480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>

Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez-Damián, J. L., & Irujo-González, D. (2010). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. En H. Cotler Ávalos (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología, Fundación Gonzalo Ríos Arronte, I. A. P. pp. 96-103.

Daza Torres, M. C., Hernández Florez, F., & Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz—Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189-7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>

Delgadillo, O., & Pérez, L. (2016). *Medición de la infiltración del agua en el suelo. Centro andino para la gestión y uso del agua*. Centro agua. Facultad de ciencias agrícolas, pecuarias y forestales universidad mayor de san simón. Cochabamba, Bolivia.

Delgado, O., & Zarate, E. (2002). *Los páramos de Azuay y Cañar*. UNIVERSIDAD-VERDAD, 197.

Díaz Rivadeneira, G. P. (2011). *Zonificación agroecológica del cultivo de papa (solanum tuberosum) en el Centro—Norte de la Sierra Ecuatoriana* [BachelorThesis,

SANGOLQUÍ / ESPE-IASA | / 2011].
<http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/3277>

Díaz, E., L. Paz, E. Amezquita y M. Rivera. (2004). *Influencia de los sistemas de uso del suelo en el comportamiento de las propiedades físicas en los páramos “Las Ánimas” (municipio de Silvia) y “Piedra de León” (municipio de Sotará) departamento del Cauca Colombia*. En: Seminario Internacional Experiencias y Métodos de Manejo de Cuencas y su Contribución al Desarrollo Rural en los Andes: Desafíos y Oportunidades para Lograr Mayores Impactos. Bogotá, http://www.infoandina.org/sites/default/files/recursos/res_suelo_paramo.

Díaz-Granados Ortiz, M. A., Navarrete González, J. D., & Suárez López, T. (2005). *Páramos: Hidrosistemas Sensibles*. Revista de Ingeniería, 22, 64-75.

Donis, L. (2015). *Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del Río Negro, ciudad de Guatemala sistematización de práctica profesional* [Tesis de pregrado]. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2015/06/15/Donis-Luisa.pdf>

Emamgholizadeh, S., Bazoobandi, A., Mohammadi, B., Ghorbani, H., & Amel Sadeghi, M. (2022). *Prediction of soil cation exchange capacity using enhanced machine learning approaches in the southern region of the Caspian Sea*. Ain Shams Engineering Journal, 101876. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101876>

Estupiñán, L. H., Gómez, J. E., Barrantes, V. J., & Limas, L. F. (2009). *Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el Páramo el Granizo, (Cundinamarca—Colombia)*. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 12(2), Art. 2. <https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n2.2009.694>

FAO.2019. *Los suelos sódicos y su gestión*.

Farley, K. A., & Kelly, E. F. (2004). *Effects of afforestation of a páramo grassland on soil nutrient status*. *Forest Ecology and Management*, 195(3), 281-290. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.015>

Fassbender, H. W. (1975). *Química de suelos con énfasis en los suelos de América Latina*. Turrialba, Costa Rica: IICA.

Faustino, J. (2006). Curso de Postgrado “Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica” [Notas de clase]. San Salvador, SV, CATIE.113 p

- Flores-López, F., Galaitsi, S. E., Escobar, M., & Purkey, D. (2016). *Modeling of Andean Páramo Ecosystems' Hydrological Response to Environmental Change*. *Water*, 8(3), 94. <https://doi.org/10.3390/w8030094>
- Flores Miranda, G. J., & Venlasaga Pisco, G. I. (2021). *Influencia de la acidez del suelo en la capacidad de intercambio catiónico (Bases+CIC) de la microcuenca del río Atillo y Ozogoche, del Parque Nacional Sangay*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15339>
- García, V. J., Márquez, C. O., Isenhardt, T. M., Rodríguez, M., Crespo, S. D., & Cifuentes, A. G. (2019). *Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador*. *Heliyon*, 5(10), e02701. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701>
- García-Tejero, I., Espejo, A.J., Martínez, G., Vanderlinden, K., Durán, V.H., Muriel, J.L.(2009). *Efectos del laboreo en la curva de retención hídrica de un suelo bajo diferentes manejos*. *Vida rural*, 297, 32-37.
- Garrido, M. S. (1993). *Interpretación de análisis de suelo*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 5, 1-40.
- Gavilanes Pando, M. P., & Landi Cubides, E. M. (2012). *Efectos del cambio de uso de la tierra sobre las propiedades físicas y químicas en la Microcuenca del río Zhurucay* [BachelorThesis]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/388>
- Gil Martínez, C. (2018) RPubS - *Análisis de componentes principales (PCA)*.https://rpubs.com/Cristina_Gil/PCA
- Gil, L. D. S., & Cañón, J. F. (2017). *Afectaciones ambientales en el páramo chilí del municipio de pijao Quindío generadas por actividades mineras y ganaderas*. Luis Miguel Mejía Giraldo, 79.
- González, G. (2016). *Caracterización Físico-Química y Microbiológica de Suelos Paramunos Del P.N.N. Sumapaz Sometidos Al Cultivo Convencional y Orgánico de Papa Post-Descanso De Actividad Agrícola*. 84.
- González-Prieto, S. J., Cabaneiro, A., Villar, M. C., Carballas, T., & Carballas, M. (1996). *Effect of soil characteristics on N mineralization capacity in 112 native and*

agricultural soils from the northwest of Spain. *Biology and Fertility of Soils*, 22(3), 252-260. <https://doi.org/10.1007/BF00382521>

Guamán Arpi, C. A. (2018). *Validación del método para determinar materia orgánica en el suelo por la técnica de Walkley and Black* [BachelorThesis]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31352>

Guerrero, N., Díaz, M., Urdánigo, J., Tayhing Cajas, C., Guerrero, R., & Yépez-Rosado, A. (2018). *Soil use and its influence on the water quality of the El Sapanal micro watershed, Ecuador*. 5.

Guncay J. (2015). *Caracterización hidrofísica del material parental a escala de parcela en una zona de páramo, caso de estudio*. [Tesis de grado, Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21689/1/TESIS.pdf>

Fujimaki, H., & Inoue, M. (2004). *Reevaluation of the Multistep Outflow Method for Determining Unsaturated Hydraulic Conductivity*. *Vadose Zone Journal*, 3(1), 317-317. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.3170>

Hernández, A. (2011). *Uso de pesticidas en dos zonas agrícolas de México y evaluación de la contaminación de agua y sedimentos*. *Rev. Int. Contam. Ambient* vol. 22 no.2 México abril. 2011.

Hofstede, R. (1997). *La importancia hídrica del páramo y aspectos de su manejo*. EcoPar, agosto.

Hofstede, R., Calle, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). *Los páramos andinos ¿que sabemos?* UICN, Quito, Ecuador, 154.

Hofstede, R., Coppus, R., Váscónez, P. M., Segarra, P., Wolf, J., & Sevink, J. (2002). *El estado de conservación de los páramos de pajonal en el Ecuador*. *Ecotropicos*, 15(1), 3-18.

INAB (Instituto Nacional de Bosques). (2003). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural*. Manual Técnico. Guatemala, GT. 106 p

INEN. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 686. *Mecánica de Suelos. Toma de Muestras Alteradas*.

- INEN. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 687. Mecanica de Suelos. Toma de Muestras Inalteradas.
- Jaurixje, M., Torres, D., Mendoza, B., Henríquez, M., & Contreras, J. (2013). *Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara*. Bioagro, 25(1), 47-56.
- Jiménez, A. S., & Khalajabadi, S. S. (2005). *La Densidad Aparente y su Relación con otras Propiedades en Suelos de la Zona Cafetera Colombiana*. 17.
- Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., Aguayo, M., Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., & Aguayo, M. (2018). *Evaluación del servicio ecosistémico de regulación hídrica ante escenarios de conservación de vegetación nativa y expansión de plantaciones forestales en el centro-sur de Chile*. Bosque (Valdivia), 39(2), 277-289. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200277>
- Kuri, G. H. (2017). *Agua subterránea y soberanía interdependiente: El caso de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en la región binacional de Paso del Norte*. Norteamérica, 12(2), 113-145. <https://doi.org/10.20999//nam.2017.b005>
- Lahuatte Imbaquingo, B. C., & Recalde Vásquez, M. A. (2015). *Propiedades físico-químicas del suelo como instrumentos de evaluación a las estrategias de restauración implementadas en áreas degradadas de páramo, caso de estudio: Microcuencas Antisana y Pita*. [BachelorThesis, Quito, 2015.]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11300>
- Lahuatte Imbaquingo, B. C., & Recalde Vásquez, M. A. (2015). *Propiedades físico-químicas del suelo como instrumentos de evaluación a las estrategias de restauración implementadas en áreas degradadas de páramo, caso de estudio: Microcuencas Antisana y Pita*. [BachelorThesis, Quito, 2015.]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11300>
- Liu, Z., Cai, L., Dong, Q., Zhao, X., & Han, J. (2022). *Effects of microplastics on water infiltration in agricultural soil on the Loess Plateau, China*. Agricultural Water Management, 271, 107818. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107818>
- Llambí, L. D., Soto-W., A., Célleri, R., & Bièvre, B. de (Eds.). (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos: Proyecto Páramo Andino*. Proyecto Páramo Andino.

- Llambí, L., Soto Werschitz, A., Céleri, R., De Bièvre, B., Ochoa-Tocachi, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, Hidrología y Suelos del Páramo*.
- López Salcedo, M. G., & Pauta Placencia, D. X. (2012). *Efectos en la calidad del agua y del suelo por el uso de la pollinaza como fertilizante en los pastos de la zona de Cruzpamba-Cajas* [BachelorThesis]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2411>
- López Pérez, M. A. (2016). *Determinación de la confiabilidad de los métodos de ollas isobáricas y centrífugas para la determinación de capacidad de campo y punto de marchitez permanente*. [BachelorThesis, Quito: UCE]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/8068>
- Lozano, Z., Hernández, R. M. H., Bravo, C., Rivero, C., & Delgado, M. (2012). *Disponibilidad de fósforo en un suelo de las sabanas bien drenadas venezolanas, bajo diferentes coberturas y tipos de fertilización*. *Interciencia*, 37(11), 820-827.
- Manchero Herrera, A. C. (2011). *Análisis de los impactos en la calidad del suelo causados por el Pino (*Pinus patula*) en comparación con el suelo ocupado por *Polylepis* (*Polylepis reticulata*) en el Parque Nacional Cajas* [BachelorThesis]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1086>
- Pérez de Madrid, M. Navarro, M. Saborío, M. & Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). (2015). *Protección, conservación y gestión de las zonas de recargahídrica*. https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/serie_1_03_proteccion_zonas_de_recarga_hidrica.pdf
- Martínez H, E., Fuentes E, J. P., & Acevedo H, E. (2008). *Carbono Orgánico y Propiedades Del Suelo*. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez-Fernández, J. (1995). *Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. Avances en la investigación en la zona no saturada*. Serv. Central Publ. del Gob. Vasco. Vitoria-Gasteiz, 193-202.
- Martín-Martín, R., Jerez-Mompies, E., & Moreno-Lucas, F. (2016). *Influencia del laboreo en algunas propiedades hidrofísicas del suelo y en la extracción de nutrientes por el trigo (*Triticum durum* L.)*. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 136-144. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10597.19680>

- Masache, R. (2018). *Priorización de Zonas de Recarga Hídrica al Sur Occidente del Parque Nacional Cayambe – Coca Para Abastecimiento del Distrito Metropolitano de Quito*. 92.
- Matus, O. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica*. Turrialba, Costa Rica.
- Matus Silva, O. D. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3299>
- Mena Vásconez, P., Josse M., C., & Medina, G. (Eds.). (2000). *Los suelos del Páramo*. GTP, Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador.
- Merecí, J. V., Suqui, A. (2014). *Efecto de la deforestación sobre las propiedades físico-químicas de los suelos de la microcuenca del río Zhurucay* [Tesis Postgrado, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/19978>
- Mesquita, M.D., y S.O. Moraes. (2005). *Densidad de probabilidad como herramienta en la caracterización de la conductividad hidráulica saturada de los suelos*. Documentos técnicos en hidrología 71: 1-6.
- Mora, J. L. R., Jesús, M. A., Rosas, M.S (2016). *Comportamiento de Materia Orgánica y pH con la Profundidad del Suelo*. 1.
- Morales-Hernández, J. C., Carrillo-González, F. M., Farfán-Molina, L. M., & Cornejo-López, V. M. (2016). *Cambio de Cobertura Vegetal en la Región de Bahía de Banderas, México*. *Caldasia*, 38(1), 17-29. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57831>
- Naciones Unidas (2018), *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
- Neina, D. (2019). *The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation*. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019, e5794869. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Novillo Espinoza, I. D., Carrillo Zenteno, M. D., Cargua Chavez, J. E., Nabel Moreiral, V., Albán Solarte, K. E., & Morales Intriago, F. L. (2018). *Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador*. *Temas Agrarios*, 23(2), 177-187. <https://doi.org/10.21897/rta.v23i2.1301>

- Ordoñez, Juan (2011). *Cartilla Técnica: ¿Qué es Cuenca Hidrológica?* Sociedad Geográfica de Lima.
https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Orellana Guanuchi, T. F. (2010). *Validación de los métodos de laboratorio para la determinación de la capacidad de retención de agua en suelos* [BachelorThesis].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/746>
- Osorio Fernández, A. Y. (2015). *Explotación minera en el páramo de Pisba-Boyacá*.
<http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/7798>
- Osorio, N. W. (2012). *pH del Suelo y Disponibilidad de Nutrientes*. 1(4), 4.
- Oszust, J. D., Wilson, M. G., & Sasal, M. C. (2010). *Obtención del punto de marchitez permanente para el cálculo de agua útil para trigo y soja en suelos molisol y vertisol*.
<http://inta.gob.ar/documentos>.
- Otero, J. D., Figueroa, A., Muñoz, F. A., & Peña, M. R. (2011). Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area. *Ecological Engineering*, 37(12), 2035-2043. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.001>
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Oviedo-Ocaña, R., Buytaert, W., & Ochoa-Tocachi, B. F. (2021). *Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering*. *CATENA*, 202, 105227. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
- Pérez Ortega, D. J., Segovia Ortega, J. A., Cabrera Moncayo, P. C., Delgado Vargas, I. A., & Martins Pompêo, M. L. (2018). *Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas*. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 41-57.
<https://doi.org/10.22490/21456453.2089>
- Pérez -Trujillo, E., Hurtado, A. M. A.-, & Vega -Jara, L. (2022). *Relación del contenido de materia orgánica con el pH de los análisis de suelo en cinco provincias de Huánuco*. *Revista Investigación Agraria*, 4(2), Art. 2. <https://doi.org/10.47840/ReInA.4.2.1381>
- Pinos Arévalo, N. J. (2016). *Prospectiva del uso de suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial—Caso cantón Cuenca*. Estoa. Revista de la Facultad de

- Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca, 5(9), 1-21.
<https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.02>
- Plaza Patiño, J. M. (2018). *Impacto del tipo de cobertura forestal sobre las propiedades edáficas en una zona de bosque montano en el Parque Nacional el Cajas, provincia del Azuay* [BachelorThesis]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30305>
- Poca, M., Cingolani, A. M., Gurvich, D. E., Whitworth-Hulse, J. I., & Saur Palmieri, V. (2018). *La degradación de los bosques de altura del centro de Argentina reduce su capacidad de almacenamiento de agua*. *Ecología austral*, 28(1), 235-248.
- Podwojewski, P. (1999). *Los Suelos de las Altas Tierras Andinas: los páramos del Ecuador*. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Quito: SECS.
- Podwojewski, P. & Poulénard, J. (2000). *En Los Suelos del Páramo*. Serie Páramo 5. GTP/ Abya Yala. Quito
- Polo, L. A. T., Hernández, J. D., Arroyo, E., & Vegetal, F. (2016). *Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente*.
- Poulénard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.-L., & Collinet, J. (2001). *Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: Effect of tillage and burning*. *CATENA*, 45(3), 185-207.
[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00148-5)
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Céleri, 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, 138-156.
- Ramírez Matamoros, M. T., & Cisneros Espinoza, P. J. (2011). *Determinación de anomalías causadas a las propiedades físicas, químicas e hidrofísicas, en los suelos de páramo en el sur del Ecuador, ocasionadas por alteraciones antrópicas*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23356>
- Ramírez Rodríguez, C. R., Duarte, C., & Galeano Ardila, J. O. (2012). *Estudio de suelos y su relación con las plantas en el páramo el verjón ubicado en el municipio de choachí cundinamarca*. *TECCIENCIA*, 6(12), 56-72.

- Ramírez, M., (2011). *Determinación de anomalías causadas a las propiedades físicas, químicas e hidrofísicas, en los suelos de páramo en el sur del Ecuador, ocasionadas por alteraciones antrópicas*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23356>
- Restrepo, L. F., L Posada, S., & R Noguera, R. (2012). *Aplicación del análisis por componentes principales en la evaluación de tres variedades de pasto*. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 25(2), 258-266.
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. 2019. *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Roma, FAO.
- Romero López, A. M. (2017). *Revisión de la afectación de la actividad minera en ecosistemas de páramo a nivel ecológico*. <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17000>
- Rojas J. & Sáenz (2012). DENSIDAD APARENTE; *Comparación de métodos de determinación en Ensayo de rotaciones en siembra directa*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_densidad_aparente.pdf
- Rubio Gutiérrez, A. M. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales*. <https://digital.csic.es/handle/10261/57951>
- Sadeghian K., S. (2004). *Efecto de la fertilización con nitrógeno fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café*. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/273>
- Sainz Rozas, H.; Echeverría, H. E. y Angelini, H. (2018). *Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina*. *Informaciones Agronómicas* 2. 6 -12
- Salcedo-Pérez, E., Galvis-Spinola, A., Hernández-Mendoza, T. M., Rodríguez-Macias, R., Zamora-Natera, F., & Bugarin-Montoya, R. (2007). *La Humedad Aprovechable y su Relación con la Materia Orgánica y Superficie Específica del Suelo*.
- Schelle, H., Iden, S. C., Peters, A., & Durner, W. (2010). *Analysis of the Agreement of Soil Hydraulic Properties Obtained from Multistep-Outflow and Evaporation Methods*. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 1080-1091. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0050>
- Shukla, M. K. (2013). *Soil Physics: An Introduction*. CRC Press.

- Sposito, G. (2008). *The Chemistry of Soils* (English Edition) (2.^a ed.). Oxford University Press.
- Soto, L. E. S. (1961). *Influencia del pH sobre la fijación de fósforo y su relación con la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada*. Acta Agronómica, 11(3-4), Article 3-4.
- Tejero, I. F. G., Pérez, A. J. E., García, G. M., Vanderlinden, K., Zuazo, V. H. D., & Fernández, J. L. M. (2009). *Efectos del laboreo en la curva de retención hídrica de un suelo bajo diferentes manejos*. Vida rural, 297, 32-37.
- Tixi Cajamarca, S. del R. (2011). *Estudio comparativo del comportamiento hidrológico entre Bosque Nativos y Exóticos de dos Páramos Sachaguayco y Pampas de Salasaca en la Provincia de Tungurahua* [Bachelor Thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/709>
- TULSMA. (2003). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, LIBRO VI. 31/03/2003. Quito. Título y artículo agregados por Decreto Ejecutivo 3516, publicado en Registro Oficial Suplemento 2, 31/03/2003
- Van Genuchten, M. Th. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Van Ranst. (1997). *Baseline concentration levels of trace elements as a function of clay and organic carbon contents in soils in Flanders (Belgium)*. Science of The Total Environment 201:113-123.
- Varón Ramírez, V. M. (2016). *Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva*. Ingeniería Agrícola.
- Velasco Estrada, N. y Espinoza Solís, R. (2011). *Conservación Sustentable de los Bosques de la Hacienda Jubal en la provincia del Chimborazo*. [Tesis Postgrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/819741a9-65e7-4007-8a56-65c0d753f78f/D-92095.pdf>

- Vélez, G. A. M., & Sepulveda, D. C. M. (2014). *El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Química.
- Villardón, J. L., V.-. (2016). *Los Métodos Biplot: Evolución y Aplicaciones*. *Revista Venezolana De Análisis De Coyuntura*, 13(1).
<https://doi.org/10.54642/rvac.v13i1.10479>
- Yang, F., Zhang, G.-L., Yang, J.-L., Li, D.-C., Zhao, Y.-G., Liu, F., Yang, R.-M., & Yang, F. (2014). Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 519, 3086-3093.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.054>
- Zapata, V., & Mauricio, H. (2021). *Determinación de las curvas de retención de humedad de un suelo mediante diferentes metodologías para su aplicación en el manejo del riego*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/177694>
- Zapata-Sierra, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2008). *Influencia de seis especies arbóreas en la infiltración de agua en el suelo*. *Agrociencia*, 42(7), 835-845
- Zotarelli, L., Dukes, M., & Morgan, K. (2013). *Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad*. EDIS, 2013.
<https://doi.org/10.32473/edis-ae496-2013>

Anexos

Anexo A: Valores de referencia para las variables químicas

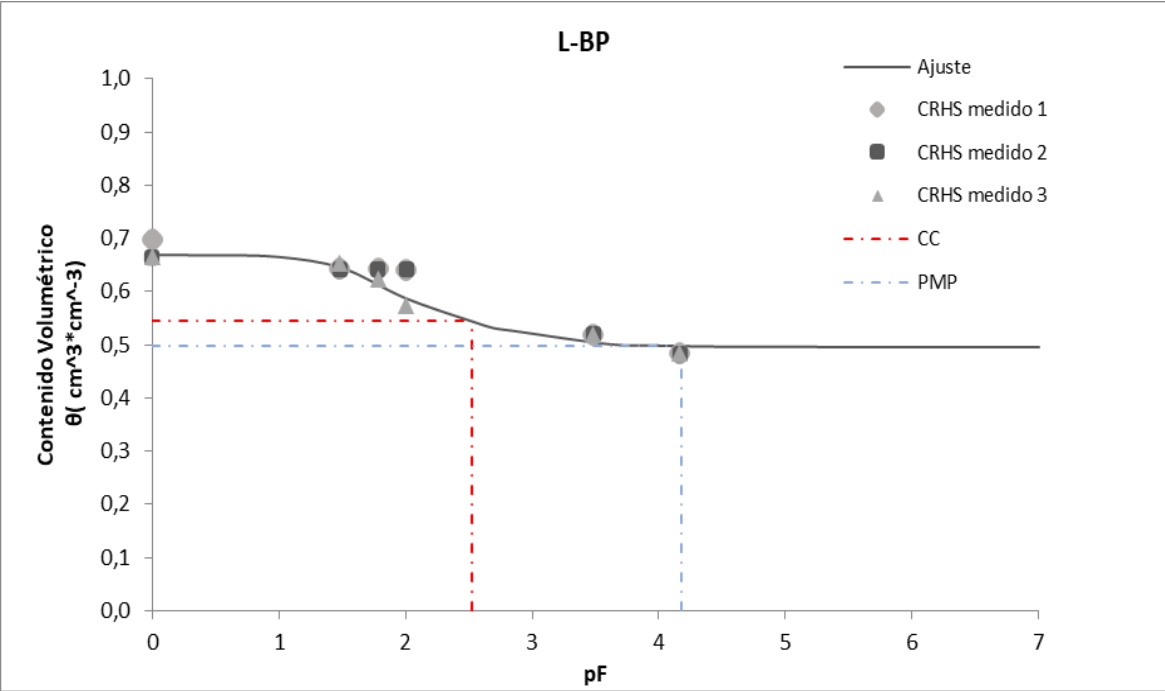
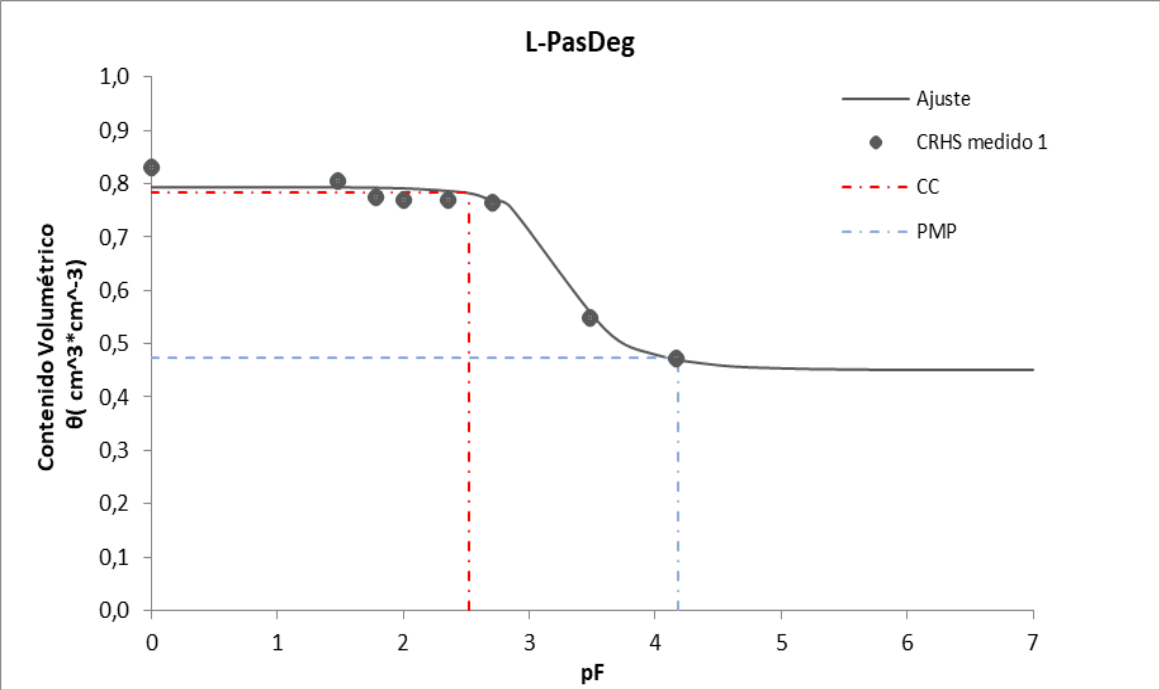
Variable Química	Bosque Nativo	Pasto	Pajonal	Arado	Bosque de pino
pH	5.62 ^a	4.7 ^b	4.9 ^c	4.8 ^b	4 ^b
M.O %	37.96 ^a	29.21 ^b	29.4 ^c	13.19 ^b	44,75 ^b
N %	1.89 ^a	0.97 ^b	1.06 ^c	0.55 ^b	1,62 ^b
P (ppm)	17.68 ^a	5.175 ^b	8.33 ^c	4.23 ^b	5,8 ^b
K (meq/100g)	1.14 ^a	0.2 ^b	0.2 ^c	0.32 ^b	0,27 ^b
CIC (meq/100g)	16.81 ^a	57.25 ^b	39.03 ^c	32 ^b	84 ^b
DA (g*cm-3)	0.28 ^a	0.39 ^b	0.43 ^c	0.78 ^b	0,34 ^b
Ks (cm*h-1)	-	0.56 ^b	1.53 ^c	1.55 ^b	3,73 ^b

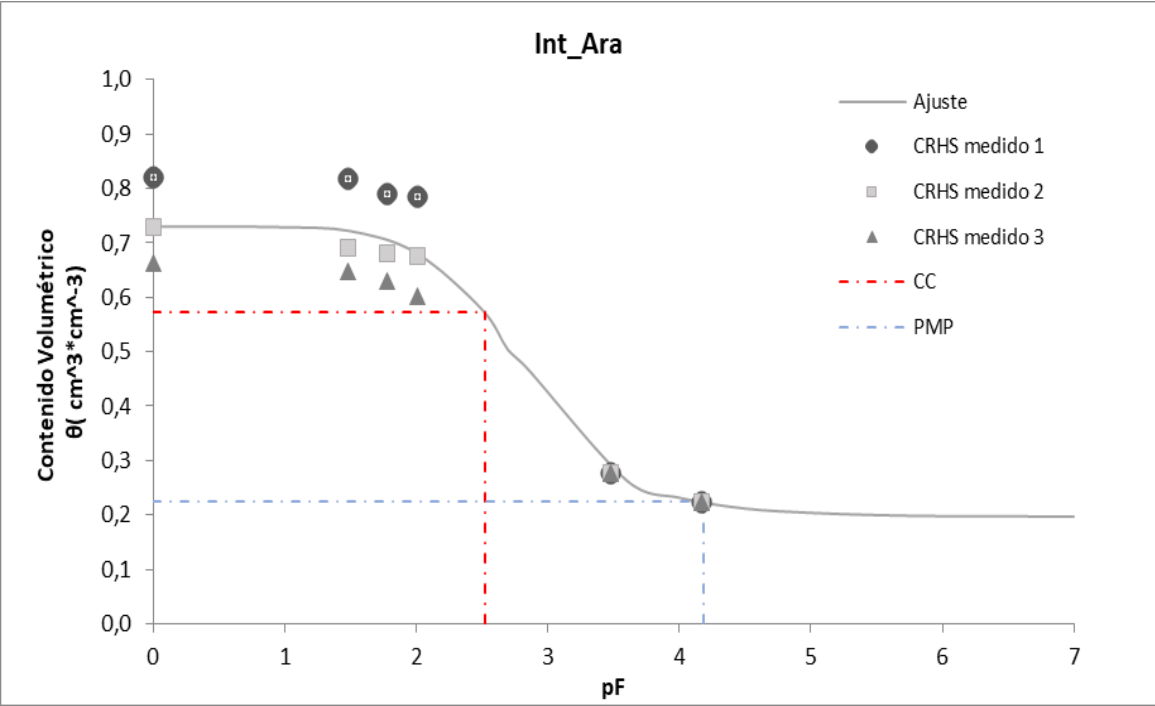
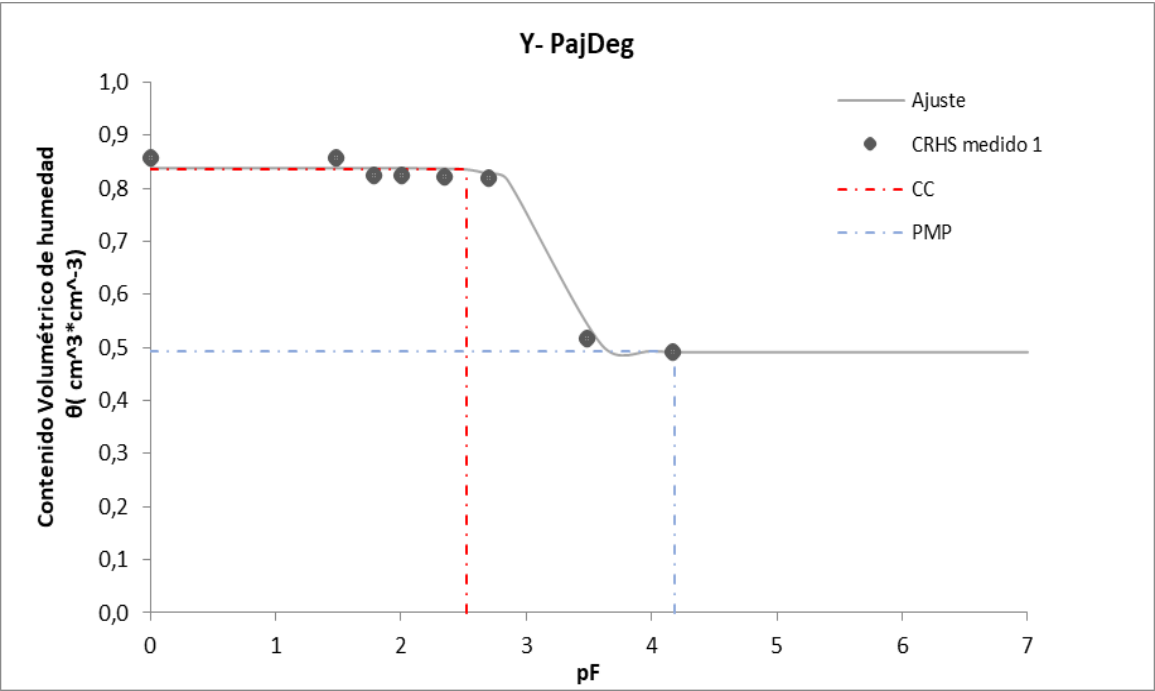
Nota. ^a Plaza (2018). ^b Ramírez (2011). ^c Quichimbo et al. (2012)

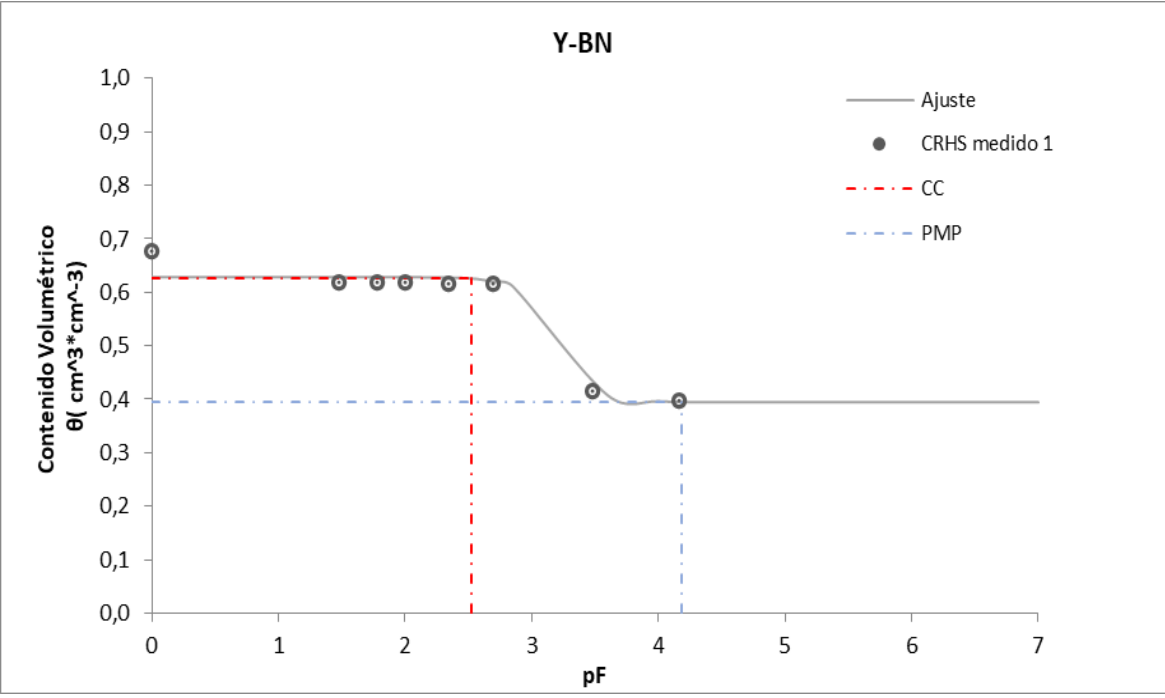
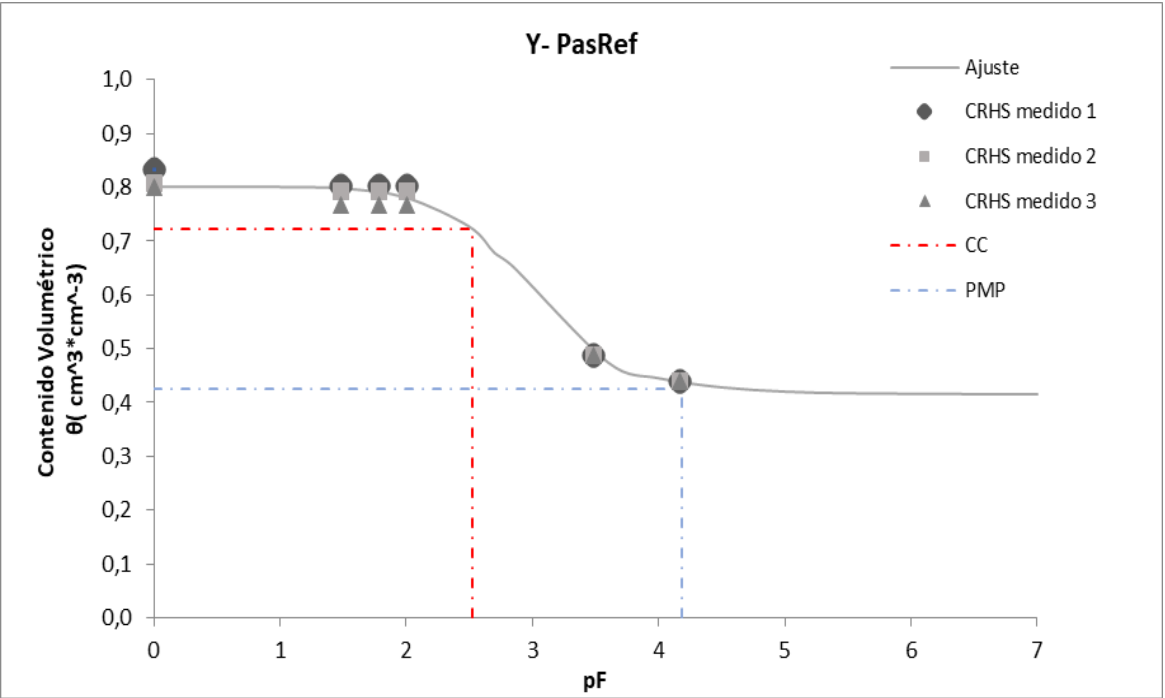
Anexo B: Valores obtenidos de cada variable

Variable Química	Bosque Nativo		Pasto			Pajonal		Arado	Bosque de pino	Promedio
	Y-BN	L-BN	Y-PasRef	L-PasDeg	L-PasRec	Y- PajDeg	L-PajCon	Int_Ara	L-BP	
pH	4.83	4.21	4.45	4.53	4.72	4.63	5.03	4.77	4.16	4.59
M.O %	17.42	17.21	19.05	10.8	22.69	17.43	22.92	18.14	15.34	17.89
N %	0.87	0.86	0.8	0.6	1.5	0.88	1.14	1.1	0,76	0.95
P (ppm)	8.07	6.87	7.02	7.49	4.14	8.58	5.88	8,18	5,63	6.87
K (meq/100g)	0.67	0,26	0,31	0.46	0.26	0.62	0.46	0.51	0.31	0.43
CIC (meq/100g)	58.60	71.40	65	60.8	54.6	67.80	61.0	68.6	63.40	63.47
DA (g*cm-3)	0.41	-	0.42	0.54	-	0.42	0.37	0.61	0.67	0.49
Ks (cm*h-1)	-	0.35	0.29	0.95	-	0.23	0.28	1.52	1.41	0.72

Anexo C: Curva pFs y ajuste para los usos de suelo de las microcuencas Lluchucarrumi y Yutujapina







Anexo D: Valores de obtenidos de CC, PMP y disponibilidad de agua para cada uso de suelo

Código	CC	PMP	Agua Disponible	% Agua Disponible
L-PajCon	0,719	0,458	0,261	26,10
Y- PajDeg	0,835	0,492	0,343	34,27
L-PasDeg	0,783	0,473	0,309	30,94
Y- PasRef	0,723	0,425	0,298	29,83
L-BP	0,545	0,497	0,047	4,70
Int_Ara	0,572	0,224	0,348	34,80
Y-BN	0,626	0,395	0,231	23,11

Anexo E: Valores utilizados para graficar la curva de ajuste por uso de suelo

Código	pF-0	pF-0.5	pF-1	pF-1.5	pF-2	pF-2.5	pF-2.7	pF-2.85	pF-3.6	pF-4	pF-4.5	pF-5	pF-5.5	pF-6	pF-6.3	pF-6.5	pF-6.8	pF-7
L-PajCon	0.84	0.84	0.84	0.84	0.81	0.73	0.66	0.63	0.48	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Y- PajDeg	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.82	0.51	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
L-PasDeg	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76	0.53	0.48	0.46	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Y- PasRef	0.80	0.80	0.80	0.80	0.78	0.73	0.68	0.65	0.48	0.45	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
L-BP	0.67	0.67	0.67	0.65	0.59	0.55	0.53	0.53	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Int_Ara	0.73	0.73	0.73	0.72	0.68	0.58	0.50	0.47	0.26	0.23	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Y-BN	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.61	0.41	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39

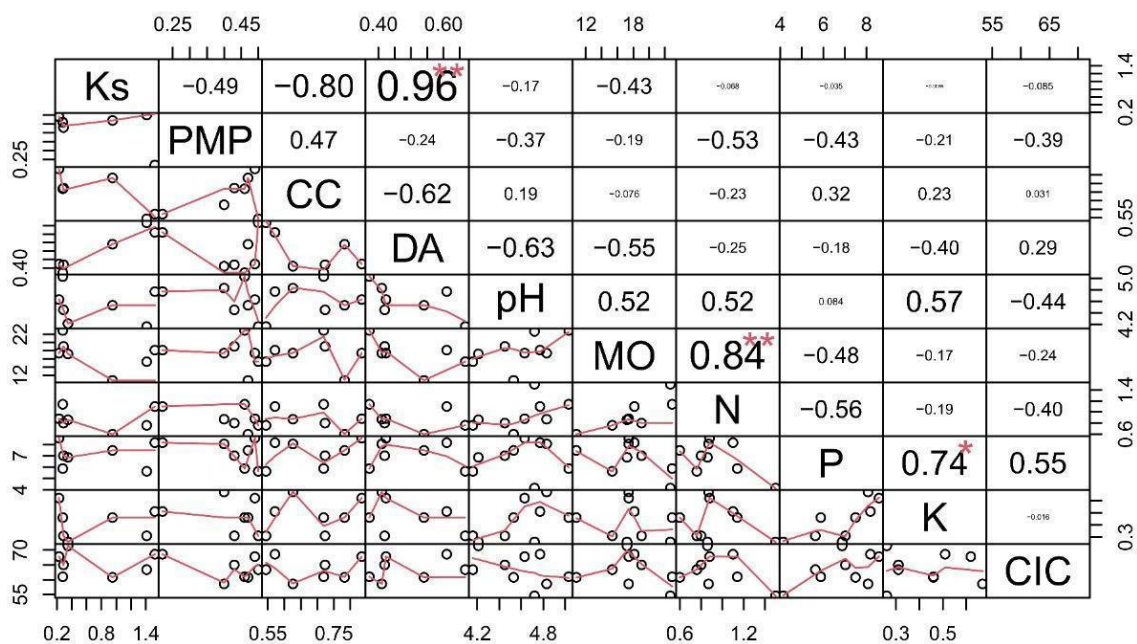
Anexo F: Valores para las características hidrofísicas por uso de suelo

Código	Prof (m)	DA	pF								θ_s	θ_r	α	n	m
			0	1.52	1.80	2.02	2.41	2.70	3.49	4.17					
L-PajCon	0.80	0.37	0.85	0.84	0.82	0.82	-	-	0.49	0.46	0.842	0.450	0.004 10	1.953	0.4880
Y- PajDeg	0.55	0.42	0.86	0.86	0.82	0.82	0.82	0.82	0.52	0.49	0.838	0.491	0.001 0	3.328	0.700
L-PasDeg	0.54	0.34	0.83	0.81	0.77	0.77	0.77	0.77	0.55	0.47	0.794	0.452	0.001	2.063	0.515
Y- PasRef	0.35	0.42	0.81	0.79	0.79	0.79	-	-	0.49	0.44	0.802	0.416	0.003 1	1.745	0.427
L-BP	0.30	0.67	0.68	0.65	0.64	0.62	-	-	0.52	0.48	0.67	0.495	0.019 8	1.756	0.43
Int_Ara	0.20	0.61	0.74	0.72	0.70	0.69	-	-	0.28	0.22	0.731	0.197	0.004 5	1.719	0.418
Y-BN	0.60	0.41	0.68	0.62	0.62	0.62	0.62	0.61	0.42	0.40	0.629	0.394	0.001	3.11	0.679

Anexo G: Valores de prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

Variable	Shapiro-Wilk		
	w	p-value	
Ks	0.79815	0.03927	NN
PMP	0.78288	0.02762	NN
CC	0.94603	0.6935	N
DA	0.87594	0.209	N
pH	0.96547,	0.8534	N
MO	0.92191	0.4083	N
N	0.909	0.3089	N
P	0.94015	0.5835	N
K	0.90053	0.2551	N
CIC	0.98269	0.9767	N

Anexo H: Correlación de Pearson y Spearman



Anexo I : Resultados del ACP en términos de la varianza para cada uno de los componentes

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Desviación Estándar	1.9369	1.7071	1.4781	0.87482	0.61979
Proporción de Varianza (%)	37.51	29.14	21.85	7.653	3.841
Proporción Acumulativa (%)	37.51	66.66	88.51	96.159	100

Anexo J: Porcentaje de contribución de las variables respecto a cada componente

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
KS	14,8910801	12,448661	0,05909289	9,7579852	0,6779763
PMP	0,1644072	28,474518	0,00823566	0,3798868	41,8886769
CC	10,2032	12,671885	10,883873	0,3960734	1,851742
DA	19,656896	7,041217	0,7014157	2,3011799	6,3619061
pH	18,2876582	2,067766	2,30625445	25,3142983	2,4897253
MO	11,2774082	1,517633	20,6036526	9,9637206	1,6414442
N	9,6230506	12,257184	11,6040386	0,4530535	6,4540995
P	3,817409	4,467801	32,1374323	0,7752324	4,8214393
K	10,97363	2,282674	14,2696649	12,5334846	29,7084123
CIC	1,1052605	16,770662	7,42633986	38,1250852	4,1045781